PROCEEDINGS OF PIB THE INSTITUTE OF BIOLOGY

Review

https://doi.org/10.5564/pib.v39i1.3144

Microbial exopolymers for soil restoration and remediation: current progress and future perspectives

Dashnyam Punsaldulam* and Orgil Anumandal

Laboratory of Microbial Synthesis, Institute of Biology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

*Corresponding author: punsaldulam_d@mas.ac.mn, https://orcid.org/0000-0003-1086-397X

Abstract. Soil degradation and pollution are pervasive global challenges caused by climate change and anthropogenic activities. To address these issues, seeking environmentally friendly and sustainable solutions to restore degraded soils and remediate polluted ones is imperative. One promising avenue lies in the utilization of microbial exopolymers, which can play a pivotal role in rejuvenating soil health by enhancing its physical, chemical, and biological properties. Microbial exopolymers, through their various functional groups, facilitate interactions that bind soil particles together, thereby promoting soil aggregation and immobilizing soil pollutants. Thus, the application of exopolymers holds the potential to enable soils to continue providing its essential ecosystem services. Despite significant progress in evaluating the impact of microbial exopolymers on soil properties, there remains a pressing need to overcome existing challenges that hinder the large-scale use of microbial exopolymers for soil restoration and remediation. The significant challenges include (i) inadequate understanding on the effectiveness and safety of exogenous microorganisms and their interactions with native soil biotic and abiotic factors, (ii) the lack of feasible methods for characterizing the constituents of exopolymers produced by soil microbial community, (iii) insufficient efforts in exploring the community diversity of soil microorganisms capable of producing exopolymers in various soils, and (iv) inadequate effort on aligning the molecular characteristics of exopolymers with the specific application purposes. To harness the full potential of microbial exopolymers, interdisciplinary approaches are paramount in achieving improved effectiveness of soil restoration and bioremediation endeavors, which are of utmost importance in the ever-changing environment.

Keywords: soil aggregation, soil microbial EPS, soil bioremediation, soil health

Received 23 October 2023; received in revised form 24 October 2023; accepted 17 November 2023

1. Introduction

1.1 Background on soil degradation and pollution

Land, inclusive of its water bodies, serves as the foundation for human livelihoods and well-being by supporting primary productivity, the provision of food, freshwater among other ecosystem services [1]. However, human activities, in conjunction with climate change-related events, are leading to land deterioration and biodiversity loss on our planet [2], [3]. According to the Intergovernmental Panel on Climate Change, *land degradation* is defined as "a negative trend in land condition, caused by direct or indirect human-induced processes including anthropogenic climate change, expressed as long-term reduction or loss of at least one of the following: biological productivity, ecological integrity or value to humans". Failing to address land degradation will result in increased emissions and reduced carbon sinks, which is inconsistent with the emissions reductions required to bring global warming to 1.5°C or 2°C [1].

The Food and Agriculture Organization defines soil degradation as "a change in the soil health status resulting in a diminished capacity of the ecosystem to provide goods and services for its beneficiaries". *Soil health* – characterized by its functionality and ecological equilibrium –depends on physical attributes like porosity, moisture, and texture; chemical components including organic matter and nutrients level; and biological factors such as microbial diversity, soil respiration, and microbial biomass [4]. Over the course of several decades, soil health has experienced a steady decline, posing significant risks to human well-being and food security [1].

The physical health of soil can be damaged due to various factors like soil erosion (induced by both water and wind), mining, and deforestation. Desertification, a form of land degradation in drylands, including arid, semi-arid, and dry sub-humid regions, results from numerous factors, including human activities and climatic variations. The extent and severity of desertification have increased in some dryland areas over the past few decades, with projected risks of intensifying due to climate change [1]. Another form of soil health degradation is soil pollution. Soil pollution refers to a toxic chemical or substance in the soil at higher-than-normal concentrations, which have adverse effects on any non-targeted organism [5]. Soil pollution –typically the result of the introduction of toxic substances, such as chemical fertilizers, pesticides, and oil spills –can result in reduction of both soil chemical and biological health [4]. Thus, soil pollution can directly impact human health and severely degrade major ecosystem services that soil provides [5].

To achieve the Sustainable Development Goals of the United Nations, the development and implementation of environmentally friendly technologies are essential to *remediate* the polluted soils and *restore* the degraded soils. Conventional methods are not always accessible for low-income countries, or they generate another environmental problem in the long run [6]. *Bioremediation*, on the other hand, involves the degradation of hazardous pollutants to nonhazardous substances using biological agents. Various microbial mechanisms enable breakdown, transformation, and stabilization of various pollutants [7]. However, when restoring disturbed soils or soils affected by desertification, it becomes imperative to employ techniques that can simultaneously restore the soil's physical, chemical, and biological properties. Thus, developing microbial technologies tailored to meet these multifaceted soil restoration requirements is of utmost importance.

1.2 Significance of microbial exopolymers in soil health

Soil microorganisms play a vital role in the cycling of soil organic carbon and nutrients. They both produce and consume greenhouse gases, making them central to climate regulation [2], [8]. These microorganisms offer a range of ecosystem services, including providing essential resources, regulating factors such as climate, water, and decontamination, and the support of critical processes like organic matter transformation, soil formation, and plant growth [9]. The structure of soil is a key determinant of its ability to perform these functions effectively. Soil structure is formed by arranging soil particles into aggregates and associated pore networks. The soil aggregates represent the foundational units of soil structure. These units define the soil's critical physical and mechanical properties, including water retention, water movement, aeration, and temperature regulation. These properties, in turn, profoundly impact the physical, chemical, and biological processes occurring in the soil [10], [11].

A recent global-scale meta-analysis has highlighted the significant contributions of soil bacteria and fungi in soil aggregate formation. Bacteria have a substantial impact on both macro and micro-aggregates, whereas fungi predominantly influence macro aggregation. They contribute to soil aggregation through various mechanisms [3]. One of the mechanisms is the production of exopolymers by soil microorganisms. Exopolymers promote soil aggregation, acting as a binding agent at the micrometer scale. Therefore, microbial exopolymers have garnered considerable attention as an eco-friendly approach to soil remediation and restoration.

1.3 Objectives of the review

Application of microbial exopolymers in various industries, including food, medicine, textiles, cosmetics, and environmental fields have been well documented [12]–[16]. Moreover, several reviews have provided comprehensive insights into the functional roles and biosynthetic pathways and genetic regulations of microbial exopolymers [17]–[20]. However, utilization of microbial exopolymers in soil bioremediation and restoration remains relatively underexplored, primarily due to the challenges associated with investigating the interactions of microbial exopolymers mixture in natural environments [21]. Despite these difficulties, numerous research articles have reported the positive impact of microbial exopolymers on soil health. In this review, we focus on elucidating the mechanisms by which microbial exopolymers enhance soil health, encompassing physical, chemical, and biological aspects. First, we provide a brief overview of microbial exopolymers' composition, biosynthesis, and functional roles. Subsequently, we present a summary of the current state of knowledge regarding the potential applications of microbial exopolymers and the microorganisms responsible for their production in two key areas: (i) the restoration of soils that have been degraded, (ii) the remediation of soils contaminated with heavy metals and xenobiotics. Lastly, we conclude by discussing the existing challenges and outlining future research directions in microbial exopolymers for soil restoration and remediation.

2. Soil microbial exopolymers: An overview

2.1 Definition and functions of soil microbial exopolymers

Early research mainly focused on polysaccharides, but it has become clear that proteins, nucleic acids, and other compounds also significantly contribute to composition of microbial exopolymers or extracellular polymeric substances (EPS) [22]–[26]. This section is dedicated to introducing the major components of microbial EPS found in soil, namely polysaccharide and protein. This is because the following sections will be focusing on discussing the potential application of EPS as a whole or its polysaccharides and proteins. The term 'EPS' can sometimes be confused with exopolysaccharides. Throughout this review, we will use the term 'EPS' to refer to a mixture of polymeric substances secreted by microorganisms into their surrounding environment. When available, we will define the specific constituents of EPS as EPS-polysaccharides or EPS-protein.

2.1.1 EPS-polysaccharides

Polysaccharides constitute a substantial part of biofilm matrices, serving crucial functions in microbial communities. Microbial polysaccharides fall into two main categories: homopolysaccharides, composed of a single monosaccharide unit, and heteropolysaccharides, consisting of multiple monosaccharides, with heteropolysaccharides being the dominant type [27]–[30]. Different microorganisms produce various polysaccharides with distinct structure and composition. Some microorganisms produce a single type of polysaccharide, whereas others produce more than one polysaccharide with different structure and function. *Pseudomonas aeruginosa*, for example, secretes various polysaccharide types, including alginate, *Pel* and *Psl*, each contributing to different stages of biofilm formation, where alginate enhances mechanical stability, while *Pel* and *Psl* contribute in biofilm establishment and surface adherence [31]. Analytical methods for structural elucidation of exopolysaccharides extracted from individual microbial isolates are well established [32]. However, direct analysis of soil-extracted EPS-polysaccharides remains challenging due to their low abundance in soil and difficulties related to their purification and characterization.

2.1.2 EPS-protein

Identifying and characterizing soil proteins are challenging due to their interaction with humic acid and soil matrix [33]. The major extracellular protein in soil is a glomalin-related soil protein (GRSP). Although their origin remains dubious, GRSP represents an important group of EPS. Most research seem to agree that arbuscular mycorrhizal fungi secrete GRSP [34]–[38]. However, it was suggested that these proteins could be secreted by free living bacteria [39]. A proteomic technique revealed that glomalin might be thioredoxin-containing chaperon, and not be mycorrhizal origin. The authors detected large amount of soil-related heat stable proteins and protein of non-mycorrhizal origin in GRSP [40]. It was suggested that GRSP fraction could represent soil microbial EPS more than glomalin. Redmile-Gordon *et al*. [39] proposed the cation exchange resin as the most suitable method to extract soil microbial EPS, with less humic acid contamination and intracellular components. Soil microbial EPS extracted with this method contains both EPS-polysaccharide and EPS-protein. The ratio of the two components vary depending on environmental variables [39], [41]–[44].

2.2 Functions of soil microbial exopolymers

EPS production by microbes is a resource-intensive and energy-demanding process. Thus, EPS confers competitive advantages for soil microorganisms by enhancing quorum sensing and adhesion [45]. EPS also can preserve carbon and trap nutrients for microbial uptake. Additionally, EPS serves various functions, mostly centered around protecting the producing microorganisms from a range of abiotic stresses such as drought, temperature and pH extremes, salinity, and oxidation, and exposure to soil pollutants such as heavy metals and xenobiotics [10]. For example, samples collected from Arctic Sea ice have revealed notably high concentrations of EPS, which act as a shield for microorganisms, protecting the harsh environmental conditions experienced during the winter season. Exopolymers produced by *Bacillus* sp. strain B3-72 and *Geobacillus tepidamans* V264 exhibit resistance to dissolution at elevated temperatures [46]–[48].

Additionally, EPS enhances the transfer of genetic material and improves microbe-host (plant) interactions [10]. For instance, EPS play a crucial role in symbiosis between nitrogen-fixing rhizobia and plants [49]. It has been demonstrated that plants can recognize the structure of EPS produced by rhizobia. The interaction between the EPS of *Mesorhizobium loti* strain R7A and *Lotus japonicus* was recently shown to be mediated by a receptor expressed by the plant. *L. japonicus* produces a receptor that binds to and permits infection by only bacteria

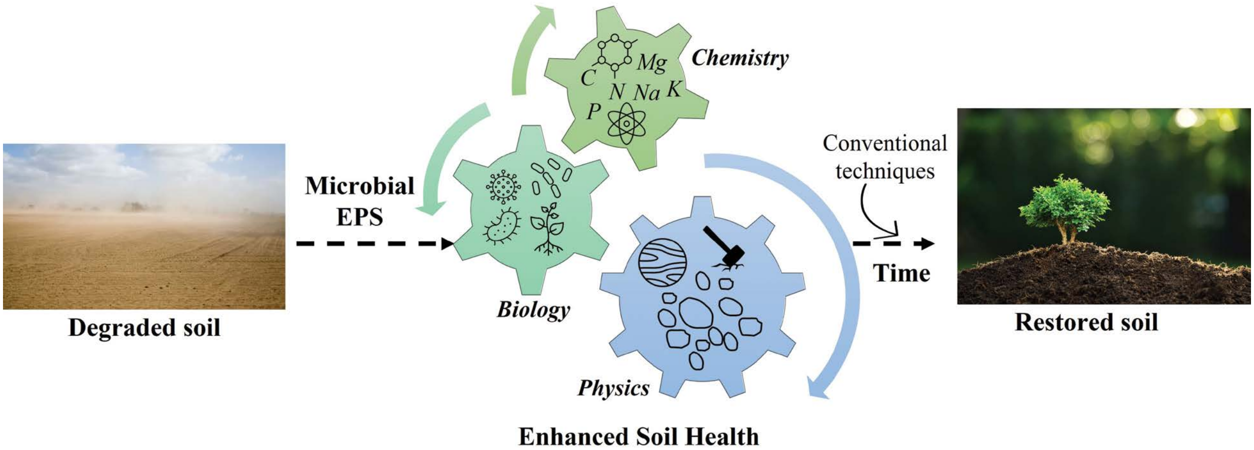


Fig. 1. A schematic illustration of how the application of EPS can improve soil restoration efforts.

that produce EPS with a specific structure [50], [51].

3. Applications of microbial EPS in soil restoration

While synthetic polymers are proven effective in enhancing soil properties, they suffer from low or no degradation in nature and can release potentially toxic compounds into the environment. In contrast, microbial EPS represents an environmentally friendly alternative to traditional chemical polymers due to its exceptional biodegradability, cost-effectiveness, and non-toxic nature for both humans and the environment [10], [15], [52]–[55]. Various biopolymers have been utilized in soil restoration to improve its physical, chemical, and biological properties and enhance the bioremediation efficiency of both organic and inorganic pollutants [56]. In the following section, we aim to categorize current findings regarding how microbial EPS influences soil health by impacting its physical, chemical, and biological properties (**Fig. 1**).

3.1 Role of microbial EPS in enhancing soil physical properties

3.1.1 Soil aggregating agent

Although microbial EPS has been known for their ability to associate with soil minerals and promote soil aggregation since 1990s [57], [58], researchers' interest in the role of EPS for soil health has only recently increased. This can likely be attributed to their recognized importance in protecting soil organic matter. A recent study, using high-resolution X-ray computed tomography, confirmed that EPS and mucilage connect soil particles that did not break apart upon drying due to their properties such as high viscosity and low surface tension [59]. Currently, researchers seem to support the idea that EPS-producing microbes or extracted EPS can be used to enhance soil aggregation in degraded soils.

Several researchers have reported a positive correlation between soil EPS content and soil aggregate stability [42], [60]–[62]. Microcosm and pot experiments have demonstrated that EPS-producing microorganisms promoted soil aggregation and increased aggregate stability. For instance, *Pseudomonas chlororaphis* A20 and *Bacillus proteolyticus* A27 were found to increase water-stable macroaggregates in silt clay loam soil [63]. In another study, acid-tolerant *B. amiloliquefaciens* p16 provided acid tolerance to the bacteria while promoting soil aggregation [64], although the soil type used in this research was not specified. EPS produced by *Microbacterium arborescens*, a bacterium associated with a sand dune plant, demonstrated the ability to enhance aggregation in sandy soil [65]. Inoculating two indigenous cyanobacteria, *Nostoc ellipsosporum* HH-205 and *Nostoc punctiforme* HH-206 improved soil aggregate stability in salt affected area [66]. It seems that EPS-producing microbes can propagate in various soils and improve soil aggregation.

Researchers have also explored the relative contribution of EPS constituents in enhancing soil aggregation. Rather than total SOC, EPS-polysaccharide and EPS-protein were correlated with soil structural stability, but EPS-protein was more closely related to aggregate stability than EPS-polysaccharide [42]. Another research reported that EPS-polysaccharide did not correlate with aggregate stability in soil with and without labile substrate addition, whereas EPS-protein showed a positive correlation [67]. It was suggested that the hydrophobicity of EPS, which can be responsible for gel formation, particle aggregation, and bio-flocculation, was mainly regulated by their relative protein to polysaccharide contents [68].

The application of calcium alginate has been shown to promote soil aggregation [69]. However, it is important to note that the binding ability of EPS-polysaccharide depends on its linear structure, length, and flexibility, which enable the formation of hydrogen bonds, Van der Waals interaction, and ionic interactions. Soil physical and chemical properties, such as pH, can influence the charges of molecules [10]. Thus, the effectiveness of pure polysaccharides in enhancing soil aggregation could vary depending on soil type.

3.1.2 Soil erosion control

Degraded dryland soils are typically characterized by poor aggregation and high susceptibility to erosion due to their fine-grained particles, low organic matter content, and sporadic vegetation cover [70]. Desertification exacerbates the issue by reducing the plant cover and biocrust, resulting in the expansion of barren soils. Dust emissions from these barren soils pose threats to human livelihood and the environment. Desert dust can transport highly resilient alien particle-bound microorganisms to intra and intercontinental distances, potentially becoming invaders in sensitive or pristine sink environments and posing risks as potential pathogens for food crops or humans [71].

EPS-producing bacterial strains or purified EPS in these eroded lands can be utilized to stabilize the surface, which can aid in maintaining soil architecture [72]. Positive outcomes have been observed when using EPS-synthesizing microbes like *Rhizobium tropici* and *Leuconostoc mesenteroides* to combat soil erosion. The authors concluded that the EPS produced by these strains improved the cohesion between the soil particles, enhancing soil resistance against surface erosion [73]. Microbial EPS increases the critical shear stress and surface erosion resistance, attributed to the enhanced cohesion facilitated by grain-coating biopolymer slimes [74].

A commonly employed approach for restoring eroded dryland areas involves the use of EPS-producing cyanobacteria to stimulate biocrust formation. Cyanobacterial EPS is believed to play a crucial role in stabilizing dryland soil surfaces, thereby preventing nutrient loss and dust generation [70]. In a study conducted in Hobq Desert in China, a mixed culture of EPS-producing microbes, namely *Microcoleus vaginatus* and *Scytonema javanicum*, was inoculated into sandy soils in to initiate biocrust development. Examination of the developed biocrust, conducted after three to eight years, revealed that the EPSs within the biocrust played a significant role in capturing and retaining moisture in sandy soils while protecting the soil from erosion [75]. Furthermore, the EPS-producing strain identified as *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 was shown to speed up biocrust recovery in the field [76].

In addition to directly applying EPS-producing strains, researchers are exploring various avenues to harness the benefits of exopolymers and their chemically modified forms as sustainable dust suppressants and erosion control [77]–[79]. For example, xanthan gum, starch, and carboxymethylcellulose were shown to be effective dust suppressants at low concentrations [80]. Sodium alginate and its chemically modified derivative significantly increased soil resistance against strength reduction and prevented dust emission [79], [81]. Large-scale field trials have demonstrated that these polymers can effectively reduce dust emissions up to 8 days post-application. However, their effectiveness is reduced after rainfall due to rapid degradation [82], indicating the need to carefully modify polymers to enhance efficiency. Moreover, the wind tunnel test indicated that biopolymers, including sodium alginate and pectin at 1% reduced wind erosion [83]. The agglomeration properties and surface adhesion of EPS contribute to forming effective surface shield in soil [63]. Thus, EPS can serve as an environmentally friendly alternative to develop as an eco-cover, either replacing or working in conjunction with conventional materials approaches such as vegetative cover and geo-membrane, to mitigate soil erosion [73] and dust emission [84].

3.1.3 Soil cementing agent

The EPS were also tested for their effectiveness in soil stabilization against mechanical disruption. Sand cementation was implicated to be partially biogenic because microbes isolated from cemented sand tailings produced EPS that increased strength of the sand [85]. Furthermore, inoculation of EPS-producing bacteria and cyanobacteria was shown to reduce rill erodibility, suggesting that endemic microbial inoculation is an effective bioengineering technique for managing rill erosion-prone regions [86]. As reviewed by Costa *et al.* [10] polymer produced by *Aureobasidium pullulans* could enhance the compressive strength of soil by more than 200%. Notably, xanthan and gellan, when used at a concentration of 0.5%, outperformed traditional cement in increasing the compressive strength of soil [10]. In another research, xanthan improved soil mechanical properties for geotechnical engineering purposes [56].

In addition to directly increasing soil strength, EPS has been found to play a significant role in enhancing the carbonate precipitation process by effectively trapping metal ions such as $Ca2^{+}$, and $Mg2^{+}$. The process, known as microbially induced carbonate precipitation (MICP), occurs when microbes facilitate carbonate formation due to supersaturation associated with certain biochemical activities. MICP is applicable in various fields, serving as a sealant in underground geology, and countermeasures for preventing soil erosion. Additionally, this biocalcification is a type of carbon sequestration [87], highlighting the potential of microbial polymers as an economically competitive and environmentally friendly alternative material for use as a soil binder or cementing agent.

3.1.4 Biohydrogel to improve soil water holding capacity

It is widely accepted that microorganisms produce EPS as a defense mechanism against environmental stress. For instance, under desiccation conditions, *Pseudomonas* sp. increased its production of EPS-polysaccharide [88]. Similarly, *Pseudomonas putida* responds to water-limiting conditions by boosting alginate production, protecting the resident cells from desiccation stress and enhancing their chances of survival [89]. EPS are hygroscopic in nature, allowing it to retain substantial amounts of water in the microenvironment, even when surrounding bulk soil lacks moisture [72].

It has been suggested that the production of EPS can create hydraulic decoupling within the microenvironment by reducing hydraulic conductivity and increased water retention. This can maintain the microenvironment hydrated, protecting cells during drainage, or potentially reducing osmotic stress for soil microbes when rapid soil rewetting occurs during rainfall [90]. A recent microcosm study provided evidence for the effects of EPS-producing strain *B. subtilis* NCIB 3610 on cumulative and local water loss and hydraulic decoupling in soil. The authors concluded that this EPS-producing strain drastically alters the architecture of the soil pore space, which in turn affects the rates and spatial distribution of soil water losses [91]. EPS also play a role in reducing evaporation from soil. In soil treated with EPS, water loss occurs slower than control soil without EPS [92]. Moreover, EPS produced by S*inorhizobium meliloti* were found to have concentration-dependent effects on the rate, extent, and variability of pore water evaporation in micropore-sized chambers [93].

Biohydrogels absorb water owing to their hydrophilic functional groups, while their resistance to dissolution is attributed to the cross-links between network chains [94]. It is important to note that specific components of EPS can have different effects on their water retention capabilities. For instance, polysaccharides can significantly increase the water-holding capacity of pure sand, whereas protein has minimal impact on the hydrodynamic properties of fine sandy soil [95]. Purified polysaccharides can retain 50-70 g of water per gram. Nevertheless, it is crucial to understand that the water-holding capacity of polysaccharides depends on their structural characteristics [92]. Among the polysaccharides studied for their bio-hydrogel properties, xanthan stands out as one of the most extensively researched. Even at concentrations of less than 1%, xanthan can enhance both water-holding capacity and porosity of sandy soils [96]. These microbial polymers, such as xanthan, offer a promising alternative to synthetic hydrogels for improving soil water-holding capacity [56]. However, it is important to conduct careful concentration testing to avoid potential issues like soil cementation. Also, EPS can exert an influence on soil water repellency, which, in turn, affects both infiltration and soil water retention [97].

3.2 Role of microbial EPS in enhancing soil biological properties

3.2.1 Soil microbial diversity and enzyme activity

Soil exhibits inherent heterogeneity and diversity. Its spatial arrangement generates a multitude of micro-habitats, concurrently accommodating microorganisms that occupy distinct niches. Thus, soil microbial communities exist in the form of individual microaggregates, resembling biogeographical islets, i.e., microorganisms in one microaggregates remain isolated from those in other microaggregates [98]. Thus, it is intuitive to assume that soil EPS content could influence soil microbial community diversity. Indeed, the composition of microbial communities is closely associated with soil EPS content in semiarid grassland [99]. Furthermore, introducing glucose into the soil to stimulate biofilm development has been shown to enhance Shannon diversity [62].

While it is acknowledged that improved soil aggregation is correlated with greater diversity in soil microbial communities, only a few studies reported changes in microbial diversity during the application microbial EPS for bioremediation or soil restoration purposes. Some studies have shown that the inoculation of EPS-producing strains can positively affect soil microbial diversity. For example, EPS-producing strain identified as *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 was found to speed up biocrust recovery in the field. This strain stimulated the assembly of heterotrophic communities in the topsoil before the commencement of autotrophic cyanobacteria, and it significantly increased the abundance of bacteria and actinomycetes [76]. *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 increased the abundance of beneficial microorganisms [100]. In addition, the inoculation of two indigenous heterocystous cyanobacteria, *Nostoc ellipsosporum* HH-205 and *Nostoc punctiforme* HH-206, increased microbial activity in salt-affected areas [66]. These findings collectively suggest that the application of microbial EPS can enhance soil microbial diversity by improving soil aggregation.

During the application EPS or EPS-producing strains to soil, auxiliary tests were conducted to assess soil enzyme activities. The EPS-producing strains *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018, *Pseudomonas chlororaphis* A20 and *Bacillus proteolyticus* A27 were found to enhance enzyme activities in soil [100], [63]. Similarly, EPS of cyanobacteria *Tolypothrix tenuis* and *Microchaete tenera* increased β-glucosidase, urease, protease, phosphomonoesterase, arylsulphatase, and dehydrogenase activity in silty clay loam soil [101]. Furthermore, when inoculating the EPS-producing cyanobacterium *Microcoleus vaginatus* ATHK43 to promote biocrust development, invertase and dehydrogenase activities were observed to significantly increase after 90 days of inoculation [102].

3.2.2 Plant growth promotion and stress alleviation

Microbial EPS can alleviate abiotic stresses in plants, such as salinity, drought, and temperature fluctuations. These protective mechanisms stem from the ability of EPS to bind to metals and ions, enhance soil aggregate stability, and improve water retention. EPS effectively mitigates plant stress through several mechanisms [72]. One of these mechanisms involves EPS indirectly reducing the uptake Na+ by plants by absorbing excess Na+ ions in the soil. Another mechanism is forming a protective barrier around plant tissue by EPS, providing insulation against temperature fluctuations [103]. This barrier also enhances plant-microbe interaction and surface attachment [104]. Lastly, EPS's ability to promote plant growth is associated with improved soil structure and biological activities [72].

Several bacterial strains, including *Pantoea, Bacillus, Actinomycetes, Rhizobium, Arthrobacter, Bradyrhizobium,* and *Pseudomonas*, have been found to produce EPS under stress conditions, which serves as protective effect for plants facing drought and salt stress. For instance, *Pseudomonas putida* GAP-P45 alleviated PEG induced drought stress in sunflower seedlings, likely by forming biofilm on the root and improving soil structure [105]. EPS-producing strains of *Pseudomonas* and *Bacillus* have demonstrated their ability to protect *Arabidopsis thaliana* from osmotic stress induced by 25% PEG [106]. Treatment of wheat and chickpea with EPS-producing strain *Agrobacterium pusense* has shown positive effects on the physiological parameters of these plants when subjected to intermittent soil drying [107]. EPS producing strain *Pseudomonas entomophila* PE3 enhanced growth, yield, and tolerance of sunflower under salt stress [108].

Another benefit of microbial EPS is related to the fact that EPS can stabilize heavy metals in soil, thus limiting their plant uptake. For instance, the EPS-producing strain *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 alleviated lead (Pb) stress in packchoi plants grown in soil that has been experimentally polluted. This was evidenced by an increase in plant biomass and a reduction in the Pb content in edible tissue [100]. Similarly, EPS extracted from *Bacillus* sp. S3 proved effective in mitigating cadmium (Cd) stress in *Oryza sativa* L. It not only increased the plant biomass but also lowered Cd accumulation and transport and minimized oxidative stress. EPS application enhanced Cd retention in the shoot cell walls and root vacuoles and altered the expression of genes involved in cell wall formation and antioxidant defense systems [109]. Thus, the utilization of EPS-producing strains emerges as a promising solution to address biotic and abiotic stresses in plants, thus preventing crop loss in the face of climate change and global water shortage.

3.3 Role of microbial EPS in enhancing soil chemical properties

Microbial EPS can influence soil chemical properties in several ways. EPS influences the stability of soil organic matter, primarily through its effect on soil aggregation [110]. Enhancing soil aggregation and its stability could minimize SOM decomposition. A recent study utilizing scanning transmission x-ray microscopy coupled with near edge x-ray absorption fine structure spectroscopy has revealed that intact microaggregates are capable preserving simple organic carbon [110]. Furthermore, 13C-labeling experiments coupled with LC/MS analysis have revealed that biocrust retain higher abundance of various metabolites, especially amino acids and organic acids, compared to subcrust [111]. These findings suggest that microbial EPS might influence the composition of SOM.

Soil microbial EPS influences nutrient accumulation in soil by affecting soil aggregation [63]. EPS may prevent nutrient losses during periods of heavy rainfall by retaining the metabolites and nutrients [70]. Some bacterial species, such as *B. subtilis* increase their EPS production in nutrient-deficient conditions [72]. *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 has been found to increase nutrient contents in soil [76]. Furthermore, EPS is utilized as carbon source by soil microbial communities. Costa *et al.* demonstrated that EPS of *Acidobacteria* is metabolized by several bacterial and fungal taxa [112].

Microbial EPS can significantly impact the composition and stability of biomolecular carbon, nitrogen (N), and phosphorus (P) in soils by influencing the mineral-organic associations. EPS was shown to be absorbed and co-precipitated with dissolved and colloidal aluminum species in soil [113]. Moreover, associations of EPS with soil organic and inorganic components not only affect the composition of both immobile and mobile organic matter but also the reactivity of minerals [10]. Biocrust development by inoculating EPS-producing cyanobacterium *Microcoleus vaginatus* ATHK43 has been found to increase soil electrical conductivity, total N, potassium, calcium, magnesium, cation exchange capacity, and chlorophyll content in surface soil [102].

EPS also helps regulate the diffusion of organic carbon and other nutrients, thereby regulating elemental bioavailability in the soil. For example, *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 was shown to increase content of total P, available N, and available P in developing biocrust [76]. Another EPS-producing strain, *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018, reduced the available Pb content in soil by up to 38.1%, and increased soil pH, and soil nutrient content [100]. Zhang *et al.* reported that the interaction of EPS with ubiquitous soil ferrihydrite may affect the mobility and fate of microbially-derived carbon, nitrogen, and phosphorus in soil [114]. Moreover, the EPS produced by a strain of *Enterobacter* was observed to increase P-solubilization when added to the culture medium. This effect in likely due to the EPS absorbing solubilized P and allowing the additional release of soluble P from insoluble P [115].

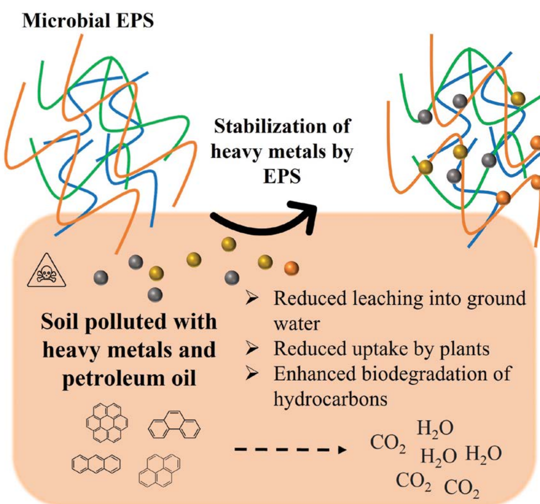


Fig. 2. A simplified illustration on the application of microbial EPS for soil remediation.

Last but not least, EPS components can function as electron shuttles in the corrosion process. EPS can interact with iron ions to cause anodic dissolution and promote corrosion. EPS also can play a role in increasing electronic potential and reducing electronic resistance, thereby enhance the corrosion current by facilitating electron transfer and metal dissolution [116]. The rock-inhabiting fungus *Knufia petricola* produces a corrosive EPS-polysaccharide [117].

4. Stabilization and degradation of soil pollutants facilitated by microbial exopolymers

Soil in many industrialized countries is becoming increasingly contaminated with xenobiotics, which pose significant risks to public health and the environment. These pollutants originated from various sources, including, but not limited to industrial and municipal wastewaters, leachates from landfills, leaking underground storage tanks, and urban runoff. Microbial EPS facilitates the stabilization and biodegradation of pollutants in soil by several different mechanisms, depending on the nature of the pollutant. **Fig. 2** shows how microbial EPS offer several advantages due to their biodegradability, lower toxicity, and adaptability to different environmental conditions [118].

4.1 Stabilization of heavy metals by microbial exopolymers

Numerous *in vitro* studies have explored the ability of microbial EPS to absorb or immobilize various heavy metals [118]. Several EPS-producing bacteria, including *Azotobacter, Paenibacillus, Klebsiella, Bacillus,* and *Pseudomonas*, have been found to adsorb heavy metals [72]. For instance, EPS produced by *Azotobacter* was effective in immobilizing heavy metals, Cd and Cr, and reducing their uptake by wheat [119]. In another case, the EPS-producing strain *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018, stabilized Pb in contaminated soil [100]. The bioremediation of Pb by *Pseudomonas* sp. W6 was attributed to the biosorption capacity of the exopolysaccharide produced by the strain [120]. Furthermore, research has shown that EPS from a fungus *Aspergillus tubingensis* F12 could leach various heavy metals from soil in a column leaching experiment, with minimal effect on soil microbial community [121]. In addition to heavy metal stabilization, some microorganisms produce EPS that can be used to stabilize radionuclide. For instance, a thoriotolerant bacteria, *Providencia thoriotolerans* AM3, produces EPS that effectively binds radionuclide thorium (Th) [122].

Due to its diverse composition, EPS contains ionizable groups such as amino, carboxyl, hydroxyl, phosphate, and sulfate. As a result, microbial EPS can bind to positively charged heavy metals via electrostatic interactions [72] [84]. The absorption behavior of a particular microbial EPS can be influenced by its surrounding environment, particularly soil conditions. Factors like soil pH, which impact the charges of molecules, play a pivotal role in this regard [123]. For instance, under acidic to slightly alkaline pH conditions, galacturonic, glucuronic, and alginic acids are responsible for soil Cr(VI) stabilization [124]. Additionally, sorption behavior of different bacterial EPS can be influenced by types of mineral surfaces [125], probably due to their structural difference. The ability of EPS-polysaccharide to bind heavy metals depends on its linear structure, length, and flexibility, which collectively enable the formation of different interactions [123]. Apart from soil factors influencing the EPS function, some microbial strain changes the properties of their EPS in different environments. For instance, heavy metal tolerant strain Bacillus sp. S3 can produce EPS with altered properties in response to exposure to various heavy metals [126].

In addition to binding heavy metals, EPS also adsorbs organic pollutants such as phenanthrene, benzene, and dye molecules, which might be related to their hydrophobic regions [84]. These findings illustrate the significant potential of microbial EPS in mitigating soil contamination by a wide range of pollutants, including heavy metals, radionuclides, and various xenobiotics. As a result, the application of EPS can help reduce the transport of solids in runoff water and avert contamination of both surface and groundwater [84], [73].

4.2 Enhanced degradation of hydrocarbons by microbial EPS

Petroleum products are one of the major pollutants found in soil. One of the compound groups that ranks among the highest priorities on the list of harmful and/or toxic contaminants by US Environmental Protection Agency is polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs). These xenobiotics exhibit both acute and chronic toxicity, and they can have the potential to be carcinogenic, mutagenic, or teratogenic. Due to their distinctive chemical structures, hydrocarbons are known to be resistant to biodegradation in the natural environment, leading to their accumulation in the food chain. While various microorganisms have demonstrated the capability to metabolize hydrocarbons, their effectiveness is limited due to their low abundance in nature. Also, the survival of these microorganisms in the natural environment is uncertain due to various environmental factors [6]. The addition of emulsifiers can be employed to enhance the bioremediation of pollutants with poor water solubility [84].

Several microbial strains, such as S*treptomyces griseorubens* GD5 [127] and *Nostoc flagelliforme* [128], can produce EPS with emulsifying activity. In another example, a moderate halophilic bacterium *Halomonas eurihalina* has been found to produce an exopolysaccharide with the capability to emulsify a wide range of hydrocarbons including n-tetradecane, n-hexadecane, n-octane, mineral oils, petrol, and crude oil [129]. EPS from *Zoogloea* sp. and *Aspergillus niger* were able to accelerate pyrene degradation in contaminated soil. Notably, when these two EPS types were combined, the degradation was further enhanced [130]. Furthermore, research has shown that EPS from *Ochrabacterium anthropic* strain AD2, possessing bioemulsifying activity, can significantly improve the degradation of diesel and fuel oil mixtures in both microcosm and biopile experiments [131].

EPS promotes degradation of hydrocarbons by solubilizing these substrates due to their amphiphilic property [132]. This enables the hydrocarbons to diffuse through the aqueous phase to the cell surface. In support of this, confocal laser scanning microscopy revealed that a GFP-labeled strain of *Pseudomonas putida* was found to grow directly on phenanthrene, forming a biofilm on accessible crystalline surfaces. The biofilm formation appears to be vital in overcoming mass transfer limitations and achieving improved PAH degradation [6]. In another study, phenanthrene-degrading bacteria capable of producing EPS, *Sphingobium* sp. PHE3 and *Micrococcus* sp. PHE9, were shown to enhance mass transfer of phenanthrene from silicone oil to water, and that biodegradation mainly occurred at the interfaces. This is likely attributed to the increased solubility of phenanthrene in the presence of EPS polysaccharides and proteins [133]. Additionally, it is noteworthy that in the presence of hydrocarbons, the produced bio emulsifier exhibited a higher content of uronic acid, acetyl, and sulfate groups compared to the control containing glucose [129]. GRSP was shown to interact with phenanthrene in a size-dependent manner, where a fraction containing proteins larger than 10 kD molecular weight exhibited stronger interactions. GRSP interacted with phenanthrene mostly through hydrophobic, NH-π, and hydrogen bonds [38].

4.3 Environmental and microbial factors affecting exopolymer-based bioremediation

Environmental factors profoundly influence the effectiveness and outcomes of bioremediation processes because both production and molecular characteristics of microbial EPS can be influenced. Variables like, pH, temperature, moisture levels, salinity, and the chemical makeup of heavy metals wield considerable influence EPS production by microorganisms [56], [57]. Soil type influences the macromolecular distribution and monosaccharide composition of the EPS-polysaccharide in induced biocrusts [134]. Soil characteristics and the specific region within the soil, such as the topsoil, play a critical role in EPS biosynthesis and molecular characteristics through its influence bacterial populations and the composition of functional genes [26], [50], [53], [64], [65].

Soil microbial EPS production and structural characteristics can also be modulated by stress conditions as well as the addition of various supplements. For example, a soil microcosm experiment showed that the production and composition of EPS *Pseudomonas putida* GAP-P45 were modulated under stress conditions. Rhamnose was reported to be the major sugar under drought, osmotic, and thermal stress. Inoculation with this strain resulted in more soil aggregation and aggregate stability under different stress conditions [105]. Properties of EPS by soil microbial community were influenced by substrate type added to experimental soil. Chitin supplementation produced EPS with better water retention in soil than a soluble carbon substrate, N-acetylglucosamine [135]. Inorganic substances were also shown to modulate microbial EPS production. ZnO nanoparticles enhanced EPS production by 596.1% in liquid culture of *B. subtilis* strain JCT1. The produced EPS was shown to increase soil aggregation, moisture retention, and soil organic carbon [136]. In another research, addition of clay increased EPS production in soil more than labile substrates did (starch and cellulose) [67].

In addition to environmental factors, microbial factors also play important roles in the successful application of EPS. These factors encompass microbial community composition, bacterial metabolic capability, biofilm formation, competition, and cooperation between indigenous and exogenous bacteria [57]. Microbial competition and cooperation within microbial communities are forces that can significantly impact bioremediation. The balance between these interactions can either enhance or hinder the effectiveness of pollutant degradation [69]. Competition can occur between different species of bacteria or between bacteria and fungi, often involving the utilization of limited nutrients available. In some cases, microbial species release metabolites that inhibit the growth of others, affecting the overall bioremediation process [70]. The role of indigenous is also crucial in bioremediation. Indigenous bacteria are well adapted to the local environment [57], [69], [71], thus understanding the stability and physiological adaptations of these microorganisms is essential for successful bioremediation.

5. Current challenges and future perspectives

As detailed in previous sections, currently available studies demonstrate the positive impact of EPS-producing strains on soil physical, biological, and chemical properties, and on the immobilization and degradation

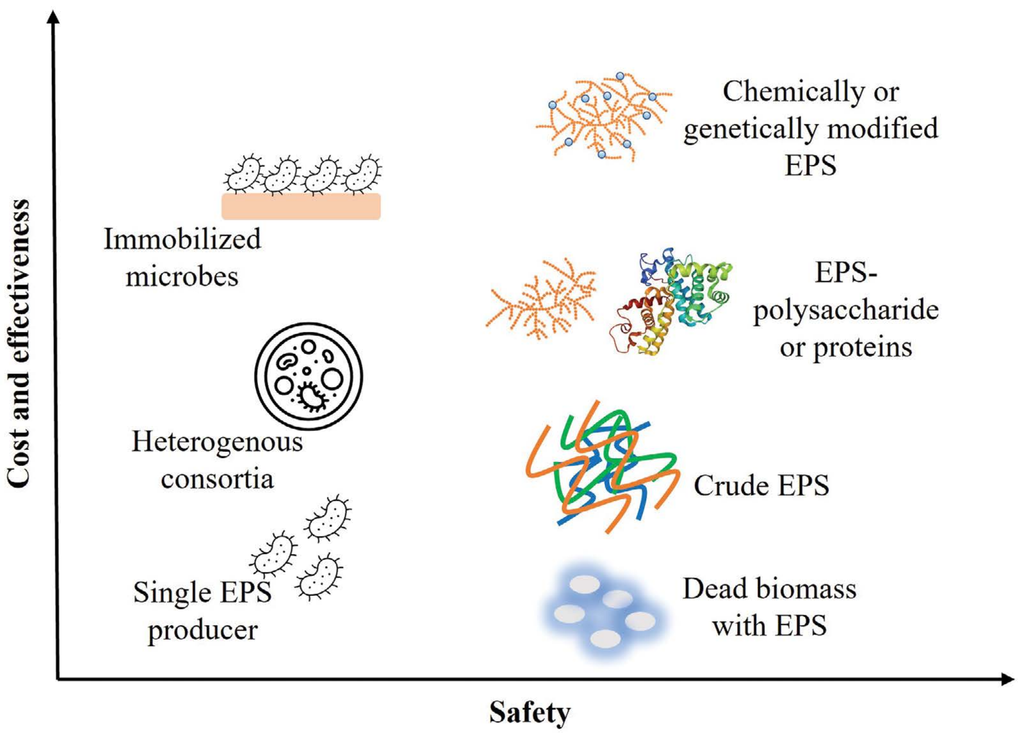


Fig. 3. A simplified illustration of different strategies for EPS-based soil restoration and remediation, with respect to their effectiveness, cost, and safety (please note that this figure is not based on actual calculation)

of soil pollutants. However, several challenges must be confronted to enhance their effectiveness and facilitate the large-scale use of microbial EPS for soil restoration and remediation. These challenges can be categorized into three primary areas: the effectiveness and safety of directly inoculating EPS-producing microbes into the soil, insufficient effort on aligning the molecular characteristics of EPS with the specific application purposes, and limited information regarding the characterization of soil-extracted EPS. In the following discussion, we attempt to address the challenges and propose potential directions for future research.

5.1 Effectiveness and safety of direct inoculation of EPS-producing microorganisms

The effectiveness of direct inoculation of EPS-producing microorganisms into natural soils remains uncertain with respect to their survival and EPS production in the natural environment [10]. Recent trends in this field have concentrated on strategies to address issues related to the survival of inoculated microorganisms to improve the effectiveness of soil restoration and remediation. One such approach involves harnessing desert microorganisms for dryland soil restoration, given their inherent advantages adapted for xeric conditions. An alternative method involves applying native microorganisms isolated from the vicinity of the affected site. This approach circumvents challenges associated with competing against the native microbiota, which has undergone extensive selection by environmental conditions [71]. Another approach is the application of mixed microorganisms or heterogeneous microbial consortia [118], which could result in better effectiveness and survival compared to the inoculation of single microorganisms or homogenous microbial cultures. Additionally, immobilized microorganisms could offer better effectiveness as they have superior biological reaction kinetics and improved biosorption [118].

Another concern when introducing EPS-producing microorganisms into natural soil is the lack of a comprehensive understanding of how indigenous microbial communities respond to external perturbations, such as additive manipulations. Introducing microorganisms into natural environments poses the potential risks of altering the community structure of indigenous microorganisms [71]. To mitigate the safety concern associated with using living cells, the application of dead cell biomass, including its EPS can be considered [118]. Moreover, extraction and application of crude EPS, as well as EPS-polysaccharides and EPS-proteins, can also help mitigate the risks, although downstream processing may entail additional costs related to equipment and labor. However, these costs remain more economical compared to the production costs associated with synthetic polymers [137]. These expenses can be reduced by enhancing EPS production efficiency through various means. One approach to reducing the production cost of microbial EPS involves optimizing cultivation time and conditions as well as utilizing organic waste for cultivation to improve EPS yield [138]–[140]. Metabolic engineering is another potential strategy to enhance EPS-polysaccharide production by overexpressing one or more genes involved in biosynthesis [20]. **Fig. 3** illustrates how different EPS-based techniques can vary depending on their potential effectiveness, cost, and safety.

5.2 Structure and activity relationship of microbial EPS

It is widely accepted that the composition and molecular structure of exopolymers greatly influence their functionality. However, limited efforts are made to establish connections between the molecular features of EPS for the application in soil. Concentration is also an important factor to consider before applying EPS in the field. For example, xanthan can be used to enhance soil water holding capacity and suppress dust formation. However, it may also lead to soil compaction, which can have adverse effects on plant growth and seed germination. The use of high concentrations of xanthan gum can result in clogging of soil pores [56]. Hence, it is crucial to carefully investigate EPS's appropriate molecular features and concentration before applying them in soil restoration and remediation efforts.

Tailoring the molecular structure of microbial EPS to align with its function can significantly enhance the effectiveness of soil restoration or remediation efforts. In addition to exploring the microbial EPS that meets the purpose of a specific application, it is possible to modify the structure of EPS constituents, particularly polysaccharides, to improve their function and reduce the required amount of EPS for a given application [137]. Modifications such as acetylation, methylation, and phosphorylation of functional groups within EPS, can modify their interaction with various molecules [118], thereby influencing their suitability for soil restoration and bioremediation purposes. Chemical methods can be used to modify structures of polysaccharides. Moreover, genetic engineering has been shown to be a valuable approach in this regard, with successful instances where researchers used genetic engineering approaches to modify or enhance the properties of exopolysaccharides. For instance, xanthan was modified to exhibit different acetylation, pyruvylation, and side chain differences. In another case, acetan from *Acetobacter xylimum* was modified through mutagenesis for higher viscosity [141].

5.3 Limitation on the characterizing EPS of soil microbial community

While analytical methods for determining the structure and composition of polysaccharides extracted from microbial strains are well established, the compositional and structural analysis of EPS within soil microbial communities remains largely unexplored due to its complexity. It is essential to develop feasible approaches for characterizing EPS of soil microbial communities (i.e. soil extracted EPS) better understand its distinguishing characteristics in healthy versus degraded soils. Furthermore, this will allow for evaluating how exogenous EPS interacts with soil components during EPS-based soil restoration and remediation efforts.

Currently available studies predominantly focus on quantifying major EPS components, particularly EPS-polysaccharides and EPS-protein. Conventional methods such as NMR and mass spectrometry for polysaccharide or protein analysis will require extensive cleaning and separation steps to draw meaningful conclusions. Thus, researchers seek more feasible approaches to assess the overall compositional diversity of EPS extracted from various soils. Recent studies have employed three-dimensional fluorescence spectra to compare the overall composition of EPS extracted from suspended sludge and biofilm [142], as well as water-extractable organic matter in soil [143] and GRSP [35]. This approach can be used to compare compositional features of EPS extracted from different soils and to observe changes during soil restoration and remediation.

Culture-independent approaches can be valuable for exploring the diversity of EPS-producing communities in different soil. In a recent metagenomics study, it was found that *Betaproteobacteria* were the major group containing the genes involved in the biosynthesis of exopolysaccharides and lipopolysaccharides in the bulk soil, whereas in biocrust, the major potential producers of adhesive polysaccharides were *Alphaproteobacteria*, which could be either *Cyanobacteria* or *Chloroflexi*, along with *Acidobacteria* [144]. Moreover, metagenomics can assist in identifying the responsible genes and pathways for novel or significant exopolymers.

6. Conclusion

In conclusion, land degradation is not only affected by climate change but also contributes to it by releasing increased greenhouse gases. Given that soil contains the largest terrestrial carbon stock [145], it is imperative that we work towards maintaining soil carbon stability. We believe that microbial EPS can play a crucial role in protecting soil organic carbon in managed and restored lands and help bolster soil carbon sequestration efforts. Concurrently, microbial EPS can serve as a valuable tool in stabilizing pollutants in soil, thereby minimizing their leakage into groundwater and uptake by crops. Thus, microbial EPS-based technologies hold great potential as an eco-friendly, highly sustainable, and cost-effective method for soil restoration and bioremediation.

Acknowledgments

This work was supported by ANSO collaborative research grant (ANSO-CR-PP-2021-09).

References

[1] IPCC, "Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems" [P.R. Shukla, *et al.*, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019. 896 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157988.

[2] K. Timmis *et al.*, "The urgent need for microbiology literacy in society," *Environmental Microbiology*, vol. 21, no. 5. Blackwell Publishing Ltd, pp. 1513–1528, May 01, 2019. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14611.

[3] A. Lehmann, W. Zheng, and M. C. Rillig, "Soil biota contributions to soil aggregation," *Nat Ecol Evol*, vol. 1, no. 12, pp. 1828–1835, Dec. 2017, https://doi.org/10.1038/s41559-017-0344-y.

[4] S. Rebello, V. K. Nathan, R. Sindhu, P. Binod, M. K. Awasthi, and A. Pandey, "Bioengineered microbes for soil health restoration: present status and future," *Bioengineered*, vol. 12, no. 2. Taylor and Francis Ltd., pp. 12839–12853, 2021. https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2004645.

[5] N. Rodríguez Eugenio, M. J. McLaughlin, and D. J. Pennock, "*Soil pollution: a hidden reality*" 2018, Rome. FAO,142 pp.

[6] J. Pichtel, "Biofilms for remediation of xenobiotic hydrocarbons -a technical review," in *Biofilms in Plant and Soil Health*, F. M. Husain and I. Ahmad, Eds., Wiley, 2017, pp. 357–385. https://doi.org/10.1002/9781119256329

[7] S. Das and H. R. Dash, "Microbial bioremediation: a potential tool for rRestoration of contaminated areas," in *Microbial Biodegradation and Bioremediation*, Elsevier Inc., 2014, pp. 2–21. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00001-7.

[8] J. K. Jansson and K. S. Hofmockel, "Soil microbiomes and climate change," *Nat Rev Microbiol*, vol. 18, Nature Publishing Group, pp. 34–46, 2020. https://doi.org/10.1038/s41579.

[9] M. L. Saccá, A. Barra Caracciolo, M. Di Lenola, and P. Grenni, "Ecosystem services provided by soil microorganisms," in *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience*, Springer International Publishing, 2017, pp. 9–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2.

[10] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, "Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, no. JUL. Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[11] E. Rabot, M. Wiesmeier, S. Schlüter, and H. J. Vogel, "Soil structure as an indicator of soil functions: A review," *Geoderma*, vol. 314. Elsevier B.V., pp. 122–137, Mar. 15, 2018. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

[12] K. Mehta, A. Shukla, and M. Saraf, "Articulating the exuberant intricacies of bacterial exopolysaccharides to purge environmental pollutants," *Heliyon*, vol. 7, no. 11. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08446.

[13] M. C. S. Barcelos, K. A. C. Vespermann, F. M. Pelissari, and G. Molina, "Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides," *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 60, no. 9. Taylor and Francis Inc., pp. 1475–1495, May 14, 2020. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1575791.

[14] L. Huang *et al.*, "A Review of the Role of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Wastewater Treatment Systems," *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19. MDPI, Oct. 01, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph191912191.

[15] F. Freitas, V. D. Alves, and M. A. M. Reis, "Advances in bacterial exopolysaccharides: From production to biotechnological applications," *Trends in Biotechnology*, vol. 29, no. 8. pp. 388–398, Aug. 2011. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.03.008.

[16] T. T. More, J. S. S. Yadav, S. Yan, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, "Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications," *Journal of Environmental Management*, vol. 144. Academic Press, pp. 1–25, Nov. 01, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010.

[17] C. Núñez, L. López-Pliego, C. L. Ahumada-Manuel, and M. Castañeda, "Genetic regulation of alginate production in Azotobacter vinelandii a bacterium of biotechnological interest: a mini-review," *Frontiers in Microbiology*, vol. 13. Frontiers Media S.A., Mar. 23, 2022. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845473.

[18] F. Donot, A. Fontana, J. C. Baccou, and S. Schorr-Galindo, "Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction," *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, no. 2. Elsevier Ltd, pp. 951–962, Jan. 15, 2012. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.083.

[19] S. Acosta-jurado, F. Fuentes-romero, J. E. Ruiz-sainz, M. Janczarek, and J. M. Vinardell, "Rhizobial exopolysaccharides: Genetic regulation of their synthesis and relevance in symbiosis with legumes," *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 12, Jun. 2021, https://doi.org/10.3390/ijms22126233.

[20] S. B. Pereira *et al.*, "Strategies to obtain designer polymers based on cyanobacterial extracellular polymeric substances (EPS)," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 22. MDPI AG, Nov. 02, 2019. https://doi.org/10.3390/ijms20225693.

[21] Iqbal Ahmad, Mohammad Shavez Khan, Mohd Musheer Altaf, Faizan Abul Qais, Firoz Ahmad Ansari, and Kendra P. Rumbaugh, "Biofilms: An Overview of Their Significance in Plant and Soil Health," in *Biofilms in Plant and Soil Health*, F. M. Husain and I. Ahmad, Eds., Wiley, 2017. pp. 1–25, https://doi.org/10.1002/9781119256329.

[22] J. Wingender, Thomas, R. Neu, and Hans-Curt Flemming, "What are Bacterial Extracellular Polymeric Substances," in *Microbial Extracellular Polymeric Substances*, J. Wingender *et al*., (eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. pp. 1–19

[23] P. Di Martino, "Extracellular polymeric substances, a key element in understanding biofilm phenotype," *AIMS Microbiol*, vol. 4, no. 2, pp. 274–288, 2018, https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.2.274.

[24] Y. Wu *et al.*, "Soil biofilm formation enhances microbial community diversity and metabolic activity," *Environ Int*, vol. 132, Nov. 2019, https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105116.

[25] Y. Jiao *et al.*, "Characterization of extracellular polymeric substances from acidophilic microbial biofilms," *Appl Environ Microbiol*, vol. 76, no. 9, pp. 2916–2922, May 2010, https://doi.org/10.1128/AEM.02289-09.

[26] A. Pandit, A. Adholeya, D. Cahill, L. Brau, and M. Kochar, "Microbial biofilms in nature: unlocking their potential for agricultural applications," *Journal of Applied Microbiology*, vol. 129, no. 2. John Wiley and Sons Inc, pp. 199–211, Aug. 01, 2020. https://doi.org/10.1111/jam.14609.

[27] H. Yildiz and N. Karatas, "Microbial exopolysaccharides: Resources and bioactive properties," *Process Biochemistry*, vol. 72. Elsevier Ltd, pp. 41–46, Sep. 01, 2018. https://doi.org/10.1016/j.procbio.2018.06.009.

[28] M. Irfan, M. Zaheer, S. Shahid Imran Bukhari, M. Hassan Abbasi, and S. Javed, "Bacterial Exopolysaccharides: sources, production and applications." Biologia (Pakistan), ISSN 2313-206X (On-Line), vol. 65, 2019.

[29] A. Mishra and B. Jha, "Microbial exopolysaccharides," in *The Prokaryotes: Applied Bacteriology and Biotechnology*, vol. 9783642313318, Springer-Verlag

Berlin Heidelberg, 2013, pp. 179–192. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_25.

[30] S. Rana and L. S. B. Upadhyay, "Microbial exopolysaccharides: Synthesis pathways, types and their commercial applications," *Int J Biol Macromol*, vol. 157, pp. 577–583, Aug. 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.084.

[31] K. V. Madhuri and K. Vidya Prabhakar, "Microbial exopolysaccharides: Biosynthesis and potential applications," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 30, no. 3, pp. 1401–*1410, 2014,* https://doi.org/10.13005/ojc/300362.

[32] U. Halder, K. Mazumder, K. J. Kumar, and R. Bandopadhyay, "Structural insight into a glucomannan-type extracellular polysaccharide produced by a marine Bacillus altitudinis SORB11 from Southern Ocean," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, https://doi.org/10.1038/s41598-022-20822-3.

[33] M. Tartaglia, F. Bastida, R. Sciarrillo, and C. Guarino, "Soil metaproteomics for the study of the relationships between microorganisms and plants: A review of extraction protocols and ecological insights," *Int J Mol Sci*, vol. 21, no. 22, pp. 1–20, Nov. 2020, https://doi.org/10.3390/ijms21228455.

[34] Y. Li, J. Xu, J. Hu, T. Zhang, X. Wu, and Y. Yang, "Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin play a crucial role in soil aggregate stability in Pb-contaminated soil," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 9, May 2022, https://doi.org/10.3390/ijerph19095029.

[35] Q. Wang *et al.*, "Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in poplar plantations in northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014, https://doi.org/10.1155/2014/160403.

[36] X. N. Guo, Y. Hao, X. L. Wu, X. Chen, and C. Y. Liu, "Exogenous easily extractable glomalin-related soil protein stimulates plant growth by regulating tonoplast intrinsic protein expression in lemon," *Plants*, vol. 12, no. 16, Aug. 2023, https://doi.org/10.3390/plants12162955.

[37] W. Wang, Z. Zhong, Q. Wang, H. Wang, Y. Fu, and X. He, "Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, https://doi.org/10.1038/s41598-017-12731-7.

[38] X. Zhou *et al.*, "Characterization of different molecular size fractions of glomalin-related soil protein from forest soil and their interaction with phenanthrene," *Front Microbiol*, vol. 12, Feb. 2022, https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.822831.

[39] M. A. Redmile-Gordon, P. C. Brookes, R. P. Evershed, K. W. T. Goulding, and P. R. Hirsch, "Measuring the soil-microbial interface: Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from soil biofilms," *Soil Biol Biochem*, vol. 72, pp. 163–171, May 2014, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.025.

[40] A. W. Gillespie *et al.*, "Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials," *Soil Biol Biochem*, vol. 43, no. 4, pp. 766–777, Apr. 2011, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.010.

[41] M. Redmile-Gordon and L. Chen, "Zinc toxicity stimulates microbial production of extracellular polymers in a copiotrophic acid soil," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 119, pp. 413–418, Apr. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.004.

[42] M. Redmile-Gordon, A. S. Gregory, R. P. White, and C. W. Watts, "Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use," *Geoderma*, vol. 363, Apr. 2020, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114143.

[43] M. A. Redmile-Gordon, R. P. Evershed, P. R. Hirsch, R. P. White, and K. W. T. Goulding, "Soil organic matter and the extracellular microbial matrix show contrasting responses to C and N availability," *Soil Biol Biochem*, vol. 88, pp. 257–267, Sep. 2015, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.025.

[44] S. Wang *et al.*, "Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from red soils (Ultisols)," *Soil Biol Biochem*, vol. 135, pp. 283–285, Aug. 2019, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.014.

[45] I. Ahmad, M. S. Khan, M. M. Altaf, F. A. Qais, F. A. Ansari, and K. Rumbaugh, "Biofilms: An Overview of Their Significance in Plant and Soil Health," in *Biofilms in Plant and Soil Health*, I. Ahmad and F. M. Husain, Eds., 2017, pp. 1–25.

[46] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, "Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[47] M. Zhang, P. Cai, Y. Wu, C. Gao, J. Liu, and Q. Huang, "Bacterial Extracellular Polymeric Substances: From the Perspective of Soil Ecological Functions," *Acta Pedologica Sinica*, vol. 59, no. 2, pp. 308–323, 2022, https://doi.org/10.11766/trxb202107310271.

[48] F. Salimi and P. Farrokh, "Recent advances in the biological activities of microbial exopolysaccharides," *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, vol. 39, no. 8. Springer Science and Business Media B.V., Aug. 01, 2023. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03660-x.

[49] D. M. Mager and A. D. Thomas, "Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes," *J Arid Environ*, vol. 75, no. 2, pp. 91–97, Feb. 2011, https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2010.10.001.

[50] M. D. V. B. Figueiredo, A. Bonifacio, A. C. Rodrigues, F. F. de Araujo, and N. P. Stamford, "Beneficial microorganisms: Current challenge to increase crop performance," in *Bioformulations: For Sustainable Agriculture*, Springer International Publishing, 2016, pp. 53–70. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_3.

[51] M. Albareda, D. N. Rodríguez-Navarro, M. Camacho, and F. J. Temprano, "Alternatives to peat as a carrier for rhizobia inoculants: Solid and liquid formulations," *Soil Biol Biochem*, vol. 40, no. 11, pp. 2771–2779, Nov. 2008, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.021.

[52] K. Mehta, A. Shukla, and M. Saraf, "Articulating the exuberant intricacies of bacterial exopolysaccharides to purge environmental pollutants," *Heliyon*, vol. 7, no. 11. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08446.

[53] I. Saha, S. Datta, and D. Biswas, "Exploring the role of bacterial extracellular polymeric substances for sustainable development in agriculture," *Current Microbiology*, vol. 77, no. 11. Springer, pp. 3224–3239, Nov. 01, 2020. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02169-y.

[54] T. Siddharth, P. Sridhar, V. Vinila, and R. D. Tyagi, "Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 287. Academic Press, Jun. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112307.

[55] K. Velmourougane, S. Thapa, and R. Prasanna, "Prospecting microbial biofilms as climate smart strategies for improving plant and soil health: A review," *Pedosphere*, vol. 33, no. 1, pp. 129–152, Feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.037.

[56] T. Berninger, N. Dietz, and Ó. González López, "Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics," *Microbial Biotechnology*. John Wiley and Sons Ltd, 2021. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867.

[57] C. Chenu and A. M. Jaunet, "Cryo-scanning electron microscopy of microbial extracellular polysaccharides and their association with minerals," OFAMS, Inc, 1992.

[58] N. Amellal, F. Bartoli, G. Villemin, A. Talouizte, and T. Heulin, "Effects of inoculation of EPS-producing Pantoea agglomerans on wheat rhizosphere aggregation," 1999.

[59] P. Benard *et al.*, "Microhydrological Niches in Soils: How mucilage and eps alter the biophysical properties of the rhizosphere and other biological hotspots," *Vadose Zone Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2019, https://doi.org/10.2136/vzj2018.12.0211.

[60] Y. Sher *et al.*, "Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by switchgrass (Panicum virgatum) root biomass and soil water potential," *Soil Biol Biochem*, vol. 143, Apr. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107742.

[61] J. C. Blankinship, S. J. Fonte, J. Six, and J. P. Schimel, "Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem," *Geoderma*, vol. 272, pp. 39–50, Jun. 2016, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.008.

[62] Y. Wu *et al.*, "Soil biofilm formation enhances microbial community diversity and metabolic activity," *Environ Int*, vol. 132, Nov. 2019, https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105116.

[63] C. Cheng, W. Shang-Guan, L. He, and X. Sheng, "Effect of exopolysaccharide-producing bacteria on water-stable macro-aggregate formation in soil," *Geomicrobiol J*, vol. 37, no. 8, pp. 738–745, Jul. 2020, https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1764677.

[64] P. Deka *et al.*, "Bacterial exopolysaccharide promotes acid tolerance in Bacillus amyloliquefaciens and improves soil aggregation," *Mol Biol Rep*, vol. 46, no. 1, pp. 1079–1091, Feb. 2019, https://doi.org/10.1007/s11033-018-4566-0.

[65] A. L. Godinho and S. Bhosle, "Sand aggregation by exopolysaccharide-producing Microbacterium arborescens - AGSB," *Curr Microbiol*, vol. 58, no. 6, pp. 616–621, Jun. 2009, https://doi.org/10.1007/s00284-009-9400-4.

[66] R. Nisha, B. Kiran, A. Kaushik, and C. P. Kaushik, "Bioremediation of salt affected soils using cyanobacteria in terms of physical structure, nutrient status and microbial activity," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 571–580, Mar. 2018, https://doi.org/10.1007/s13762-017-1419-7.

[67] F. K. Olagoke *et al.*, "Importance of substrate quality and clay content on microbial extracellular polymeric substances production and aggregate stability in soils," *Biol Fertil Soils*, vol. 58, no. 4, pp. 435–457, May 2022, https://doi.org/10.1007/s00374-022-01632-1.

[68] C. Xu, S. Zhang, C. ying Chuang, E. J. Miller, K. A. Schwehr, and P. H. Santschi, "Chemical composition and relative hydrophobicity of microbial exopolymeric substances (EPS) isolated by anion exchange chromatography and their actinide-binding affinities," *Mar Chem*, vol. 126, no. 1–4, pp. 27–36, Sep. 2011, https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.03.004.

[69] S. Zhang *et al.*, "Enhancing soil aggregation and acetamiprid adsorption by ecofriendly polysaccharides hydrogel based on Ca2+- amphiphilic sodium alginate," *J Environ Sci (China)*, vol. 113, pp. 55–63, Mar. 2022, https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.042.

[70] D. M. Mager and A. D. Thomas, "Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes," *Journal of Arid Environments*, vol. 75, no. 2. pp. 91–97, Feb. 2011. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001.

[71] R. Marasco, J. B. Ramond, M. W. Van Goethem, F. Rossi, and D. Daffonchio, "Diamonds in the

rough: Dryland microorganisms are ecological engineers to restore degraded land and mitigate desertification," *Microb Biotechnol*, 2023, https://doi.org/10.1111/1751-7915.14216.

[72] I. Saha, S. Datta, and D. Biswas, "Exploring the role of bacterial extracellular polymeric substances for sustainable development in agriculture," *Current Microbiology*, vol. 77, no. 11. Springer, pp. 3224–3239, Nov. 01, 2020. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02169-y.

[73] T. Siddharth, P. Sridhar, V. Vinila, and R. D. Tyagi, "Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 287. Academic Press, Jun. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112307.

[74] S.-M. Ham, I. Chang, D.-H. Noh, T.-H. Kwon, and B. Muhunthan, "Improvement of Surface Erosion Resistance of Sand by Microbial Biopolymer Formation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 7, Jul. 2018, https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001900.

[75] G. Colica, H. Li, F. Rossi, D. Li, Y. Liu, and R. De Philippis, "Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils," *Soil Biol Biochem*, vol. 68, pp. 62–70, Jan. 2014, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.017.

[76] N. Wu, H. X. Pan, D. Qiu, and Y. M. Zhang, "Feasibility of EPS-producing bacterial inoculation to speed up the sand aggregation in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China," *J Basic Microbiol*, vol. 54, no. 12, pp. 1378–1386, Dec. 2014, https://doi.org/10.1002/jobm.201400355.

[77] M. Li, Y. Zhao, S. Bian, J. Qiao, X. Hu, and S. Yu, "A green, environment-friendly, high-consolidation-strength composite dust suppressant derived from xanthan gum", https://doi.org/10.1007/s11356-021-16258-3/Published.

[78] T. Lee *et al.*, "Environmentally Friendly Methylcellulose-Based Binders for Active and Passive Dust Control," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 12, no. 45, pp. 50860–50869, Nov. 2020, https://doi.org/10.1021/acsami.0c15249.

[79] J. Yan *et al.*, "Synthesis and performance measurement of a modified polymer dust suppressant," *Advanced Powder Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 792–803, Feb. 2020, https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.11.033.

[80] J. L. Sieger, B. G. Lottermoser, and J. Freer, "Effectiveness of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Results from Wind Tunnel and Penetrometer Testing," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2023, https://doi.org/10.3390/app13074158.

[81] H. Fatehi, D. E. L. Ong, J. Yu, and I. Chang, "The Effects of Particle Size Distribution and Moisture Variation on Mechanical Strength of Biopolymer-Treated Soil," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, https://doi.org/10.3390/polym15061549.

[82] J. L. Sieger, B. G. Lottermoser, and J. Freer, "Effectiveness of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Large-Scale Field Trials," *Mining*, vol. 3, no. 3, pp. 428–462, Jul. 2023, https://doi.org/10.3390/mining3030026.

[83] M. Dagliya, N. Satyam, and A. Garg, "Biopolymer based stabilization of Indian desert soil against wind-induced erosion," *Acta Geophysica*, vol. 71, no. 1, pp. 503–516, Feb. 2023, https://doi.org/10.1007/s11600-022-00905-5.

[84] T. T. More, J. S. S. Yadav, S. Yan, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, "Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications," *Journal of Environmental Management*, vol. 144. Academic Press, pp. 1–25, Nov. 01, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010.

[85] S. Ghatak, S. Manna, and D. Roy, "First-Order Assessment of the Influence of Three EPS and Calcite-Producing Microbes Isolated from a Cemented Sand Site on Soil Shear Strength," *Geomicrobiol J*, vol. 32, no. 9, pp. 761–770, Oct. 2015, https://doi.org/10.1080/01490451.2014.981646.

[86] S. H. Sadeghi, A. Jafarpoor, M. Homaee, and B. Zarei Darki, "Changeability of rill erosion properties due to microorganism inoculation," *Catena (Amst)*, vol. 223, Apr. 2023, https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106956.

[87] V. K. Shanmugam and V. R. Rangamaran, "Microbial Calcification: An insight into carbonate precipitation and its emerging influence in diverse applications," *Am. J. PharmTech Res*, vol. 8, no. 4, 2018, [Online]. Available: www.ajptr.com

[88] E. B. Roberson' And and M. K. Firestone2, "Relationship between desiccation and exopolysaccharide production in a soil Pseudomonas sp," 1992. [Online]. Available: https://journals.asm.org/journal/aem

[89] W. S. Chang, M. Van De Mortel, L. Nielsen, G. N. De Guzman, X. Li, and L. J. Halverson, "Alginate production by Pseudomonas putida creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water-limiting conditions," in *Journal of Bacteriology*, Nov. 2007, pp. 8290–8299. https://doi.org/10.1128/JB.00727-07.

[90] R. Tecon and D. Or, "Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil," *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 41, no. 5. Oxford University Press, pp. 599–623, Sep. 01, 2017. https://doi.org/10.1093/femsre/fux039.

[91] P. Benard, S. Bickel, A. Kaestner, P. Lehmann, and A. Carminati, "Extracellular polymeric substances

from soil-grown bacteria delay evaporative drying," *Adv Water Resour*, vol. 172, Feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104364.

[92] D. Or, S. Phutane, and A. Dechesne, "Extracellular polymeric substances affecting pore-scale hydrologic conditions for bacterial activity in unsaturated soils," *Vadose Zone Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 298–305, May 2007, https://doi.org/10.2136/vzj2006.0080.

[93] Y. S. Guo *et al.*, "Bacterial extracellular polymeric substances amplify water content variability at the pore scale," *Front Environ Sci*, vol. 6, no. SEP, Sep. 2018, https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00093.

[94] M. Brax, C. Buchmann, and G. E. Schaumann, "Review article biohydrogel induced soil-water interactions: How to untangle the gel effect? A review," *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, vol. 180, no. 2. Wiley-VCH Verlag, pp. 121–141, Apr. 01, 2017. https://doi.org/10.1002/jpln.201600453.

[95] H. Zhang, J. Bian, H. Wan, N. Wei, and Y. Ma, "Soil–water characteristic curves of extracellular polymeric substances-affected soils and sensitivity analyses of correlated parameters," *Water Sci Technol Water Supply*, vol. 21, no. 3, pp. 1323–1333, May 2021, https://doi.org/10.2166/ws.2020.377.

[96] R. Rosenzweig, U. Shavit, and A. Furman, "Soil phvsics water retention curves of biofilm-affected soils using xanthan as an analogue", https://doi.org/10.2136/sssai.

[97] G. E. Schaumann, B. Braun, D. Kirchner, W. Rotard, U. Szewzyk, and E. Grohmann, "Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples," *Hydrol Process*, vol. 21, no. 17, pp. 2276–2284, Aug. 2007, https://doi.org/10.1002/hyp.6746.

[98] P. Cai *et al.*, "Soil biofilms: microbial interactions, challenges, and advanced techniques for ex-situ characterization," *Soil Ecology Letters*, vol. 1, no. 3–4. Springer Nature, pp. 85–93, Dec. 01, 2019. https://doi.org/10.1007/s42832-019-0017-7.

[99] J. H. T. Zethof *et al.*, "Prokaryotic community composition and extracellular polymeric substances affect soil microaggregation in carbonate containing semiarid grasslands," *Front Environ Sci*, vol. 8, Jun. 2020, https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00051.

[100] R. Cao *et al.*, "Exopolysaccharide-producing bacteria enhanced Pb immobilization and influenced the microbiome composition in rhizosphere soil of pakchoi (Brassica chinensis L.)," *Front Microbiol*, vol. 14, 2023, https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1117312.

[101] G. Z. De Caire, M. S. De Cano, R. M. Palma, and C. Z. De Mulé, "Changes in soil enzyme activities following additions of cyanobacterial biomass and exopolysaccharide," *Soil Biol and Biochem*, vol. 32, issue 13, pp. 1985–1987. 2000. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00174-7.

[102] A. Karimi, A. Tahmourespour, and M. Hoodaji, "The formation of biocrust and improvement of soil properties by the exopolysaccharide-producing cyanobacterium: a biogeotechnological study," *Biomass Convers Biorefin*, 2022, https://doi.org/10.1007/s13399-022-02336-0.

[103] R. J. L. Morcillo and M. Manzanera, "The effects of plant-associated bacterial exopolysaccharides on plant abiotic stress tolerance," *Metabolites*, vol. 11, no. 6. MDPI AG, 2021. https://doi.org/10.3390/metabo11060337.

[104] H. Naseem, M. Ahsan, M. A. Shahid, and N. Khan, "Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance," *Journal of Basic Microbiology*, vol. 58, no. 12. Wiley-VCH Verlag, pp. 1009–1022, Dec. 01, 2018. https://doi.org/10.1002/jobm.201800309.

[105] V. Sandhya and S. Z. Ali, "The production of exopolysaccharide by Pseudomonas putida GAP-P45 under various abiotic stress conditions and its role in soil aggregation," *Microbiology (Russian Federation)*, vol. 84, no. 4, pp. 512–519, Jul. 2015, https://doi.org/10.1134/S0026261715040153.

[106] D. Ghosh, A. Gupta, and S. Mohapatra, "A comparative analysis of exopolysaccharide and phytohormone secretions by four drought-tolerant rhizobacterial strains and their impact on osmotic-stress mitigation in Arabidopsis thaliana," *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 35, no. 6, Jun. 2019, https://doi.org/10.1007/s11274-019-2659-0.

[107] J. Kaur *et al.*, "An exopolysaccharide-producing novel Agrobacterium pusense strain JAS1 isolated from snake plant enhances plant growth and soil water retention," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, https://doi.org/10.1038/s41598-022-25225-y.

[108] T. Fatima and N. K. Arora, "Pseudomonas entomophila PE3 and its exopolysaccharides as biostimulants for enhancing growth, yield and tolerance responses of sunflower under saline conditions," *Microbiol Res*, vol. 244, Mar. 2021, https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126671.

[109] T. Gu *et al.*, "Microbial extracellular polymeric substances alleviate cadmium toxicity in rice (Oryza sativa L.) by regulating cadmium uptake, subcellular distribution and triggering the expression of stress-related genes," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 257, Jun. 2023, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114958.

[110] P. S. P. Arachchige *et al.*, "Sub-micron level investigation reveals the inaccessibility of stabilized carbon in soil microaggregates," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, https://doi.org/10.1038/s41598-018-34981-9.

[111] T. L. Swenson *et al.*, "A novel method to evaluate nutrient retention by biological soil crust exopolymeric matrix," *Plant Soil*, vol. 429, no. 1–2, pp. 53–64, Aug. 2018, https://doi.org/10.1007/s11104-017-3537-x.

[112] O. Y. A. Costa, A. Pijl, and E. E. Kuramae, "Dynamics of active potential bacterial and fungal interactions

in the assimilation of acidobacterial EPS in soil," *Soil Biol Biochem*, vol. 148, Sep. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107916.

[113] R. Mikutta, U. Zang, J. Chorover, L. Haumaier, and K. Kalbitz, "Stabilization of extracellular polymeric substances (Bacillus subtilis) by adsorption to and coprecipitation with Al forms," *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 75, no. 11, pp. 3135–3154, Jun. 2011, https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.006.

[114] M. Zhang *et al.*, "Selective retention of extracellular polymeric substances induced by adsorption to and coprecipitation with ferrihydrite," *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 299, pp. 15–34, Apr. 2021, https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.02.015.

[115] Y. Yi, W. Huang, and Y. Ge, "Exopolysaccharide: A novel important factor in the microbial dissolution of tricalcium phosphate," *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 24, no. 7, pp. 1059–1065, Jul. 2008, https://doi.org/10.1007/s11274-007-9575-4.

[116] Y. Wang *et al.*, "Extracellular polymeric substances and biocorrosion/biofouling: recent advances and future perspectives," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 10. MDPI, May 01, 2022. https://doi.org/10.3390/ijms23105566.

[117] R. Breitenbach *et al.*, "Corrosive extracellular polysaccharides of the rock-inhabiting model fungus Knufia petricola," *Extremophiles*, vol. 22, no. 2, pp. 165–175, Mar. 2018, https://doi.org/10.1007/s00792-017-0984-5.

[118] P. Gupta and B. Diwan, "Bacterial exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies," *Biotechnology Reports*, vol. 13. Elsevier B.V., pp. 58–71, Mar. 01, 2017. https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006.

[119] P. M. Joshi and A. A. Juwarkar, "In vivo studies to elucidate the role of extracellular polymeric substances from Azotobacter in immobilization of heavy metals," *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 15, pp. 5884–5889, Aug. 2009, https://doi.org/10.1021/es900063b.

[120] D. Kalita and S. R. Joshi, "Study on bioremediation of lead by exopolysaccharide producing metallophilic bacterium isolated from extreme habitat," *Biotechnology Reports*, vol. 16, pp. 48–57, Dec. 2017, https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.11.003.

[121] A. Tang *et al.*, "Simultaneous leaching of multiple heavy metals from a soil column by extracellular polymeric substances of Aspergillus tubingensis F12," *Chemosphere*, vol. 263, Jan. 2021, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127883.

[122] A. Shukla, P. Parmar, D. Goswami, B. Patel, and M. Saraf, "Exemplifying an archetypal thorium-EPS complexation by novel thoriotolerant Providencia thoriotolerans AM3," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, https://doi.org/10.1038/s41598-021-82863-4.

[123] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, "Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, no. JUL. Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[124] C. Kantar, Z. Cetin, and H. Demiray, "In situ stabilization of chromium (VI) in polluted soils using organic ligands: The role of galacturonic, glucuronic and alginic acids," *J Hazard Mater*, vol. 159, no. 2–3, pp. 287–293, Nov. 2008, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.022.

[125] Y. Chen, M. Wang, X. Zhou, H. Fu, X. Qu, and D. Zhu, "Sorption fractionation of bacterial extracellular polymeric substances (EPS) on mineral surfaces and associated effects on phenanthrene sorption to EPS-mineral complexes," *Chemosphere*, vol. 263, Jan. 2021, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128264.

[126] W. Zeng *et al.*, "Role of extracellular polymeric substance (EPS) in toxicity response of soil bacteria Bacillus sp. S3 to multiple heavy metals," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 43, no. 1, pp. 153–167, Jan. 2020, https://doi.org/10.1007/s00449-019-02213-7.

[127] G. Vinothini, S. Latha, M. Arulmozhi, and D. Dhanasekaran, "Statistical optimization, physio-chemical and bio-functional attributes of a novel exopolysaccharide from probiotic Streptomyces griseorubens GD5," *Int J Biol Macromol*, vol. 134, pp. 575–587, Aug. 2019, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.011.

[128] P. P. Han, Y. Sun, X. Y. Wu, Y. J. Yuan, Y. J. Dai, and S. R. Jia, "Emulsifying, flocculating, and physicochemical properties of exopolysaccharide produced by cyanobacterium Nostoc flagelliforme," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 172, no. 1, pp. 36–49, Jan. 2014, https://doi.org/10.1007/s12010-013-0505-7.

[129] F. Martínez-Checa, F. L. Toledo, K. El Mabrouki, E. Quesada, and C. Calvo, "Characteristics of bioemulsifier V2-7 synthesized in culture media added of hydrocarbons: Chemical composition, emulsifying activity and rheological properties," *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 16, pp. 3130–3135, Nov. 2007, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.026.

[130] C. Jia, P. Li, X. Li, P. Tai, W. Liu, and Z. Gong, "Degradation of pyrene in soils by extracellular polymeric substances (EPS) extracted from liquid cultures," *Process Biochemistry*, vol. 46, no. 8, pp. 1627–1631, Aug. 2011, https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.05.005.

[131] C. Calvo, G. A. Silva-Castro, I. Uad, C. García Fandiño, J. Laguna, and J. González-López, "Efficiency of the EPS emulsifier produced by Ochrobactrum anthropi in different hydrocarbon bioremediation assays," in *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Nov. 2008, pp. 1493–1501. https://doi.org/10.1007/s10295-008-0451-5.

[132] P. J. Yesankar, M. Pal, A. Patil, and A. Qureshi, "Microbial exopolymeric substances and biosurfactants as 'bioavailability enhancers' for polycyclic aromatic hydrocarbons biodegradation," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 5823–5844, May 2023, https://doi.org/10.1007/s13762-022-04068-0.

[133] Y. Zhang *et al.*, "Extracellular polymeric substances enhanced mass transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in the two-liquid-phase system for biodegradation," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 90, no. 3, pp. 1063–1071, May 2011, https://doi.org/10.1007/s00253-011-3134-5.

[134] S. Chamizo, A. Adessi, G. Mugnai, A. Simiani, and R. De Philippis, "Soil type and cyanobacteria species influence the macromolecular and chemical characteristics of the polysaccharidic matrix in induced biocrusts," *Microb Ecol*, vol. 78, no. 2, pp. 482–493, Aug. 2019, https://doi.org/10.1007/s00248-018-1305-y.

[135] A. Bhattacharjee *et al.*, "Soil microbial EPS resiliency is influenced by carbon source accessibility," *Soil Biol Biochem*, vol. 151, Dec. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108037.

[136] R. Raliya *et al.*, "ZnO nanoparticles induced exopolysaccharide production by B. subtilis strain JCT1 for arid soil applications," *Int J Biol Macromol*, vol. 65, pp. 362–368, 2014, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.060.

[137] A. Shukla, K. Mehta, J. Parmar, J. Pandya, and M. Saraf, "Depicting the exemplary knowledge of microbial exopolysaccharides in a nutshell," *European Polymer Journal*, vol. 119. Elsevier Ltd, pp. 298–310, Oct. 01, 2019. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.07.044.

[138] A. Vaishnav, K. Upadhayay, D. Tipre, and S. Dave, "Utilization of mixed fruit waste for exopolysaccharide production by Bacillus species SRA4: medium formulation and its optimization," *3 Biotech*, vol. 10, no. 12, Dec. 2020, https://doi.org/10.1007/s13205-020-02545-2.

[139] V. Ventorino *et al.*, "Bioprospecting of exopolysaccharide-producing bacteria from different natural ecosystems for biopolymer synthesis from vinasse," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 6, no. 1, Dec. 2019, https://doi.org/10.1186/s40538-019-0154-3.

[140] S. V. Patil, R. B. Salunkhe, C. D. Patil, D. M. Patil, and B. K. Salunke, "Bioflocculant exopolysaccharide production by Azotobacter indicus using flower extract of Madhuca latifolia L," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 162, no. 4, pp. 1095–1108, Oct. 2010, https://doi.org/10.1007/s12010-009-8820-8.

[141] A. Kumar, N. Sajna, K. V Swati, and S. Editors, "Polymer and composite materials microbial exopolysaccharides as novel and significant biomaterials." A. Kumar, N. Sajna, K. V Swati, and S. eds. Springer, 2021.

[142] P. Zhang *et al.*, "Composition of EPS fractions from suspended sludge and biofilm and their roles in microbial cell aggregation," *Chemosphere*, vol. 117, no. 1, pp. 59–65, 2014, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.070.

[143] H. Ba-Haddou *et al.*, "Combination of 3D Fluorescence/PARAFAC and UV–Vis Absorption for the Characterization of Agricultural Soils from Morocco," *J Fluoresc*, vol. 32, no. 6, pp. 2141–2149, Nov. 2022, https://doi.org/10.1007/s10895-022-03011-3.

[144] B. Cania *et al.*, "Biological soil crusts from different soil substrates harbor distinct bacterial groups with the potential to produce exopolysaccharides and lipopolysaccharides," *Microb Ecol*, vol. 79, no. 2, pp. 326–341, Feb. 2020, https://doi.org/10.1007/s00248-019-01415-6.

[145] C. Oertel, J. Matschullat, K. Zurba, F. Zimmermann, and S. Erasmi, "Greenhouse gas emissions from soils—A review," *Chemie der Erde*, vol. 76, no. 3. Elsevier GmbH, pp. 327–352, Oct. 01, 2016. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002.

Тойм өгүүлэл

https://doi.org/10.5564/pib.v39i1.3144

PROCEEDINGS OF PIB THE INSTITUTE OF BIOLOGY

Бичил биетний экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашиглах нь: өнөөгийн төлөв байдал, ирээдүйн чиг хандлага

Дашням Пунсалдулам* ба Оргил Анумандал

Монгол Улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухааны академи, Биологийн хүрээлэн, Микробын нийлэгжлийн лаборатори

*Холбоо барих зохиогч: punsaldulam_d@mas.ac.mn, https://orcid.org/0000-0003-1086-397X

Хураангуй. Уур амьсгалын өөрчлөлт болон хүний үйл ажиллагааны нөлөөгөөр явагдаж буй хөрсний доройтол, бохирдол нь дэлхий нийтийн тулгамдсан асуудлууд бөгөөд эдгээрийг хүрээлэн буй орчинд ээлтэй, тогтвортой технологийн тусламжтай шийдвэрлэх шаардлагатай. Бичил биетний экзополимерийг ашиглан хөрсний физик, химин, биологийн шинж чанарыг нь сайжруулах замаар хөрсний эрүүл төлөв байдлыг нэмэгдүүлэх технологийг боловсруулах боломжтой. Бичил биетний экзополимер нь төрөл бүрийн функциональ бүлгийнхээ тусламжтай хөрсний жижиг хэсгүүдийг холбож барьцалдуулан хөрсний агрегацийг нэмэгдүүлж, хөрс бохирдуулагч нэгдлүүдийг идэвхгүй (тогтвортой) болгодог. Ингэснээр хөрсөөр хангагддаг экосистемийн үүргүүд хэвийн үргэлжлэх боломж бүрдэх юм. Бичил биетний экзополимер хөрсний шинж чанарыг сайжруулдаг болохыг баталсан олон судалгаа хийгдсэн боловч тэдгээрийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд өргөн хүрээгээр ашиглахын тулд анхаарах шаардлагатай хэд хэдэн асуудлууд байна. Үүнд: 1. Гаднаас нэмж буй бичил биетэн байгалийн хөрсөнд үр дүнтэй ажиллах эсэх болон тухайн хөрсний хэвийн микробиотад яаж нөлөөлөх талаарх ойлголт хангалтгүй, 2. Хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн ялгаруулж буй эзкополимерийн бүрэлдэхүүн хэсгүүдийг таньж тодорхойлоход хүндрэлтэй, 3. Шинж чанар, эрүүл төлөв байдлын хувьд ялгаатай хөрсөнд эзкополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетний олон янз байдлыг харьцуулсан судалгаа маш бага, 4. Экзополимерийн химийн бүтэц, шинж чанарыг хэрэглэж буй зорилготойгоо уялдуулахад бага анхаарч байна. Бичил биетний экзополимерийг бүрэн ашиглаж хөрсний нөхөн сэргээлтийн үр дүнг нэмэгдүүлэхэд салбар дундын судалгаа чухал байна.

Түлхүүр үгс: хөрсний агрегаци, хөрсний бичил биетний экзополимер, хөрсний биоремедиаци, хөрсний эрүүл төлөв байдал

Хүлээн авсан 2023.10.23; хянан тохиолдуулсан 2023.10.24; зөвшөөрсөн 2023.11.27

1. Оршил

1.1. Хөрсний доройтол болон бохирдлын ойлголт

Газар нь дэмжих, хангах гэх мэт экосистемийн үүргүүдийг гүйцэтгэдэг учраас хүн төрөлхтний аж амьдралын суурь тулгуур болдог [1]. Гэвч, хүний үйл ажиллагаа болон уур амьсгалын өөрчлөлттэй холбоотой газар доройтож, биологийн олон янз байдал алдагдах эрсдэлд хүрч байна [2], [3]. Уур Амьсгалын Өөрчлөлтийн Асуудлаарх Засгийн Газар Хоорондын Ажлын Хэсгийн тодорхойлсноор, газрын доройтол нь хүний үйл ажиллагааны шууд болон шууд бус нөлөөгөөр газрын төлөв байдалд гарч буй сөрөг үр дагавар бөгөөд биологийн бүтээмж, экологийн бүрэн бүтэн байдал эсвэл хүнд өгч буй үнэ цэний дор хаяж аль нэг нь урт хугацааны явцад буурах эсвэл алдагдах байдлаар илэрнэ. Газрын доройтлын эсрэг арга хэмжээ авахгүй бол хөрснөөс ялгарах хүлэмжийн хий ихсэж, түүний нүүрстөрөгч шингээх чадвар буурах бөгөөд дэлхийн дулаарлыг 1.5°C-аас 2°C хүртэл хэтрүүлэхгүй байх шаардлагад нийцэхгүй болно [1].

Хүнс, Хөдөө Аж Ахуйн Байгууллага хөрсний доройтлыг тодорхойлохдоо “экосистемийн материал болон үйлчилгээгээр хангах чадамжийг бууруулах хөрсний эрүүл төлөв байдалд гарах өөрчлөлт" гэжээ. Хөрсний эрүүл төлөв байдал нь түүний үүрэг болон экологийн тэнцвэрт байдлаар тодорхойлогдох бөгөөд нүх сүвэрхэг байдал, чийг, механик бүрэлдэхүүн гэх мэт физик шинж чанар, органик нэгдэл, шим тэжээлийн бодисын агууламж гэх мэт химийн шинж чанар, бичил биетний олон янз байдал, биомасс, хөрсний амьсгал гэх мэт биологийн хүчин зүйлсээс хамаарна [4]. Сүүлийн жилүүдэд хөрсний эрүүл төлөв байдал тогтмол буурч байгаа нь хүний аж амьдрал, хүнсний аюулгүй байдалд ихээхэн эрсдэл дагуулж байна [1].

Хөрсний физик шинж чанар нь хөрсний элэгдэл (ус болон салхины нөлөөгөөр), уул уурхайн үйл ажиллагаа, ой мод огтлох зэргээс шалтгаалж алдагдаж байна. Хуурай бүс нутгуудад явагддаг газрын доройтлын нэг хэлбэр нь цөлжилт бөгөөд хүний үйл ажиллагаа, уур амьсгалын тогтворгүй байдал гэх мэт олон хүчин зүйлээс шалтгаалдаг. Өнгөрсөн хэдэн арван жилийн хугацаанд, зарим хуурай бүс нутгуудад цөлжилтийн зэрэг, цар хүрээ нь нэмэгдсэн бөгөөд цаашид улам эрчимжих хандлагатай байна [1]. Хөрсний доройтлын өөр нэг хэлбэр нь хөрсний бохирдол юм. Хөрсний бохирдол нь аливаа хортой нэгдэл хэвийн хэмжээнээс өндөр концентрацитай, зорилтот бус организмд хортой нөлөө үзүүлэхүйц хэмжээтэй байхыг хэлнэ [5]. Хөрсний бохирдол нь химийн бордоо, пестицидийн хэрэглээ, нефтийн бүтээгдэхүүн асгарах тохиолдолд үүсэх бөгөөд хөрсний химийн болон биологийн шинж чанарыг бууруулна [4]. Тиймээс хөрсний бохирдол хүний эрүүл мэндэд шууд нөлөөлж, хөрсөнд явагддаг экосистемийн үйл ажиллагаанд сөргөөр нөлөөлөх боломжтой [5].

Нэгдсэн Үндэсний Байгууллагын Тогтвортой Хөгжлийн Зорилтуудыг биелүүлэхийн тулд бохирдсон болон доройтсон хөрсийг сэргээх байгаль орчинд ээлтэй технологийг хөгжүүлж, хэрэглэх нь зүйтэй. Хөрсний бохирдлыг цэвэрлэх уламжлалт аргууд нь зарим тохиолдолд хүрээлэн буй орчны өөр нэг асуудал дагуулдаг, бага орлоготой орнуудад хэрэглэхэд тохиромжгүй зэрэг дутагдалтай байдаг [6]. Харин, биоремедиаци биологийн агент ашиглаж аюултай нэгдлийг аюулгүй болгон хувиргах үйл явц юм. Бичил биетнүүд төрөл бүрийн бохирдуулагч нэгдлүүдийг задлах, хувиргах, тогтворжуулах төрөл бүрийн механизмтай байдаг [7]. Гэвч, эвдрэлд орсон болон цөлжилттэй хөрсний физик, хими, биологийн шинж чанарыг нэгэн зэрэг сайжруулах технологи илүү үр дүнтэй учир энэхүү шаардлагыг хангах бичил биетний технологи чухал байна. Энэхүү тойм өгүүллийн дараагийн хэсгүүдэд биоремедиаци (bioremediation) гэх нэр томъёог хөрсний бохирдуулагч нэгдлүүдийн биологийн задралын талаар өгүүлэхэд, хөрсийг сэргээх эсвэл хөрсний сэргээлт (soil restoration) гэх нэр томъёог доройтсон хөрсний хөрсний физик, химийн, биологийн шинж чанарыг сайжруулах ойлголтын талаар өгүүлэхэд, харин нөхөн сэргээлт гэх нэр томъёог энэ хоёр ойлголтыг ерөнхийд нь өгүүлэхэд ашиглав.

1.2 Хөрсний эрүүл төлөв байдалд бичил биетний экзополимерийн ач холбогдол

Хөрсний бичил биетнүүд хөрсний органик нүүрстөрөгч болон шим тэжээлийн бодисын эргэлтэд оролцон хүлэмжийн хийг ялгаруулж, бас зарцуулдаг [2], [8]. Эдгээр бичил биетнүүд хүн төрөлхтнийг түүхий эдээр хангах, уур амьсгал, усны зохицуулгад оролцох, органик нэгдлийг хувиргах, хөрс үүсэх, ургамал ургах процессийг дэмжих гэх мэт экосистемийн үүрэгтэй [9]. Хөрсөнд эдгээр үйл ажиллагаа явагдахад түүний бүтэц гол үүрэг гүйцэтгэдэг. Хөрсний жижиг хэсгүүд нь наалдаж, нэгдсэнээр үүсдэг хөрсний агрегат нь хөрсний бүтцийн үндсэн нэгж болдог. Энэхүү нэгж хөрсний ус барих чадвар, усны хөдөлгөөн, агааржилт, температурын зохицуулга гэх мэт чухал физик шинж чанарыг тодорхойлдог бөгөөд эргээд хөрсөнд явагддаг физик, химийн, биологийн үйл явцад чухал нөлөө үзүүлдэг [10], [11].

Саяхан хийгдсэн мета-анализ судалгаа хөрсний бактери, мөөгөнцөр нь хөрсний агрегаци үүсэхэд чухал үүрэгтэй оролцдог болохыг онцолсон байна. Бактери макро болон микроагрегатын аль алинд нөлөөлдөг бол мөөгөнцөр макроагрегатад илүү нөлөө үзүүлж байжээ [3]. Хөрсний бичил биетнүүдийн агрегаци үүсэхэд оролцдог механизмуудын нэг эзкополимер ялгаруулах процесс юм. Эдгээр экзополимер хөрсний агрегацийг дэмжих холбогчийн үүргийг гүйцэтгэдэг [10]. Тиймээс бичил биетний экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашиглах боломжтой байгаль орчинд ээлтэй арга хэрэгсэл гэж үзэх болсон.

1.3 Энэхүү тоймын зорилго

Бичил биетний экзополимерийг хүнс, анагаах ухаан, хөнгөн үйлдвэр, гоо сайхан гэх мэт олон салбарт хэрхэн ашиглах талаар нэлээд бичигдсэн байдаг [12]–[16]. Мөн эдгээр нэгдлийн экологийн үүрэг, нийлэгжлийн замууд, генетик зохицуулгын талаар хэд хэдэн тойм өгүүлэлд тодорхой дурдсан байна [17]–[20]. Харин, бичил биетний экзополимерийг хөрсийг сэргээхэд ашиглах талаарх судалгаа харьцангуй бага байгаа нь эдгээр нэгдлүүдийг хөрсний орчинд судлахад хүндрэлтэй байдагтай холбоотой болов уу [21]. Гэсэн хэдий ч бичил биетний экзополимер хөрсний эрүүл төлөв байдалд эерэг нөлөө үзүүлж байгааг харуулсан нэлээд олон судалгаа хэвлэгдсэн байна. Энэхүү тойм өгүүлэлд бид бичил биетний экзополимер нь хөрсний физик, хими, биологийн шинж чанарт нөлөөлөх замаар хэрхэн хөрсний эрүүл төлөв байдлыг сайжруулдаг механизмыг тусгахыг зорилоо. Бид эхлээд бичил биетний экзополимерийн бүрэлдэхүүн, бионийлэгжил болон үүргийн талаар товч дурдана. Дараа нь бичил биетний экзополимер болон тэдгээрийг нийлэгжүүлэгч бичил биетнийг доройтсон хөрсийг сэргээх болон хүнд металл болон ксенобиотик нэгдлүүдээр бохирдсон хөрсийг биоремедиацад оруулахад хэрхэн ашиглаж болох талаар одоог хүртэл хийгдсэн судалгааны ололтуудыг тоймлон харуулна. Төгсгөлд нь бичил биетний экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашиглахад тулгарч буй хүндрэлүүд болон тэдгээрийг даван туулахад чухал гэж үзсэн чиглэлүүдийг хэлэлцэв.

2. Хөрсний бичил биетний экзополимер: Ерөнхий ойлголт

2.1 Хөрсний бичил биетний экзополимерийн тодорхойлолт, үүрэг

Эхэн үеийн судалгаанууд бичил биетний экзополимер буюу эсийн гадагш нийлэгждэг полимер нэгдлийг судлахдаа голдуу полисахаридад анхаарлаа хандуулдаг байсан. Гэвч түүнд уураг, нуклейн хүчил гэх мэт бусад бодис мөн агуулагддаг [22]–[26]. Энэ хэсэгт хөрсний бичил биетний экзополимерийн гол бүрэлдэхүүн хэсгүүд болох полисахарид болон уургийн талаар ерөнхий мэдээлэл өгөхийг зорилоо. Учир нь дараагийн бүлгүүдэд экзополимер бүхэлдээ эсвэл түүний уураг болон полисахаридын бүрэлдэхүүн хөрсний бүтэц, үйл ажиллагаанд хэрхэн нөлөөлж байгаа талаар хэлэлцэх болно. Энэхүү тойм өгүүлэлд бид “экзополимер” гэсэн нэр томьёог эсийн гадагш нийлэгждэг полимер нэгдлийг нийтэд нь илэрхийлэхдээ ашиглах ба харин түүний уураг эсвэл полисахаридыг дангаар ашигласан судалгааны тухай бол “уураг”, “полисахарид” гэж тодруулж дурдах болно.

2.1.1 Экзополимерийн полисахаридын бүрэлдэхүүн

Полисахарид нь биофильмийн нэлээд хэсгийг бүрдүүлдэг. Бичил биетнүүд гомополисахарид болон гетерополисахаридын аль алиныг нийлэгжүүлдэг ба гетерополисахарид илүү давамгайлдаг [27]–[30]. Өөр өөр бичил биетнүүд бүтэц, найрлагаараа онцлог полисахаридуудыг ялгаруулдаг. Зарим бичил биетнүүд зөвхөн нэг төрлийн полисахарид ялгаруулдаг бол зарим нь өөр өөр бүтэц, үүрэгтэй хэд хэдэн полисахарид ялгаруулдаг байна. Жишээ нь *Pseudomonas aeruginosa* нь алгинат, *Pel*, *Psl*, гэсэн полисахаридуудыг нийлэгжүүлдэг ба эдгээр нь биофильм үүсэх өөр өөр үе шатанд оролцдог. Алгинат механик шинж чанарыг сайжруулдаг бол *Pel*, *Psl* нь биофильм бүрэлдэх болон гадаргууд наалдах үйл явцад оролцдог [31]. Бичил биетний өсгөврүүдээс ялгасан полисахаридын бүтэц, найрлагыг судлах судалгааны аргууд хангалттай сайн хөгжсөн байдаг [32] боловч хөрснөөс ялгасан экзополимерт агуулагдах полисахаридын бүтэц, найрлагыг судлах арга зүй хангалтгүй байна.

2.1.2 Экзополимерийн уургийн бүрэлдэхүүн

Хөрсний уургуудыг таньж тодорхойлоход гумины хүчил зэрэг хольц хүндрэл учруулдаг. [33]. Хөрсөнд агуулагддаг экзополимерийн гол төлөөлөгчдийн нэг бүлэг бол гломалины төрлийн хөрсний уургууд (ГТХУ). Ихэнх судалгаа ГТХУ-ыг арбускул микориз мөөгөнцрүүд ялгаруулдаг гэж үздэг [34]–[38]. Гэвч эдгээр уургууд нь чөлөөт амьдралтай бактериудаас гаралтай байх магадлалтай [39]. Масс спектрометрт суурилсан протеомиксын судалгаагаар ГТХУ-ын фракцад микоризын гаралтай уураг илрээгүй бөгөөд гломалин нь тиоредоксин агуулсан чаперон болох нь тогтоогдсон. Энэ фракцад их хэмжээний өндөр температурт тэсвэртэй хөрсний уургууд агуулагдаж байжээ [40]. Redmile-Gordon нар [39]-ын үзэж байгаар ГТХУ нь экзополимерийн нэг хэсэг бөгөөд анион солилцооны резин ашиглан хөрсний бичил биетний экзополимерийг ялгахад уураг болон полисахаридын бүрэлдэхүүнийг аль алиныг ялгах боломжтой. Энэ аргаар ялгасан хөрсний бичил биетний экзополимерийн уураг, полисахаридын харьцаа тухайн хөрсний шинж чанар болон орчны хүчин зүйлүүдээс хамаарч өөр өөр байдаг [39], [41]–[44].

2.2 Хөрсний бичил биетний экзополимерийн үүрэг, үйл ажиллагаа

Бичил биетний экзополимерийн нийлэгжилд асар их энерги, тэжээлийн бодисын нөөц шаардлагатай байдаг. Хөрсний бичил биетний экзополимер quorum sensing, адгезийг нэмэгдүүлснээр нийлэгжүүлэгч эсдээ өрсөлдөх давуу талыг бий болгодог [45]. Экзополимер бичил биетэнд шаардлагатай нүүрстөрөгч, шим тэжээлийн бодисыг хадгалахаас гадна хүнд металл, ксенобиотик зэрэг хөрс бохирдуулагч бодисын нөлөөллөөс хамгаалах, хуурайшилт, температур, pH-ийн огцом хэлбэлзэл, давсжилт, исэлдэлт зэрэг абиотик хүчин зүйлүүдээс хамгаалахад чухал үүрэг гүйцэтгэдэг [10]. Тухайлбал, Хойд туйлын тэнгисийн мөснөөс цуглуулсан дээжид өвлийн улирлын эрс тэс уур амьсгалаас бичил биетнийг хамгаалах үүрэгтэй экзополимер их хэмжээгээр илэрсэн. *Bacillus sp*. B3-72 болон *Geobacillus tepidamans* V264 омгийн нийлэгжүүлдэг экзополимер өндөр температурт тогтвортой байдлаа хадгалж байсан [46]-[48].

Түүнчлэн экзополимер удамшлын материал дамжих, бичил биетэн-ургамал хоорондын харилцан холбоог сайжруулахад оролцдог [10]. Жишээлбэл, азот бэхжүүлэгч булцууны бактери болон ургамлын симбиоз харилцаанд экзополимер гол үүрэг гүйцэтгэдэг [49]. Ургамал булцууны бактерийн экзополимерийн бүтцийг таньдаг болохыг тогтоожээ. *Mesorhizobium loti* R7A омгийн нийлэгжүүлдэг экзополимер ба *Lotus japonicus* хоорондын харилцан холбоог судлахад уг ургамал зөвхөн тодорхой бүтэц бүхий экзополимер нийлэгжүүлдэг бактери холбогдох боломжтой рецептор нийлэгжүүлдэг болохыг тогтоогджээ [50],[51].

3. Бичил биетний экзополимерийг хөрсийг сэргээхэд ашиглах нь

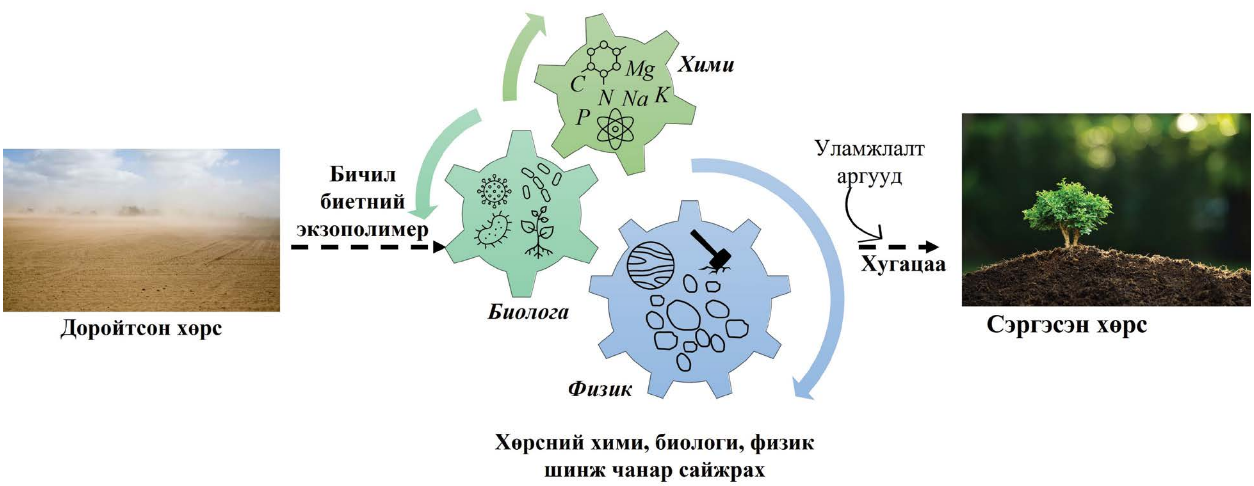
Нийлэг полимерүүд хөрсний шинж чанарыг сайжруулахад үр дүнтэй хэдий ч байгаль дээр муу задардаг эсвэл огт задардаггүй төдийгүй хүрээлэн буй орчинд хортой нэгдэл ялгаруулдаг. Харин бичил биетний экзополимер биологийн задралд ордог, өртөг хямд, хүн ба байгаль орчинд хор аюулгүй шинж чанараараа нийлэг полимерээс давуу талтай [10], [15], [52]-[55]. Хөрсний фикик, химн, биологийн шинж чанарыг сайжруулах хөрсний нөхөн сэргээлт болон органик ба органик бус бохирдуулагчдын биоремедиацийн үр дүнг нэмэгдүүлэхэд төрөл бүрийн биополимерийг ашиглаж байна [56]. Энэ хэсэгт бичил биетний экзополимер хөрсний физик, химн, биологийн шинж чанарт нөлөөлснөөр хөрсний эрүүл төлөв байдлыг хэрхэн дэмжиж болох талаарх ололтуудыг ангилахыг зорилоо (**1-р зураг**).

3.1 Хөрсний физик шинж чанарыг сайжруулахад бичил биетний экзополимерийн үүрэг

3.1.1 Хөрсний агрегатыг нөхцөлдүүлэгч

Бичил биетний экзополимерийн хөрсний эрдэс бодистой холбогдож, хөрсний агрегацийг дэмждэг болохыг 1990-ээд онд тогтоосон [57], [58] боловч сүүлийн үед судлаачдын сонирхол экзополимерийн хөрсний эрүүл төлөв байдалд гүйцэтгэх үүрэг рүү илүүтэй чиглэх болсон. Энэхүү сонирхол экзополимерийн хөрсний органик бодисыг хамгаалах чадвартай холбоотой байж болох юм. Экзополимер болон ургамлын салс зуурамтгай чанар ихтэй, гадаргуугийд тархах чанар бага учраас хатах явцдаа задрахгүйгээр хөрсний хөрсний жижиг хэсгүүдийг холбодог болохыг өндөр нягтаршилтай рентген компьютер томограф ашиглан хийгдсэн судалгаагаар баталсан [59]. Одоогийн байдлаар судлаачид экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетэн болон тэдгээрээс ялгасан экзополимерийг ашиглан доройтсон хөрсний агрегацийг сайжруулах боломжтой гэсэн санааг дэмжиж байна.

Цөөнгүй судлаачид хөрсний экзополимерийн агууламж ба хөрсний агрегатын тогтвортой байдлын хооронд эерэг хамаарал байгааг тогтоожээ [42], [60]–[62]. Микрокосм болон талбайн туршилтаар экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетэн хөрсний агрегацийг дэмжиж, агрегатын тогтвортой байдлыг нэмэгдүүлдэг болох нь тогтоогдсон. Тухайлбал,



1-р зураг. Бичил биетний экзополимерийн тусламжтай хөрсний нөхөн сэргээлтийг дэмжих ерөнхий схем

Pseudomonas chlororaphis A20 болон *Bacillus proteolyticus* A27 элс, лаг шаварлаг хөрсний усанд тэсвэртэй макроагрегатыг нэмэгдүүлдэг болохыг тогтоожээ [63]. Өөр нэг судалгаагаар хүчилд тэсвэртэй *B. amiloliquefaciens* p16 нь бактерийн хүчил тэсвэрлэх чадварыг хангаж, хөрсний агрегацийг дэмжиж байгааг тогтоосон [64] боловч хөрсний төрлийг дурдаагүй байна. Элсэн манханд ургадаг ургамлын бактери болох *Microbacterium arborescens*-ийн нийлэгжүүлдэг экзополимер элсэрхэг хөрсний агрегацийг нэмэгдүүлэх чадвартай болохыг тодорхойлсон [65]. Индемик цианобактериуд болох *Nostoc ellipsosporum* HH-205 болон *Nostoc punctiforme* HH-206-ийг давсжилт ихтэй хөрсөнд суулгахад хөрсний агрегацийн тогтвортой байдлыг сайжруулсан [66]. Эдгээр судалгаанаас харахад экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүд төрөл бүрийн хөрсөнд үржиж, хөрсний агрегацийг дэмжих чадвартай болох нь харагдаж байна.

Түүнчлэн судлаачид хөрсний агрегацийг сайжруулахад экзополимерийн бүрэлдэхүүн хэсгүүд хэрхэн оролцож байгааг судалжээ. Хөрсний нийт органик нүүрстөрөгчөөс илүүтэй экзополимерийн полисахарид болон уургийн бүрэлдэхүүн хэсгүүд хөрсний бүтцийн тогтвортой байдалтай хамааралтай байгааг тогтоосон бөгөөд тэр дундаа экзополимерийн уургийн бүрэлдэхүүн агрегатын тогтвортой байдалтай илүү нягт холбоотой байв [42], [67]. Гель үүсгэх, хөрсний жижиг хэсгүүдийн агрегаци, биофлоккуляцитай холбоотой экзополимерийн гидрофоб шинж чанар нь түүний уураг, полисахаридын харьцаагаар голчлон зохицуулагддаг гэж үзжээ [68].

Кальцийн алгинатыг хэрэглэхэд хөрсний агрегацийг сайжруулж байгаа нь ажиглагдсан [69]. Экзополимерийн полисахаридын холбох чадвар түүний гинжин бүтэц, урт, уян хатан чанараас хамааралтай бөгөөд энэ нь устөрөгчийн холбоо, ван дер Ваальс, ионы харилцан үйлчлэлийг бий болгодог. Хөрсний физик, химийн шинж чанар, тухайлбал pH нь молекулын цэнэгт нөлөөлдөг [10]. Тиймээс хөрсний агрегацийг сайжруулахад дан полисахарид хэрэглэсний үр нөлөө нь хөрсний төрлөөс хамаарч өөр өөр байж болно.

3.1.2 Хөрсний элэгдлийг хянах

Хуурай газрын доройтсон хөрс ихэвчлэн нарийн ширхэгтэй, органик нэгдлийн агууламж бага, ургамлын бүрхэвч сийрэг тул элэгдэлд өртөмтгий, агрегаци муу байдаг [70]. Цөлжилтийн улмаас ургамлан бүрхэвч, биокраст багасаж, үржил шимгүй хөрсийг тэлснээр хүний амьжиргаа, байгаль орчинд аюул учруулж байна. Цөлийн тоос тив хооронд зөөвөрлөгдөн, түүнд холбогдсон бичил биетэн тухайн газар нутгийн мэдрэг болон индемик зүйлүүдэд нөлөөлж, улмаар газар тариаланд хохирол учруулах, хүнд өвчлөл үүсгэх эрсдэл дагуулж байна [71].

Экзополимер нийлэгжүүлэгч бактерийн омог эсвэл цэврээр ялгасан экзополимерийг элэгдэлд орсон газруудад гадаргууг нь тогтворжуулахад ашигласнаар хөрсний бүтцийг хадгалахад түлхэц болдог [72]. *Rhizobium tropici*, *Leuconostoc mesenteroides* зэрэг экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг хөрсний элэгдэлтэй тэмцэхэд ашиглахад эерэг үр дүн ажиглагдсан ба тэдгээрийн экзополимер хөрсний жижиг хэсэг хоорондын наалдцыг сайжруулж, өнгөн хөрсний элэгдэл тэсвэрлэх чадварыг нэмэгдүүлжээ [73], [74].

Элэгдсэн хуурай газар нутгийг сэргээхэд биокраст үүсэхэд оролцдог экзополимер нийлэгжүүлэгч цианобактерийг түгээмэл хэрэглэдэг. Цианобактерийн экзополимер хөрсний шим тэжээлийн бодисыг хадгалж, тоосжилт үүсэхээс сэргийлснээр хөрсний гадаргууг тогтворжуулахад чухал үүрэг гүйцэтгэдэг [70]. Хятадын Hobq цөлд хийсэн судалгаанд биокраст үүсгэхийн тулд экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүд болох *Microcoleus vaginatus* болон *Scytonema javanicum*-ийн холимог өсгөврийг элсэрхэг хөрсөнд тарьсан байна. Гурваас найман жилийн турш үүссэн биокрастыг судлахад түүнд агуулагдах экзополимер элсэрхэг хөрсний чийгийг барьж, хадгалахын зэрэгцээ хөрсийг элэгдлээс хамгаалахад чухал үүрэг гүйцэтгэдэг болохыг тогтоожээ [75]. Цаашилбал, экзополимер нийлэгжүүлэгч *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 омгийг талбайд туршихад биокрастын нөхөн сэргэлт хурдсаж байгааг тодорхойлжээ [76].

Судлаачид экзополимер нийлэгжүүлэгч омог шууд хэрэглэхээс гадна экзополимер болон тэдгээрийн химийн бүтцийн хувьд өөрчлөгдсөн хэлбэрүүдийг тоосжилт дарах, элэгдэл бууруулахад ашиглах үр дүнтэй аргуудыг эрэлхийлж байна [77]–[79]. Жишээлбэл, тоосжилт дарахад ксантан, цардуул, карбоксиметилцеллюлозыг бага концентрацитайгаар хэрэглэхэд үр дүнтэй болох нь ажиглагдсан [80]. Натрийн алгинат ба түүний химийн аргаар өөрчилсөн уламжлал хөрсний тогтвортой байдлыг нэмэгдүүлж, тоос ялгарахаас сэргийлсэн [79], [81]. Том хэмжээний талбайн туршилтад эдгээр полимерийг хэрэглэснээс 8 хоногийн дараа тоосжилтыг мэдэгдэхүйц бууруулсан боловч хур тунадас орсны дараа полимерүүд хурдацтайгаар задарч үр нөлөө нь буурсан. Тиймээс үр ашигтай полимер гарган авахын тулд маш болгоомжтой хандах шаардлагатайг харуулж байна. Мөн салхин хонгилын туршилтад 1% -ийн натрийн алгинат, пектинийг хэрэглэхэд салхины элэгдлийг бууруулсан [83]. Экзополимер агломераци, гадаргуугийн адгезийн шинж чанараараа хөрсний өнгөн хэсгийг хамгаалж, хамгаалалтын бүрхэвч болж өгдөг [63]. Үүнээс харахад, экзополимерийг хөрсний элэгдэл [73], тоосжилт [84] бууруулахад ургамлын бүрхэвч, гео-мембран зэрэг урьд нэвтрүүлсэн аргуудтай хослуулах эсвэл орлуулах замаар байгаль орчинд ээлтэй эко-бүрхэвч болгон хөгжүүлэх боломжтой.

3.1.3 Хөрс барьцалдуулагч

Экзополимерийн хөрсийг механик эвдрэлээс хамгаалах, хөрсний тогтвортой байдалд гүйцэтгэх үүргийг судалжээ. Барьцалдсан элснээс ялгасан бичил биетний экзополимер элсний бат бөх чанарыг нэмэгдүүлж байсан тул элс барьцалдах явцад биоген хүчин зүйл тодорхой хэмжээгээр оролцдог болохыг тодорхойлов [85]. Түүнчлэн экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетэн, тэр дундаа цианобактери хөрсний хагаралыг бууруулснаас үзэхэд эндемик бичил биетнийг ийм төрлийн элэгдэлд өртөмтгий бүс нутагт ашиглах нь био-инженерийн үр дүнтэй арга болохыг харуулж байна [86]. Costa болон бусад судлаачид [10] *Aureobasidium pullulans*-ийн полимер хөрсний даралтын хүчийг 200%-иас дээш нэмэгдүүлэх боломжтойг тэмдэглэжээ. Ксантаныг геотехникийн инженерийн зориулалтаар ашиглахад хөрсний механик шинж чанарыг сайжруулсан [56].

Экзополимер хөрсний бат бөх чанарыг шууд нэмэгдүүлэхээс гадна Ca^{2+}, Mg^{2+} зэрэг металлын ионуудыг барьж, карбонатын тунадасжих үйл явцыг дэмждэг болохыг тогтоожээ. Бичил биетний тодорхой үйл ажиллагааны тусламжтай карбонат үүсэх явцыг “Бичил биетний оролцоотой явагддаг карбонатын тунадасжилт” (MICP) гэж нэрлэдэг. MICP-ийг биоцементаци, хөрсийг бэхжүүлэх, хөрсний элэгдлээс урьдчилан сэргийлэхэд ашигладаг. Нэмж дурдахад энэхүү био-шохойжилт нь нүүрстөрөгчийн шингээлтийн нэг төрөл [87] бөгөөд энэ нь бичил биетний экзополимерийг эдийн засгийн хувьд өрсөлдөхүйц, байгаль орчинд ээлтэй хөрс барьцалдуулагч болгон ашиглахын ач холбогдлыг тодосгох юм.

3.1.4 Хөрсний ус барих чадварыг сайжруулах биогидрогель

Бичил биетэн экзополимерийг хүрээлэн буй орчны стрессээс хамгаалах механизм болгон нийлэгжүүлдэг нь нэгэнт тодорхой болсон. Жишээлбэл, хуурай нөхцөлд *Pseudomonas* sp. экзополимерийн полисахаридын бүрэлдэхүүний нийлэгжлийг нэмэгдүүлдэг [88]. Түүнчлэн усны хязгаарлагдмал нөхцөлд *Pseudomonas putida* алгинатын нийлэгжлийг эрчимжүүлж, эсийг хуурайшилтын стрессээс хамгаалж, амьдрах боломжийг нэмэгдүүлжээ [89]. Экзополимер гигроскоп шинж чанартай тул ойр орчмын хөрс чийггүй болоход ч бичил орчинд хангалттай ус хадгалах боломж олгодог [72].

Экзополимер нь гидравлик дамжуулалтыг бууруулж, усны хуримтлалыг нэмэгдүүлэх замаар бичил орчинд гидравлик тусгаарлалт үүсгэх боломжтой гэж үзжээ. Үүний тусламжтайгаар бичил орчныг чийгээр хангаж, эсийг хуурайшилтаас хамгаалж, хур тунадас орох үеэр усны агууламж огцом нэмэгдэхэд үүсэж болох осмосын стрессийг бууруулдаг [90]. Саяхан хийгдсэн микрокосмын судалгаагаар экзополимер нийлэгжүүлэгч *B. subtilis* NCIB 3610 омог хөрсний усны алдагдал, гидравлик тусгаарлалтад нөлөөлж буйг баталсан ба уг омог хөрсний нүх сүвний бүтцийг эрс өөрчилснөөр хөрсний усны алдагдлын хэмжээ, орон зайн тархалтад нөлөөлдөг гэж судлаачид дүгнэжээ [91]. Экзополимер хөрсөн дэх усны ууршилтыг бууруулахад чухал үүрэг гүйцэтгэдэг. Экзополимерээр боловсруулсан ба боловсруулаагүй хөрсийг харьцуулахад экзополимертэй хөрсний усны алдагдал удаан явагдаж байв [92]. Түүнчлэн *Sinorhizobium meliloti*-ийн экзополимер бичил нүх сүв бүхий камер дахь усны ууршилтын хурд, хэмжээ, хэлбэлзэлд концентрацаас хамааралтайгаар нөлөөлж байгааг тогтоожээ [93].

Биогидрогель гидрофил функциональ бүлгүүдийнхээ ачаар усыг шингээдэг бол хэлхээний гинж хоорондын хөндлөн холбоосны тусламжтайгаар усны алдагдлыг багасгадаг [94]. Экзополимерийн тодорхой бүрэлдэхүүн хэсгүүд ус барих чадварт ялгаатай нөлөө үзүүлдэг. Жишээлбэл, полисахарид элсний ус барих чадварыг ихээхэн нэмэгдүүлдэг бол экзополимерийн уураг нарийн элсэрхэг хөрсний гидродинамик шинж чанарт хамгийн бага нөлөө үзүүлдэг [95]. Нэг грамм цэвэршүүлсэн полисахарид 50-70 грамм ус барих чадвартай. Гэсэн хэдий ч полисахаридын ус барих чадвар тэдгээрийн бүтцийн шинж чанараас хамаардаг гэдгийг ойлгох нь маш чухал юм [92]. Биогидрогелийн шинж чанараараа судлагдсан полисахаридын дотроос ксантан хамгийн их судлагдсан полисахарид юм. Ксантан 1%-иас бага концентрацитай байхад ч элсэрхэг хөрсний ус барих чадвар, сийрэгжилтийг сайжруулдаг. Ксантан зэрэг эдгээр бичил биетний полимерууд хөрсний ус барих чадварыг дээшлүүлэхэд ашиглагддаг нийлэг гидрогельтэй өрсөлдөхүйц хувилбар юм [56]. Гэхдээ хөрсний цементаци зэрэг болзошгүй асуудлаас зайлсхийхийн тулд концентрацийг нарийн тооцоолох шаардлагатай. Түүнчлэн, экзополимер хөрсний ус эсэргүүцэх чанарт нөлөөлдөг бөгөөд улмаар усны нэвчилт болон хөрсний ус барих чадварт нөлөөлдөг [97].

3.2 Хөрсний биологийн шинж чанарыг сайжруулахад бичил биетний экзополимерийн үүрэг

3.2.1 Хөрсний бичил биетний олон янз байдал, энзимийн идэвхийг нэмэгдүүлэх

Хөрс нь маш гетероген чанартай бөгөөд түүний орон зайн байгуулалт нь олон төрлийн бичил биетэн зэрэгцэн амьдрах орчныг нөхцөлдүүлдэг. Өөрөөр хэлбэл, микроагрегат болгон өвөрмөц бичил биетний бүлгэмдэлтэй байх бөгөөд нэг микроагрегат дахь бичил биетэн бусад микроагрегатуудаас тусгаарлагдсан байдалтай оршино [98]. Үүнээс хөрсний экзополимерийн агууламж хөрсний бичил биетний олон янз байдалд нөлөөлж болзошгүй гэж таамаглах нь ойлгомжтой юм. Судалгаагаар, хагас хуурай бүсийн бэлчээрт экзополимерийн агууламж бичил биетний бүлгэмдлийн бүтцэд нөлөөлж байгаа нь тогтоогдсон байна [99]. Цаашлаад, биофильм үүсгэх зорилгоор хөрсөнд глюкоз нэмэхэд Шанноны олон янз байдлын индексийг нэмэгдүүлдэг болохыг харуулсан [62].

Хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн олон янз байдал их байх тусам хөрсний агрегат тогтвортой байдаг болохыг тодорхойлсон хэдий ч хөрсийг нөхөн сэргээх зорилгоор бичил биетний экзополимерийг хэрэглэхэд бичил биетний олон янз байдалд нөлөөлж буйг цөөн хэдэн судалгаанд тэмдэглэжээ. Зарим судалгаанд экзополимер нийлэгжүүлэгч омог суулгаснаар хөрсний бичил биетний олон янз байдалд эергээр нөлөөлдөг болохыг харуулсан. Жишээлбэл, экзополимер нийлэгжүүлэгч *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 омог био-крастын нөхөн сэргэлтийг хурдасгадаг болохыг тогтоожээ. Энэхүү омог автотроф цианобактерийн өсөлт нэмэгдэхийн өмнө хөрсний өнгөн давхаргын гетеротроф бичил биетний бүлгэмдэлд нөлөөлж, бактери болон актиномицетийн тоо хэмжээг ихээхэн нэмэгдүүлсжээ [76]. *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 омог ашигтай бичил биетний тоо хэмжээг нэмэгдүүлсэн байна [100]. Мөн *Nostoc ellipsosporum* HH-205 ба *Nostoc punctiforme* HH-206 гэсэн хоёр индемик гетероцист цианобактерийг тарихад давсны нөлөөлөлд өртсөн газар нутагт бичил биетний идэвхжил нэмэгдсэн [66]. Эдгээр судалгааны үр дүн бичил биетний экзополимерийг хэрэглэхэд хөрсний агрегацийг дэмжиж, цаашлаад хөрсний бичил биетний олон янз байдлыг нэмэгдүүлэх боломжтойг харуулж байна.

Экзополимерийг дангаар эсвэл экзополимер нийлэгжүүлэгч омгийг хөрсөнд нэвтрүүлэхэд хөрсний энзимийн идэвхэд хэрхэн нөлөөлж буйг үнэлсэн судалгаанууд хэд хэд хийгджээ. Экзополимер нийлэгжүүлэгч *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018, *Pseudomonas chlororaphis* A20, *Bacillus proteolyticus* A27 хөрсөн дэх энзимийн идэвхийг нэмэгдүүлдэг болохыг тогтоожээ [100], [63]. Үүний нэгэн адил *Tolypothrix tenuis* болон *Microchaete tenera* цианобактерийн экзополимер шаварлаг хөрсний β-глюкозидаза, уреаза, протеаза, фосфомоноэстераза, арилсульфатаза, дегидрогеназын идэвхийг тус тус нэмэгдүүлсэн [101]. Түүнчлэн, биокраст үүсгэхийн тулд экзополимер нийлэгжүүлэгч цианобактери *Microcoleus vaginatus* ATHK43-ийг суулгаснаас 90 хоногийн дараа инвертаза болон дегидрогеназын идэвх мэдэгдэхүйц нэмэгдсэн нь ажиглагдсан [102].

3.2.2 Ургамлын өсөлт дэмжих, стресс бууруулах

Бичил биетний экзополимер давсжилт, хуурайшилт, температурын хэлбэлзэл зэрэг ургамлын абиотик стрессийг бууруулах чадвартай. Эдгээр хамгаалалтын механизм экзополимерийн төрөл бүрийн ионтой холбогдох чадвар болон хөрсний агрегатын тогтвортой байдлыг дэмжиж, ус барих чадварыг нэмэгдүүлдэгтэй холбоотой. Экзополимер ургамлын стрессийг хэд хэдэн механизмаар бууруулдаг [72]. Тухайлбал, экзополимер хөрсний илүүдэл Na^{+} ионыг шингээх замаар ургамалд шингэх Na^{+} ионы хэмжээг шууд бусаар бууруулдаг. Мөн экзополимер ургамлын эд эсийг хүрээлэн хамгаалалтын бүрхүүл үүсгэж, температурын хэлбэлзлээс хамгаалдаг [103]. Энэ нь ургамал-бичил биетний харилцан үйлчлэлийг сайжруулж, гадаргууд бэхлэгдэх чадварыг сайжруулдаг [104]. *Pantoea, Bacillus*, *Actinomycetes*, *Rhizobium*, *Arthrobacter*, *Bradyrhizobium*, *Pseudomonas* зэрэг хэд хэдэн бактерийн омгууд орчны таагүй нөхцөлд экзополимер нийлэгжүүлдэг бөгөөд хуурайшилт, давсжилттай нөхцөлд ургамлыг хамгаалах үйлчилгээ үзүүлдэг. Жишээлбэл, *Pseudomonas putida* GAP-P45 нь PEG-ээр өдөөсөн зохиомол хуурай нөхцөлд наранцэцгийн стрессийг бууруулж, үндэсний гадаргууд биофильм үүсгэж, хөрсний бүтцийг сайжруулсан [105]. *Pseudomonas* болон *Bacillus*-ийн экзополимер нийлэгжүүлэгч омгууд *Arabidopsis thaliana*-г 25% PEG-ээр өдөөгдсөн осмосын стрессээс хамгаалах чадвартай болох нь тогтоогдсон [106]. Улаан буудай, ангаахай шошийг экзополимер нийлэгжүүлэгч *Agrobacterium pusense* омгоор үйлчлэхэд түр зуурын хөрсний хуурайшилтын үед эдгээр ургамлын физиологийн үзүүлэлтүүдэд эерэг нөлөө үзүүлж байгаа нь ажиглагдсан [107]. *Pseudomonas entomophila* PE3 омгийн нийлэгжүүлдэг экзополимер наранцэцгийн өсөлт, ургац, давс тэсвэрлэх чадварыг нэмэгдүүлсэн [108].

Бичил биетний экзополимерийн өөр нэг

давуу талыг дурдвал хөрсөн дэх хүнд металлыг тогтворжуулснаар ургамалд шингэх явцыг хязгаарладаг. Жишээлбэл, экзополимер нийлэгжүүлэгч *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 омог хар тугалгаар (Pb) бохирдуулсан хөрсөнд тарьсан пакчой ургамлын Pb-ийн стрессийг бууруулсан. Үүнийг ургамлын биомасс нэмэгдэж, хүнсний эдэд Pb-ийн агууламж багассанаар баталсан [100]. Үүний нэгэн адил *Bacillus sp* S3-аас гаргаж авсан экзополимер *Oryza sativ*a L-ийн кадми (Cd) стрессийг бууруулахад үр дүнтэй болох нь батлагдсан. Энэ нь ургамлын биомассыг нэмэгдүүлээд зогсохгүй Cd-ийн хуримтлал, зөөвөрлөлтийг бууруулж, исэлдэлтийн стрессийг багасгасан. Экзополимер найлзуурын эсийн хана, үндэсний вакуольд Cd-ийн хуримтлалыг нэмэгдүүлж, эсийн хана үүсэх, антиоксидант хамгаалалтын системд оролцдог гений экспресст өөрчлөлт оруулсан [109]. Тиймээс экзополимер нийлэгжүүлэгч омог ашигласнаар ургамлын биотик ба абиотик стресс тэсвэрлэх чадварыг дээшлүүлэхийн зэрэгцээ уур амьсгалын өөрчлөлт, дэлхийн усны хомсдолоос улбаатай ургац алдалтаас урьдчилан сэргийлэх ирээдүйтэй шийдэл болж байна.

3.3 Хөрсний химийн шинж чанарыг сайжруулахад бичил биетний экзополимерийн үүрэг

Бичил биетний экзополимер хөрсний химийн шинж чанарт хэд хэдэн аргаар нөлөөлдөг. Экзополимер хөрсний агрегацид нөлөөлөх замаар хөрсний органик бодисын тогтвортой байдалд нөлөөлдөг [110]. Хөрсний агрегаци, түүний тогтвортой байдлыг нэмэгдүүлснээр хөрсний органик бодисын задралыг багасгах боломжтой. Scanning transmission x-ray микроскопыг near edge x-ray absorption fine structure спектроскоптой хослуулан хийсэн судалгаагаар бүтцийн эвдрэлд ороогүй микроагрегат энгийн органик нүүрстөрөгчийг хадгалах чадвартай болохыг тогтоожээ [110]. Түүнчлэн LC/MS шинжилгээ болон ^{13}C-тэмдэглэсэн туршилтаар био-краст нь түүний доод үеийн хөрстэй харьцуулахад төрөл бүрийн метаболит, ялангуяа амин хүчил, органик хүчлээр баялаг болохыг илрүүлсэн [111]. Эдгээр нээлтүүд дээр үндэслэн бичил биетний экзополимер хөрсний органик бодисын найрлагад нөлөөлж болохыг харуулж байна.

Хөрсний бичил биетний экзополимер хөрсний агрегацийг дэмжиж, улмаар хөрсөнд шим тэжээлийн хуримтлал бий болоход нөлөөлдөг [63]. Экзополимер хүр тунадас ихтэй үед метаболит, шим тэжээлийн бодис хадгалснаар шим тэжээлийн бодис урсах эсвэл хөрсний гүнрүү нэвчихээс сэргийлэх боломжтой [70]. *B. subtilis* зэрэг зарим бактери шим тэжээлийн бодисын дутагдалтай нөхцөлд экзополимерын нийлэгжлээ нэмэгдүүлдэг [72]. *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 хөрсөн дэх шим тэжээлийн агууламжийг нэмэгдүүлдэг болохыг тогтоожээ [76]. Үүнээс гадна, экзополимер хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн нүүрстөрөгчийн эх үүсвэр болдог. Costa ба бусад судлаачид *Acidobacteria* бактерийн экзополимер хэд хэдэн төрлийн бактери, мөөгөнцөр бодисын солилцоондоо ашигладаг болохыг тодорхойлжээ [112].

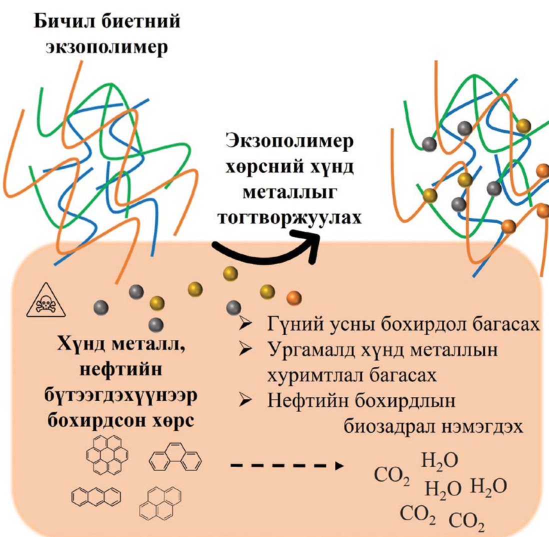
Бичил биетний экзополимер эрдэс ба органик бодисын харилцан үйлчлэлцэлд нөлөөлж, хөрсний биомолекулын нүүрстөрөгч, азот (N), фосфор (P) -ын найрлага, тогтвортой байдалд ихээхэн нөлөө үзүүлдэг. Экзополимер хөрсөн дэх ууссан болон коллоид хөнгөн цагааны төрлүүд хамт тунадас үүсгэдэг болохыг судалжээ [113]. Мөн хөрсний органик болон органик бус бүрэлдэхүүн хэсгүүдтэй холбогдсон экзополимер хөдөлгөөнт ба хөдөлгөөнгүй органик бодисын найрлагад нөлөөлөхөөс гадна элементүүдийн урвалын идэвхид нөлөөлж болно [10]. Экзополимер нийлэгжүүлэгч цианобактери *Microcoleus vaginatus* ATHK43-ын оролцоотой био-краст үүсэх явцад хөрсний цахилгаан дамжуулах чанар, нийт N, кали, кальци, магни, катион солилцох чадвар, гадаргын хөрсөн дэх хлорофилийн агууламжийг нэмэгдүүлдэг болохыг тогтоожээ [102].

Экзополимер органик нүүрстөрөгч болон бусад шим тэжээлийн бодисын диффузэд нөлөөлдөг ба ингэснээр хөрсөн дэх элементийн амьд организмд ашиглагдах явцыг зохицуулдаг. Жишээлбэл, *Paenibacillus mucilaginosus* VKPM B-7519 биокраст үүсэхэд нийт P, хөдөлгөөнт N болон P-ын агууламжийг нэмэгдүүлдэг болохыг тодорхойлжээ [76]. Экзополимер нийлэгжүүлэгч өөр нэг омог болох *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 нь хөрсөн дэх Pb-ын агууламжийг 38.1% хүртэл бууруулж, хөрсний pH болон хөрсний шим тэжээлийн агууламжийг нэмэгдүүлсэн [100]. Экзополимер нь хөрсөнд элбэг байдаг ферригидриттэй харилцан үйлчлэлцэж, хөрсөн дэх бичил биетний гаралтай нүүрстөрөгч, азот, фосфорын хөдөлгөөнд нөлөөлөх магадлалтай гэж үзжээ [114]. Түүнчлэн *Enterobacter*-ийн экзополимерийг өсгөврийн тэжээлт орчинд нэмэхэд P уусгах чадварыг нэмэгдүүлдэг болохыг ажиглав. Энэ нь экзополимер ууссан P-ыг шингээснээр дахин уусдаггүй P-оос уусдаг P үүсэх боломжийн хангадагтай холбоотой байж болох юм [115].

Нэмж дурдахад, экзополимерийн бүрэлдэхүүн хэсгүүд зэврэлтийн явцад электрон дамжуулагчийн үүрэг гүйцэтгэдэг. Экзополимер электрон потенциалыг нэмэгдүүлэх, электрон эсэргүүцлийг бууруулах үүрэг гүйцэтгэдэг бөгөөд ингэснээр электрон дамжуулалт болон металлын уусалтыг хөнгөвчлөх замаар зэврэлтийн гүйдлийг ихэсгэдэг [116]. Чулуун дээр амьдардаг *Knufia petricola* мөөгөнцөр зэврүүлэгч экзополисахарид нийлэгжүүлдэг байна [117].

4. Бичил биетний экзополимерийн тусламжтай хөрсний бохирдлыг тогтворжуулах, задралыг нэмэгдүүлэх

Ихэнх аж үйлдвэржсэн орнуудад хөрсний бохирдол ихсэж байгаа нь нийгмийн эрүүл мэнд болон хүрээлэн буй орчинд ихээхэн эрсдэл үүсгэж байна. Хөрс бохирдуулагч нэгдлүүд нь үйлдвэрийн болон хотын бохир ус, хөрсөнд булсан хог хаягдлаас ялгарах нэгдлүүд, хаягдал хадгалах танк гэх мэт олон эх үүсвэрээс гаралтай байдаг. Бичил биетний экзополимер нь бохирдуулагч нэгдлүүдийн тогтворжилт, задралыг хэд хэдэн механизмаар нэмэгдүүлдэг [118]. **2-р зурагт** бичил биетний экзополимер хөрсний биоремедиацийг хэрхэн дэмждэг болохыг хялбарчлан харуулав.



2-р зураг. Бичил биетний экзополимерийг ашиглан хөрсний биоремедиаци явуулах хялбаршуулсан схем

4.1 Бичил биетний экзополимерийн тусламжтай хүнд металлыг тогтворжуулах

Бичил биетний экзополимер хүнд металлыг иммобиляцид оруулах чадвартай болохыг харуулсан олон судалгаа хийгдсэн байна [118]. *Azotobacter*, *Paenibacillus*, *Klebsiella*, *Bacillus*, *Pseudomonas*-ийн төрлийн экзополимер нийлэгжүүлэгч олон бактери хүнд металл шингээх чадвартай [72]. *Azotobacter* -ийн экзополимер Cd, Cr гэсэн хүнд металлуудыг шингээснээр тэдгээрийг улаан буудайд хуримтлагдах явцыг багасгаж байжээ [119]. Өөр нэг экзополимер нийлэгжүүлэгч омог болох *Pseudoalteromonas agarivorans* Hao 2018 нь бохирдсон хөрсөнд Pb-ыг тогтворжуулж байсан [100]. Мөн *Pseudomonas* sp. W6 гэх омгийн экзополимер Pb-ыг шингээх чадвартай байжээ [120]. Бактериас гадна, *Aspergillus tubingensis* F12 гэх мөөгөнцрийн омгийн экзополимер нь хөрсний бичил биетний бүлгэмдэлд бараг нөлөөлөхгүйгээр хөрснөөс хүнд металлыг нь шүүх чадвартай байв [121]. Бичил биетний экзополимер нь хүнд металлаас гадна цацраг идэвхт элементийг тогтворжуулах чадвартай болох нь тогтоогдсон байна. Тухайлбал, торитолерант бактери *Providencia thoriotolerans* AM3 нь цацраг идэвхт элемент болох тори (Th)-той холбогдох чадвартай байжээ [122].

Экзополимер нь полисахарид, уураг, нуклейн хүчил гэх мэт биомолекулдаас бүрддэг учраас амин, карбоксил, фосфат, сульфат гэх мэт ионжих бүлгүүдийг агуулдаг. Эдгээр бүлгийн тусламжтай хүнд металлуудтай электростатик харилцан үйлчлэл үүсгэдэг [72] [84]. Үүнтэй холбоотойгоор экзополимерийн хүнд металл шингээх чадвар нь орчны нөлөөгөөр өөрчлөгдөх боломжтой. Тиймээс хөрсний pH гэх мэт хүчин зүйлүүд нь чухал нөлөөтэй [123]. Тухайлбал, хүчиллэг болон сул шүлтлэг орчинд галактуроны хүчил, глюкуроны хүчил, алгины хүчлүүд хөрсөнд Cr(VI) тогтворжуулах чадвар сайн байсан [124]. Мөн шингээх чадвар минералын шинж чанараас хамаарч болно [125]. Хөрсний шинж чанар экзополимерийн идэвхэд нөлөөлөхөөс гадна, зарим бичил биетнүүдийн нийлэгжүүлж буй экзополимерийн шинж чанар орчны нөлөөгөөр өөрчлөгддөг. Тухайлбал, хүнд металлд тэсвэртэй *Bacillus* sp. S3 омог тэжээлт орчинд нь нэмсэн хүнд металлын төрлөөс хамаарч өөр өөр шинж чанартай экзополимер нийлэгжүүлж байжээ [126].

Хүнд металлтай холбогдохоос гадна экзополимер нь гидрофоб хэсгүүдийнхээ тусламжтай фенантрен, бензин, будагч бодисууд гэх мэт органик бохирдуулагчдыг мөн шингээх чадвартай байдаг [84]. Эдгээр судалгааны үр дүнгүүд нь бичил биетний экзополимер ашиглан хүнд металл, цацраг идэвхт элемент, органик бохирдуулагчдаар бохирдсон хөрсийг эрүүлжүүлэхэд ашиглах боломжтой болохыг харуулж байна. Энэ нь мөн хөрсөөр дамжиж гүний болон гадаргуугийн ус бохирдох эрсдлийг бууруулна [84], [73].

4.2 Бичил биетний экзополимерийн тусламжтай нүүрсустөрөгчийн биозадралыг нэмэгдүүлэх

Нефтийн бохирдол нь задгай болон ароматик нүүрсустөрөгчийг ихээр агуулдаг. Америкийн Хүрээлэн буй орчныг хамгаалах агентлагаас гаргасан аюултай нэгдлүүдийн жагсаалтад дээгүүр ордог бүлэг нэгдлүүд бол олон цагиригт ароматик нүүрсустөрөгчидюм. Эдгээр нэгдлүүд нь цочмог эсвэл архаг хоруу чанар үзүүлдэг ба хорт хавдар үүсгэх, мутаци үүсгэх, урагт нөлөөлөх өндөр магадлалтай. Химийн бүтцээсээ хамаараад нүүрсустөрөгчид нь байгальд задрахдаа муу, хүнсний хэлхээнд орж хуримтлагдах эрсдэлтэй. Нүүрсустөрөгчийг задлах чадвартай олон бичил биетнүүд байдаг болох нь тогтоогдсон боловч тэдгээр нь байгалийн хөрсөнд үр дүнтэй байх нь бага. Байгалийн нөхцөлд эдгээр бичил биетний нүүрсустөрөгчийг задлах эсэх нь тодорхойгүй байхаас гадна төрөл бүрийн орчны хүчин зүйл хэр тэсвэртэй байх нь мөн тодорхойлоход хэцүү [6]. Нүүрсустөрөгч гэх мэт уусах чанар муутай бохирдуулагчдын биозадралыг эмульсжүүлэгч бодисуудын тусламжтай нэмэгдүүлэх боломжтой [84].

Streptomyces griseorubens GD5 [127], *Nostoc flagelliforme* [128] гэх мэт олон бичил биетний омог эмульсжүүлэх идэвхтэй экзополимер нийлэгжүүлдэг байна. Дундаж галофиль бактери *Halomonas eurihalina* нь n-тетрадекан, n-гексадекан, n-октан, минерал тос, бензин, түүхий газрын тос гэх мэт олон төрлийн нүүрсустөрөгчийг эмульсжүүлэх чадвартай экзополимер нийлэгжүүлж байжээ [129]. *Zoogloea* sp. болон *Aspergillus niger*-ийн экзополимер бохирдсон хөрсөнд пирений задралыг хурдасгаж байв. Сонирхолтой нь энэ хоёр бичил биетний экзополимерийг хослуулж хэрэглэхэд пирений задрал илүү нэмэгдэж байжээ [130]. Мөн хөрсний микрокосм болон овоолго хийх туршилтаар *Ochrabacterium anthropic* AD2 омгийн эмульсжүүлэх идэвх бүхий экзополимер дизель болон газрын тосны фракцын холимгийн задралын нэмэгдүүлж байв [131].

Экзополимерийн нүүрсустөрөгчийн задралыг дэмжих чадвар нь тэдгээрийн амфифиль шинж чанартай холбоотой [132]. Энэ нь нүүрсустөрөгчид усан фазаар дамжин эсийн мембранаар диффузлэгдэх боломжийг олгодог. Энэ санаа нь фенантрен ашиглан ургаж буй флуоресцент уургаар тэмдэглэсэн *Pseudomonas putida* омгийг конфокал лазер сканнинг микроскопоор ажигласан судалгаагаар дэмжигдсэн байна. Фенантрен ашиглан ургахад энэхүү бактерийн биофильм үүсгэх чадвар чухал үүрэгтэй байсан бөгөөд энэ нь фенантрений задрах явцыг хязгаарлах хүчин зүйл болох масс шилжих хязгаарыг багасгах боломж олгож байна гэж үзсэн [6]. Өөр нэг судалгаанд фенантрен задлагч, экзополимер нийлэгжүүлэгч *Sphingobium* sp. PHE3 болон *Micrococcus* sp. PHE9 омгууд нь фенантрен тосон фазаас усан фазруу нэвтрэх явцыг нэмэгдүүлж байгааг харуулсан бөгөөд фенантрений задрал эдгээр фазын заагт явагдаж байжээ. Энэ нь экполимерийн тусламжтай фенантрений уусах чанар нэмэгдсэнтэй холбоотой гэж үзжээ [133]. Мөн зарим бичил биетнийг нүүрсустөрөгч бүхий орчинд өсгөвөрлөхөд тэдгээрийн нийлэгжүүлдэг экзополимерийн уроны хүчил, ацетил, сульфатын бүлэг глюкоз агуулсан хяналтын орчинд ургуулсантай харьцуулахад нэмэгдэж байсан байна [129]. Гломалины төрлийн хөрсний уургууд мөн фенантрентай холбогдох чадвартай байсан ба эдгээр уургийн молекул жингээс хамаарч ялгаатай буюу 10 кД-оос том хэмжээтэй фракцын фенантрентай холбогдох чадвар жижиг уургуудтай харьцуулахад өндөр байжээ. Эдгээр уураг нь фенантрентэй гидрофоб, NH-π, ус төрөгчийн холбоо гэх мэт харилцан үйлчлэлээр холбогдож байсан байна [38].

4.3 Бичил биетний экзополимерт суурилсан технологит нөлөөлөх хүчин зүйлүүд

Бичил биетний экзополимерийн гарц болон молекулын шинж чанар нь орчны хүчин зүйлээс хамаарч өөрчлөгдөх боломжтой учраас хөрсний нөхөн сэргээлтийн үр дүн тухайн хөрсний шинж чанараас хамаарах боломжтой. pH, температур, чийгийн хэмжээ, давсны агууламж, хүнд металлын төрөл зэрэг хүчин зүйлүүд бичил биетний экзополимерийн нийлэгжилд ихээхэн нөлөө үзүүлдэг [56], [57]. Хөрсний төрөл өдөөгдсөн биокрастын экзополисахаридын молекул жин болон моносахаридын бүрэлдэхүүнд аль алинд нь нөлөөлж байжээ [134]. Хөрсний шинж чанар болон хөрсний үе давхарга нь тухайн хэсгийн бичил биетний бүлгэмдлийн бүтэц, генийн бүрэлдэхүүнээс хамаараад экзополимерийн бионийлэгжил болон молекул шинж чанарт нөлөөлж болохыг хэд хэдэн судалгаа харуулсан байна [26], [50], [53], [64], [65].

Хөрсний бичил биетний экзополисахаридын нийлэгжил болон химийн шинж чанар нь төрөл бүрийн стресс болон гаднаас нэмж буй нэмэлтүүдийн нөлөөгөөр өөрчлөгдөх боломжтой. Жишээ нь хөрсний микрокосм ашигласан судалгаа *Pseudomonas putida* GAP-P45 омгийн экзополимерийн гарц болон найрлага стрессийн нөхцөлд өөрчлөгдөж байгааг харуулсан байна. Хуурайшил, осмос болон температурын стрессийн үед түүний экзополисахаридын голлох моносахарид нь рамноз байсан бөгөөд энэ омгийн хөрсний агрегацийг нэмэгдүүлэх чадвар стрессийн үед илүү сайн байжээ [105]. Хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн экзополимерийн шинж чанар тухайн хөрсөнд нэмсэн субстратын шинж чанараас хамаарч өөрчлөгдөж болно. Тухайлбал, туршилтын хөрсөнд хитин болон N-ацетилглюкозамин нэмэхэд хитиний нэмэлтээр өдөөгдсөн экзополимер хөрсний ус барих чадварыг илүү сайжруулсан байна [135]. Органик биш нэгдлүүд мөн экзополимерийн нийлэгжлийг өөрчилдөг. ZnO-ийн нанопартикл *B. subtilis* JCT1 омгийн экзополимерийн нийлэгжлийг 596.1% дахин нэмэгдүүлсэн ба энэ нь хөрсний агрегаци, ус барих чадвар, органик нэгдлийн хэмжээг нэмэгдүүлжээ [136]. Өөр нэг судалгаагаар хөрсөнд цардуул, целлюлоз гэсэн органик нэгдлийг нэмсэнээс илүү шавар нэмэхэд экзополимерийн нийлэгжил нэмэгдсэн байна [67].

Орчны хүчин зүйлээс гадна, бичил биетний хүчин зүйлүүд мөн хөрсний нөхөн сэргээлтэд чухал нөлөө үзүүлнэ. Эдгээрт бичил биетний бүлгэмдлийн бүтэц, бодисын солилцооны чадамж, биофильм үүсгэх чадвар, бичил биетнүүдийн хоорондын өрсөлдөөн зэрэг орно [57]. Бичил биетнүүдийн хоорондын өрсөлдөөн нөхөн сэргээлтэд чухал нөлөө үзүүлнэ [69]. Бактерийн зүйлүүдийн хооронд болон бактери мөөгөнцрийн хооронд шим тэжээлийн бодисын төлөөх өрсөлдөөн явагдаж болно. Зарим тохиолдолд, бичил биетний зүйлүүд бусад бичил биетний өсөлтийг дарангуйлах бодис нийлэгжүүлдэг [70]. Тухайн хөрсний натив бичил биетнүүд тухайн нөхцөл, бүлгэмдэлдээ дасан зохицсон байдаг [57], [69], [71] тул нөхөн сэргээлтийн өмнө натив бичил биетний бүлгэмдлийн тогтвортой байдал, физиологийг судлах нь чухал.

5. Бичил биетний экзополимерийн хэрэглээтэй холбоотой хүндрэлүүд болон ирээдүйн чиг хандлага

Өмнөх хэсгүүдэд дурдсанчлан экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүд хөрсний физик, хими, биологийн шинж чанарыг сайжруулдаг, мөн хөрсний бохирдуулагчдын задралыг нэмэгдүүлж эсвэл бэхжүүлдэг болохыг одоогийн байдлаар хийгдсэн судалгаанууд батлан харуулж байна. Гэвч, экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг өргөн хүрээнд ашиглах, тэдгээрийн үр дүнг сайжруулахын тулд хэд хэдэн асуудлыг хөндөх шаардлагатай байна. Эдгээр асуудлыг үндсэн гурван чиглэлд ангилж болно. Үүнд: 1. Экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг хөрсөнд шууд инокуляци хийхэд хэр үр дүнтэй байх болон аюулгүй байдал, 2. Шинж чанар, эрүүл төлөв байдлын хувьд ялгаатай хөрсөнд эзкополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетний олон янз байдлыг харьцуулсан судалгаа бага, 3. Хөрснөөс шууд ялгасан экзополимерийн химийн шинж чанарын талаарх мэдээлэл хангалтгүй. Эдгээр хүндрэлүүд болон тэдгээрийг шийдвэрлэхэд тус нэмэр болох боломжит чиглэлүүдийг дор дурдлаа.

5.1 Экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг хөрсөнд шууд инокуляци хийхтэй холбоотой асуудлууд

Экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг байгалийн хөрсөнд шууд инокуляци хийхэд хэр үр дүнтэй байх нь тухайн бичил биетний амьдрах чадвартай холбоотой бөгөөд таамаглахад хэцүү [10]. Тиймээс сүүлийн үед хөрсний нөхөн сэргээлтийн үр дүнг сайжруулахтай холбоотой судалгаанууд хийгдэх болсон. Зарим судлаачид цөлийн бичил биетнүүдийн хуурай нөхцөлд дасан зохицсон давуу талыг нь ашиглаж хуурай бүс нутгийн хөрсийг нөхөн сэргээхэд ашиглах боломжийг судалж байна. Мөн тухайн сэргээх газартай ойролцоо эрүүл хөрснөөс ялгасан бичил биетнийг мөн ашиглаж болно. Ингэснээр тухайн орчинд дасан зохицсон байгалийн микробиотад дарангуйлагдах магадлалыг багасгана [71]. Өөр нэг арга нь хэд хэдэн бичил биетний холимог өсгөврийг хэрэглэх бөгөөд энэ нь дан өсгөвөр хэрэглэснээс илүү амьдрах чадвартай байх магадлалтай. Мөн бэхжүүлсэн бичил биетнүүд биологийн идэвх илүү өндөр учир илүү дүн үзүүлэх боломжтой [118].

Экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетнүүдийг байгалийн хөрсөнд шууд инокуляци хийхтэй холбоотой өөр нэг санаа зовоодог асуудал нь байгалийн бичил биетний бүлгэмдэл гадны хүчин зүйлийн нөлөөнд яаж хариу үзүүлдэг талаар хангалттай мэдлэг байхгүйтэй холбоотой. Инокулянт бичил биетэн байгалийн бичил биетний бүлгэмдлийг өөрчлөх эрсдэлтэй [71]. Амьд эсийг хэрэглэхтэй холбоотой эрсдлээс сэргийлэхийн тулд үхсэн эсийн биомассыг экзополимерийн хамт хэрэглэж болно [118]. Мөн бичил биетний өсгөврөөс нийт экзополимерийг эсвэл түүний полисахарид болон уургийн бүрэлдэхүүнийг ялгаж хэрэглэх нь энэ эрсдлээс сэргийлнэ. Энэ нь тоног төхөөрөмж, ажиллах хүчинтэй холбоотой тодорхой хэмжээний өртөг нэмэх боловч химийн нийлэгжлийн аргаар полимер нийлэгжүүлэхээс хямд өртөгтэй [137]. Түүнчлэн төрөл бүрийн арга ашиглан бичил биетний экзополимерийн гарцыг нэмэгдүүлэх замаар эдгээр зардлыг багасгах боломжтой. Жишээ нь бичил биетнийг өсгөвөрлөх хугацаа болон нөхцөлийг өөрчлөх болон органик хаягдал ашиглан зардлаа бууруулж болно [138]–[140]. Нэг болон түүнээс дээш биосинтезийн генийн экспрессийг нэмэгдүүлэх замаар экзополисахаридын гарцыг сайжруулах метаболик инженерингийн арга мөн ашиглаж болно [20]. Энэ мэтчилэн экзополимерт суурилсан өөр өөр техникүүд үнэ өртөг, үр дүн, аюулгүй байдлын хувьд ялгаатай болохыг **3-р зураг**т хялбаршуулан харуулав.

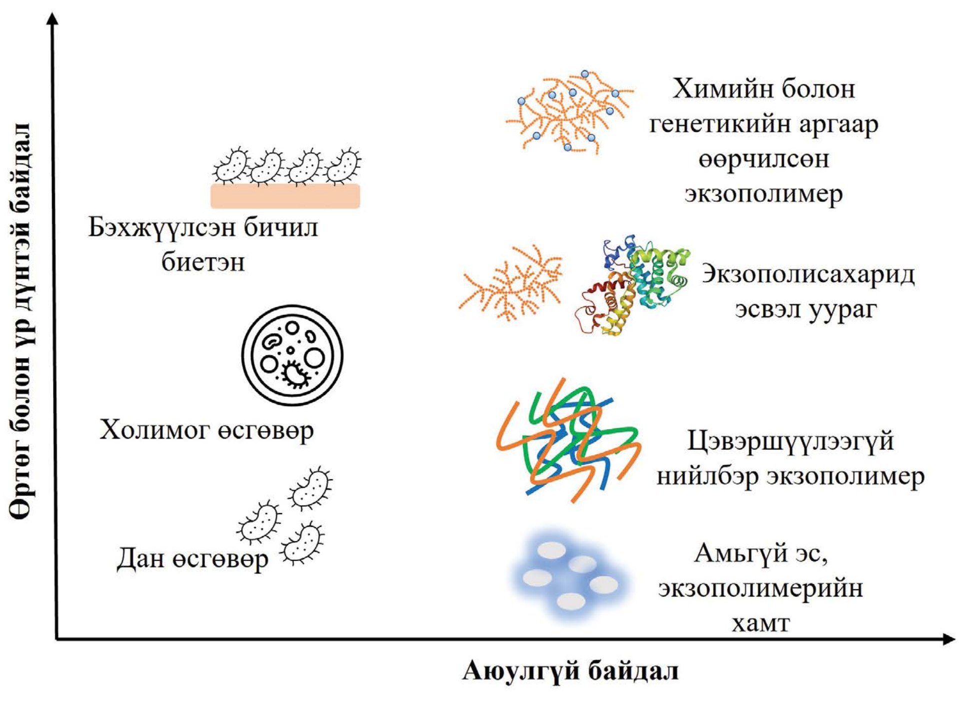
5.2 Бичил биетний экзополимерийн бүтэц, идэвхийн хамаарал

Экзополимерийн найрлага, химийн бүтэц нь тэдгээрийн идэвх, үйл ажиллагаанд чухал нөлөө үзүүлдэг. Гэвч хөрсний нөхөн сэргээлтэд экзополимерийг ашиглах судалгаанууд тэдгээрийн бүтэц, идэвхийг уялдуулах тал дээр анхаарлаа бага хандуулж байна. Мөн экзополимерийг байгалийн хөрсөнд хэрэглэхдээ концентрацийг нь анхаарах хэрэгтэй. Тухайлбал, ксантаныг хөрсний ус барих чадварыг нэмэгдүүлэх болон тоос дэгдэлтийг багасгахад ашиглах боломжтой. Харин концетрацийг нь тохируулаагүй тохиолдолд хөрсний нүх сүвийг бөглөж, хөрсийг дагтаршуулан ургамлын ургалт, үр соёололтод сөргөөр нөлөөлөх магадлалтай [56]. Тиймээс экзополимерийг хөрсөнд хэрэглэх зорилгоос хамааруулж түүний химийн бүтцийг судалж, концентрацийг туршиж тохируулах нь зүйтэй.

Бичил биетний экзополимерийн молекул бүтцийг үйл ажиллагаатай нь уялдуулснаар хөрсний нөхөн сэргээлтийн үр дүн сайжрах, мөн тухайн хэрэглээнд шаардагдах экзополимерийн хэмжээ буурах боломжтой. Тухайн хэрэглээнд нь уялдсан бүтэц бүхий бичил биетний экзополимерийг эрж хайхаас гадна, түгээмэл олддог экзополимерийн бүтцийг өөрчилж болно [137]. Экзополимерийн функциональ бүлгүүдийг ацетилжүүлэх, метилжүүлэх, фосфоржуулах гэх мэт модификаци нь тэдгээрийн бусад молекултай харилцан үйлчлэлцэх зүй тогтлыг өөрчилдөг [118]. Экзополимерийн бүтцийг өөрчлөх нэг арга нь химийн арга юм. Өөр нэг арга нь генетик инженерчлэл бөгөөд судлаачид энэ аргаар экзополисахаридын химийн шинж чанарыг амжилттай өөрчилсөн жишээнүүд бий. Тухайлбал, ксантаны бүтцэд ацетил, пируват бүлгийн зүй тогтол болон салбарласан бүтцийг өөрчилсөн байна. Мөн *Acetobacter xylitum*-ийн ацетаны зуурамтгай чанарыг мутагенез ашиглан нэмэгдүүлжээ [141].

5.3 Хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн экзополимерийн шинж чанарыг тодорхойлохтой холбоотой хүндрэлүүд

Бичил биетний өсгөврөөс ялгасан экзополимерийн бүтэц, найрлагыг тодорхойлох арга зүй хангалттай зүгширсэн хэдий ч хөрснөөс шууд



3-р зураг. Өртөг, үр дүнтэй байдал, аюулгүй байдлаас хамаарсан хэд хэдэн төрлийн экзополимерт суурилсан аргууд байдаг болохыг хялбаршуулан харуулсан байдал (энэхүү зураг нь бодит тооцоонд тулгуурлаж хийгдээгүй болохыг анхаарна уу) ялгасан буюу хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн экзополимерийн бүрэлдэхүүн, бүтэц, найрлагыг тодорхойлоход хүндрэлтэй хэвээр байна. Төрөл бүрийн шинж чанар бүхий хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн экзополимерийн онцлог шинж чанарыг тодорхойлсноор хөрсний эрүүл төлөв байдалд ямар үүрэгтэйг тодорхойлохоос гадна, экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашиглах явцад чухал ач холбогдолтой.

Өнөөг хүртэл хийгдэж буй судалгаанууд голдуу экзополимерийн голлох бүрэлдэхүүн буюу полисахарид, уургийн хэмжээг тодорхойлохоор хязгаарлагдаж байна. Полисахарид, уургийн шинж чанарыг тодорхойлох түгээмэл аргууд болох NMR, масс спектрометрийн хөрсний экзополимерийг судлахад ашиглахад хүндрэлтэй. Учир нь эдгээр аргаар хэрэгтэй мэдээллээ гаргаж авахын тулд хөрснөөс ялгасан экзополимерийг фракцлах, цэвэршүүлэх олон шат шаардагдана. Иймээс судлаачид төрөл бүрийн хөрсний экзополимерийн шинж чанарыг ерөнхийд нь харьцуулахын тулд илүү хялбар арга хэрэглэхийг илүүд үзэж байна. Тухайлбал, сүүлийн үеийн зарим судалгаанд лаг, биофильмээс ялгасан экзополимерийг гурван хэмжээст флуоресценцийн спектрийн аргаар судлах болсон [142] бөгөөд энэ аргыг хөрсний усанд уусдаг органик нэгдэл, гломалины төрлийн хөрсний уургуудыг судлахад мөн ашиглаж байна [143], [35].

Хөрсний бичил биетнийг өсгөвөрлөхгүйгээр судлах буюу өсгөвөрлөлтөөс үл хамаарах арга нь өөр өөр хөрсөнд агуулагдаж экзополимер нийлэгжүүлэгч бичил биетний олон янз байдлыг судлах боломж олгож байна. Метагеномиксийн арга ашигласан саяхны судалгаа хөрсний дээд үеийн биокрастад экзополисахарид болон липополисахаридын биосинтезэд оролцогч генүүд голдуу *Alphaproteobacteria*, тухайлбал *Acidobacteria* болон *Cyanobacteria* эсвэл *Chloroflexi*-д хамааралтай байсан бол биокрастын доод үеийн хөрсөнд эдгээр ген нь голдуу *Betaproteobacteria*-ийн ангийн бактерид агуулагдаж байгааг харуулсан байна [144]. Мөн метагеномиксийн арга нь шинэ эсвэл хөрсний нөхөн сэргээлтэд чухал ач холбогдолтой экзополимерийн бионийлэгжилд оролцдог генүүдийг нээн илрүүлэхэд чухал үүрэг гүйцэтгэж болох юм.

6. Дүгнэлт

Эцэст нь дүгнэхэд, газрын доройтол нь уур амьсгалын өөрчлөлтийн нөлөөгөөр нэмэгдэж байгаагийн дээр хүлэмжийн хийн ялгаруулж уур амьсгалын өөрчлөлтөд нөлөөлдөг. Хөрс нь хуурай газар дээрх хамгийн том нүүрстөрөгчийн нөөцийг агуулдаг [145] учраас хөрсний органик нүүрстөрөгчийн тогтвортой байдлыг хадгалахад анхаарлаа хандуулах нь зүйтэй. Бичил биетний экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлтэд ашигласнаар хөрсний органик нэгдлийн задралыг багасгаж, хөрсөнд нүүрстөрөгч хуримтлуулах хүчин чармайлтад хувь нэмэр оруулна гэж итгэж байна. Үүний зэрэгцээ, бичил биетний экзополимер нь хөрс бохирдуулагч нэгдлүүдийг иммобиляцид оруулснаар гүний ус болон тариалангийн бүтээгдэхүүний бохирдлыг бууруулахад тусална. Тиймээс бичил биетний экзополимерийг хөрсний нөхөн сэргээлт, ремедиацад ашиглах байгаль орчинд ээлтэй, тогтвортой, өртөг багатай технологи болгон хөгжүүлэх боломжтой.

Талархал

Энэхүү ажил нь Олон Улсын Шинжлэх Ухааны байгууллагуудын санхүүжилттэй Холбооны хамтарсан судалгааны төслөөс (ANSO-CR-PP-2021-09) санхүүжсэн.

Ашигласан материал

[1] IPCC, "Climate Change and Land: An IPCC Special Report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems" [P.R. Shukla, *et al*., (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 2019. 896 pp. https://doi.org/10.1017/9781009157988.

[2] K. Timmis *et al.*, "The urgent need for microbiology literacy in society," *Environmental Microbiology*, vol. 21, no. 5. Blackwell Publishing Ltd, pp. 1513–1528, May 01, 2019. https://doi.org/10.1111/1462-2920.14611.

[3] A. Lehmann, W. Zheng, and M. C. Rillig, "Soil biota contributions to soil aggregation," *Nat Ecol Evol*, vol. 1, no. 12, pp. 1828–1835, Dec. 2017, https://doi.org/10.1038/s41559-017-0344-y.

[4] S. Rebello, V. K. Nathan, R. Sindhu, P. Binod, M. K. Awasthi, and A. Pandey, "Bioengineered microbes for soil health restoration: present status and future," *Bioengineered*, vol. 12, no. 2. Taylor and Francis Ltd., pp. 12839–12853, 2021. https://doi.org/10.1080/21655979.2021.2004645.

[5] N. Rodríguez Eugenio, M. J. McLaughlin, and D. J. Pennock, "*Soil pollution: a hidden reality*" 2018, Rome. FAO,142 pp.

[6] J. Pichtel, "Biofilms for remediation of xenobiotic hydrocarbons -a technical review," in *Biofilms in Plant and Soil Health*, F. M. Husain and I. Ahmad, Eds., Wiley, 2017, pp. 357–385. https://doi.org/10.1002/9781119256329

[7] S. Das and H. R. Dash, “Microbial bioremediation: a potential tool for rRestoration of contaminated areas,” in *Microbial Biodegradation and Bioremediation*, Elsevier Inc., 2014, pp. 2–21. https://doi.org/10.1016/B978-0-12-800021-2.00001-7.

[8] J. K. Jansson and K. S. Hofmockel, “Soil microbiomes and climate change,” *Nat Rev Microbiol*, vol. 18, Nature Publishing Group, pp. 34–46, 2020. https://doi.org/10.1038/s41579.

[9] M. L. Saccá, A. Barra Caracciolo, M. Di Lenola, and P. Grenni, “Ecosystem services provided by soil microorganisms,” in *Soil Biological Communities and Ecosystem Resilience*, Springer International Publishing, 2017, pp. 9–24. https://doi.org/10.1007/978-3-319-63336-7_2.

[10] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, “Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation,” *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, no. JUL. Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[11] E. Rabot, M. Wiesmeier, S. Schlüter, and H. J. Vogel, “Soil structure as an indicator of soil functions: A review,” *Geoderma*, vol. 314. Elsevier B.V., pp. 122–137, Mar. 15, 2018. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.009.

[12] K. Mehta, A. Shukla, and M. Saraf, “Articulating the exuberant intricacies of bacterial exopolysaccharides to purge environmental pollutants,” *Heliyon*, vol. 7, no. 11. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08446.

[13] M. C. S. Barcelos, K. A. C. Vespermann, F. M. Pelissari, and G. Molina, “Current status of biotechnological production and applications of microbial exopolysaccharides,” *Critical Reviews in Food Science and Nutrition*, vol. 60, no. 9. Taylor and Francis Inc., pp. 1475–1495, May 14, 2020. https://doi.org/10.1080/10408398.2019.1575791.

[14] L. Huang *et al.*, “A Review of the Role of Extracellular Polymeric Substances (EPS) in Wastewater Treatment Systems,” *International Journal of Environmental Research and Public Health*, vol. 19, no. 19. MDPI, Oct. 01, 2022. https://doi.org/10.3390/ijerph191912191.

[15] F. Freitas, V. D. Alves, and M. A. M. Reis, “Advances in bacterial exopolysaccharides: From production to biotechnological applications,” *Trends in Biotechnology*, vol. 29, no. 8. pp. 388–398, Aug. 2011. https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2011.03.008.

[16] T. T. More, J. S. S. Yadav, S. Yan, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, “Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications,” *Journal of Environmental Management*, vol. 144. Academic Press, pp. 1–25, Nov. 01, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010.

[17] C. Núñez, L. López-Pliego, C. L. Ahumada-Manuel, and M. Castañeda, “Genetic regulation of alginate production in Azotobacter vinelandii a bacterium of biotechnological interest: a mini-review,” *Frontiers in Microbiology*, vol. 13. Frontiers Media S.A., Mar. 23, 2022. https://doi.org/10.3389/fmicb.2022.845473.

[18] F. Donot, A. Fontana, J. C. Baccou, and S. Schorr-Galindo, “Microbial exopolysaccharides: Main examples of synthesis, excretion, genetics and extraction,” *Carbohydrate Polymers*, vol. 87, no. 2. Elsevier Ltd, pp. 951–962, Jan. 15, 2012. https://doi.org/10.1016/j.carbpol.2011.08.083.

[19] S. Acosta-jurado, F. Fuentes-romero, J. E. Ruiz-sainz, M. Janczarek, and J. M. Vinardell, “Rhizobial exopolysaccharides: Genetic regulation of their synthesis and relevance in symbiosis with legumes,” *Int J Mol Sci*, vol. 22, no. 12, Jun. 2021, https://doi.org/10.3390/ijms22126233.

[20] S. B. Pereira *et al.*, “Strategies to obtain designer polymers based on cyanobacterial extracellular polymeric substances (EPS),” *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 20, no. 22. MDPI AG, Nov. 02, 2019. https://doi.org/10.3390/ijms20225693.

[21] Iqbal Ahmad, Mohammad Shavez Khan, Mohd Musheer Altaf, Faizan Abul Qais, Firoz Ahmad Ansari, and Kendra P. Rumbaugh, “Biofilms: An Overview of Their Significance in Plant and Soil Health,” in *Biofilms in Plant and Soil Health*, F. M. Husain and I. Ahmad, Eds., Wiley, 2017. pp. 1–25, https://doi.org/10.1002/9781119256329.

[22] J. Wingender, Thomas, R. Neu, and Hans-Curt Flemming, “What are Bacterial Extracellular Polymeric Substances,” in *Microbial Extracellular Polymeric Substances*, J. Wingender *et al*., (eds.), Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1999. pp. 1–19

[23] P. Di Martino, “Extracellular polymeric substances, a key element in understanding biofilm phenotype,” *AIMS Microbiol*, vol. 4, no. 2, pp. 274–288, 2018, https://doi.org/10.3934/microbiol.2018.2.274.

[24] Y. Wu *et al.*, “Soil biofilm formation enhances microbial community diversity and metabolic activity,” *Environ Int*, vol. 132, Nov. 2019, https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105116.

[25] Y. Jiao *et al.*, “Characterization of extracellular polymeric substances from acidophilic microbial biofilms,” *Appl Environ Microbiol*, vol. 76, no. 9, pp. 2916–2922, May 2010, https://doi.org/10.1128/AEM.02289-09.

[26] A. Pandit, A. Adholeya, D. Cahill, L. Brau, and M. Kochar, “Microbial biofilms in nature: unlocking their potential for agricultural applications,” *Journal of Applied Microbiology*, vol. 129, no. 2. John Wiley and Sons Inc, pp. 199–211, Aug. 01, 2020. https://doi.org/10.1111/jam.14609.

[27] H. Yildiz and N. Karatas, “Microbial exopolysaccharides: Resources and bioactive properties,” *Process Biochemistry*, vol. 72. Elsevier Ltd, pp. 41–46, Sep. 01, 2018. https://doi.org/10.1016/j.

procbio.2018.06.009.

[28] M. Irfan, M. Zaheer, S. Shahid Imran Bukhari, M. Hassan Abbasi, and S. Javed, "Bacterial Exopolysaccharides: sources, production and applications." Biologia (Pakistan), ISSN 2313-206X (On-Line), vol. 65, 2019.

[29] A. Mishra and B. Jha, "Microbial exopolysaccharides," in *The Prokaryotes: Applied Bacteriology and Biotechnology*, vol. 9783642313318, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2013, pp. 179–192. https://doi.org/10.1007/978-3-642-31331-8_25.

[30] S. Rana and L. S. B. Upadhyay, "Microbial exopolysaccharides: Synthesis pathways, types and their commercial applications," *Int J Biol Macromol*, vol. 157, pp. 577–583, Aug. 2020, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.04.084.

[31] K. V. Madhuri and K. Vidya Prabhakar, "Microbial exopolysaccharides: Biosynthesis and potential applications," *Oriental Journal of Chemistry*, vol. 30, no. 3, pp. 1401–*1410, 2014,* https://doi.org/10.13005/ojc/300362.

[32] U. Halder, K. Mazumder, K. J. Kumar, and R. Bandopadhyay, "Structural insight into a glucomannan-type extracellular polysaccharide produced by a marine Bacillus altitudinis SORB11 from Southern Ocean," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, https://doi.org/10.1038/s41598-022-20822-3.

[33] M. Tartaglia, F. Bastida, R. Sciarrillo, and C. Guarino, "Soil metaproteomics for the study of the relationships between microorganisms and plants: A review of extraction protocols and ecological insights," *Int J Mol Sci*, vol. 21, no. 22, pp. 1–20, Nov. 2020, https://doi.org/10.3390/ijms21228455.

[34] Y. Li, J. Xu, J. Hu, T. Zhang, X. Wu, and Y. Yang, "Arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin play a crucial role in soil aggregate stability in Pb-contaminated soil," *Int J Environ Res Public Health*, vol. 19, no. 9, May 2022, https://doi.org/10.3390/ijerph19095029.

[35] Q. Wang *et al.*, "Spatial variations in concentration, compositions of glomalin related soil protein in poplar plantations in northeastern China, and possible relations with soil physicochemical properties," *The Scientific World Journal*, vol. 2014, 2014, https://doi.org/10.1155/2014/160403.

[36] X. N. Guo, Y. Hao, X. L. Wu, X. Chen, and C. Y. Liu, "Exogenous easily extractable glomalin-related soil protein stimulates plant growth by regulating tonoplast intrinsic protein expression in lemon," *Plants*, vol. 12, no. 16, Aug. 2023, https://doi.org/10.3390/plants12162955.

[37] W. Wang, Z. Zhong, Q. Wang, H. Wang, Y. Fu, and X. He, "Glomalin contributed more to carbon, nutrients in deeper soils, and differently associated with climates and soil properties in vertical profiles," *Sci Rep*, vol. 7, no. 1, Dec. 2017, https://doi.org/10.1038/s41598-017-12731-7.

[38] X. Zhou *et al.*, "Characterization of different molecular size fractions of glomalin-related soil protein from forest soil and their interaction with phenanthrene," *Front Microbiol*, vol. 12, Feb. 2022, https://doi.org/10.3389/fmicb.2021.822831.

[39] M. A. Redmile-Gordon, P. C. Brookes, R. P. Evershed, K. W. T. Goulding, and P. R. Hirsch, "Measuring the soil-microbial interface: Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from soil biofilms," *Soil Biol Biochem*, vol. 72, pp. 163–171, May 2014, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2014.01.025.

[40] A. W. Gillespie *et al.*, "Glomalin-related soil protein contains non-mycorrhizal-related heat-stable proteins, lipids and humic materials," *Soil Biol Biochem*, vol. 43, no. 4, pp. 766–777, Apr. 2011, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.12.010.

[41] M. Redmile-Gordon and L. Chen, "Zinc toxicity stimulates microbial production of extracellular polymers in a copiotrophic acid soil," *Int Biodeterior Biodegradation*, vol. 119, pp. 413–418, Apr. 2017, https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2016.10.004.

[42] M. Redmile-Gordon, A. S. Gregory, R. P. White, and C. W. Watts, "Soil organic carbon, extracellular polymeric substances (EPS), and soil structural stability as affected by previous and current land-use," *Geoderma*, vol. 363, Apr. 2020, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114143.

[43] M. A. Redmile-Gordon, R. P. Evershed, P. R. Hirsch, R. P. White, and K. W. T. Goulding, "Soil organic matter and the extracellular microbial matrix show contrasting responses to C and N availability," *Soil Biol Biochem*, vol. 88, pp. 257–267, Sep. 2015, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2015.05.025.

[44] S. Wang *et al.*, "Extraction of extracellular polymeric substances (EPS) from red soils (Ultisols)," *Soil Biol Biochem*, vol. 135, pp. 283–285, Aug. 2019, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2019.05.014.

[45] I. Ahmad, M. S. Khan, M. M. Altaf, F. A. Qais, F. A. Ansari, and K. Rumbaugh, "Biofilms: An Overview of Their Significance in Plant and Soil Health," in *Biofilms in Plant and Soil Health*, I. Ahmad and F. M. Husain, Eds., 2017, pp. 1–25.

[46] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, "Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[47] M. Zhang, P. Cai, Y. Wu, C. Gao, J. Liu, and Q. Huang, "Bacterial Extracellular Polymeric Substances: From the Perspective of Soil Ecological Functions," *Acta Pedologica Sinica*, vol. 59, no. 2, pp. 308–323, 2022, https://doi.org/10.11766/trxb202107310271.

[48] F. Salimi and P. Farrokh, "Recent advances in the biological activities of microbial exopolysaccharides,"

World Journal of Microbiology and Biotechnology, vol. 39, no. 8. Springer Science and Business Media B.V., Aug. 01, 2023. https://doi.org/10.1007/s11274-023-03660-x.

[49] D. M. Mager and A. D. Thomas, "Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes," *J Arid Environ*, vol. 75, no. 2, pp. 91–97, Feb. 2011, https://doi.org/10.1016/J.JARIDENV.2010.10.001.

[50] M. D. V. B. Figueiredo, A. Bonifacio, A. C. Rodrigues, F. F. de Araujo, and N. P. Stamford, "Beneficial microorganisms: Current challenge to increase crop performance," in *Bioformulations: For Sustainable Agriculture*, Springer International Publishing, 2016, pp. 53–70. https://doi.org/10.1007/978-81-322-2779-3_3.

[51] M. Albareda, D. N. Rodríguez-Navarro, M. Camacho, and F. J. Temprano, "Alternatives to peat as a carrier for rhizobia inoculants: Solid and liquid formulations," *Soil Biol Biochem*, vol. 40, no. 11, pp. 2771–2779, Nov. 2008, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2008.07.021.

[52] K. Mehta, A. Shukla, and M. Saraf, "Articulating the exuberant intricacies of bacterial exopolysaccharides to purge environmental pollutants," *Heliyon*, vol. 7, no. 11. Elsevier Ltd, Nov. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2021.e08446.

[53] I. Saha, S. Datta, and D. Biswas, "Exploring the role of bacterial extracellular polymeric substances for sustainable development in agriculture," *Current Microbiology*, vol. 77, no. 11. Springer, pp. 3224–3239, Nov. 01, 2020. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02169-y.

[54] T. Siddharth, P. Sridhar, V. Vinila, and R. D. Tyagi, "Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 287. Academic Press, Jun. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112307.

[55] K. Velmourougane, S. Thapa, and R. Prasanna, "Prospecting microbial biofilms as climate smart strategies for improving plant and soil health: A review," *Pedosphere*, vol. 33, no. 1, pp. 129–152, Feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.pedsph.2022.06.037.

[56] T. Berninger, N. Dietz, and Ó. González López, "Water-soluble polymers in agriculture: xanthan gum as eco-friendly alternative to synthetics," *Microbial Biotechnology*. John Wiley and Sons Ltd, 2021. https://doi.org/10.1111/1751-7915.13867.

[57] C. Chenu and A. M. Jaunet, "Cryo-scanning electron microscopy of microbial extracellular polysaccharides and their association with minerals," OFAMS, Inc, 1992.

[58] N. Amellal, F. Bartoli, G. Villemin, A. Talouizte, and T. Heulin, "Effects of inoculation of EPS-producing Pantoea agglomerans on wheat rhizosphere aggregation," 1999.

[59] P. Benard *et al.*, "Microhydrological Niches in Soils: How mucilage and eps alter the biophysical properties of the rhizosphere and other biological hotspots," *Vadose Zone Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 1–10, Jan. 2019, https://doi.org/10.2136/vzj2018.12.0211.

[60] Y. Sher *et al.*, "Microbial extracellular polysaccharide production and aggregate stability controlled by switchgrass (Panicum virgatum) root biomass and soil water potential," *Soil Biol Biochem*, vol. 143, Apr. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107742.

[61] J. C. Blankinship, S. J. Fonte, J. Six, and J. P. Schimel, "Plant versus microbial controls on soil aggregate stability in a seasonally dry ecosystem," *Geoderma*, vol. 272, pp. 39–50, Jun. 2016, https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.03.008.

[62] Y. Wu *et al.*, "Soil biofilm formation enhances microbial community diversity and metabolic activity," *Environ Int*, vol. 132, Nov. 2019, https://doi.org/10.1016/j.envint.2019.105116.

[63] C. Cheng, W. Shang-Guan, L. He, and X. Sheng, "Effect of exopolysaccharide-producing bacteria on water-stable macro-aggregate formation in soil," *Geomicrobiol J*, vol. 37, no. 8, pp. 738–745, Jul. 2020, https://doi.org/10.1080/01490451.2020.1764677.

[64] P. Deka *et al.*, "Bacterial exopolysaccharide promotes acid tolerance in Bacillus amyloliquefaciens and improves soil aggregation," *Mol Biol Rep*, vol. 46, no. 1, pp. 1079–1091, Feb. 2019, https://doi.org/10.1007/s11033-018-4566-0.

[65] A. L. Godinho and S. Bhosle, "Sand aggregation by exopolysaccharide-producing Microbacterium arborescens - AGSB," *Curr Microbiol*, vol. 58, no. 6, pp. 616–621, Jun. 2009, https://doi.org/10.1007/s00284-009-9400-4.

[66] R. Nisha, B. Kiran, A. Kaushik, and C. P. Kaushik, "Bioremediation of salt affected soils using cyanobacteria in terms of physical structure, nutrient status and microbial activity," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 15, no. 3, pp. 571–580, Mar. 2018, https://doi.org/10.1007/s13762-017-1419-7.

[67] F. K. Olagoke *et al.*, "Importance of substrate quality and clay content on microbial extracellular polymeric substances production and aggregate stability in soils," *Biol Fertil Soils*, vol. 58, no. 4, pp. 435–457, May 2022, https://doi.org/10.1007/s00374-022-01632-1.

[68] C. Xu, S. Zhang, C. ying Chuang, E. J. Miller, K. A. Schwehr, and P. H. Santschi, "Chemical composition and relative hydrophobicity of microbial exopolymeric substances (EPS) isolated by anion exchange chromatography and their actinide-binding affinities," *Mar Chem*, vol. 126, no. 1–4, pp. 27–36, Sep. 2011, https://doi.org/10.1016/j.marchem.2011.03.004.

[69] S. Zhang *et al.*, "Enhancing soil aggregation and acetamiprid adsorption by ecofriendly polysaccharides hydrogel based on Ca2+- amphiphilic sodium

alginate," *J Environ Sci (China)*, vol. 113, pp. 55–63, Mar. 2022, https://doi.org/10.1016/j.jes.2021.05.042.
[70] D. M. Mager and A. D. Thomas, "Extracellular polysaccharides from cyanobacterial soil crusts: A review of their role in dryland soil processes," *Journal of Arid Environments*, vol. 75, no. 2. pp. 91–97, Feb. 2011. https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2010.10.001.
[71] R. Marasco, J. B. Ramond, M. W. Van Goethem, F. Rossi, and D. Daffonchio, "Diamonds in the rough: Dryland microorganisms are ecological engineers to restore degraded land and mitigate desertification," *Microb Biotechnol*, 2023, https://doi.org/10.1111/1751-7915.14216.
[72] I. Saha, S. Datta, and D. Biswas, "Exploring the role of bacterial extracellular polymeric substances for sustainable development in agriculture," *Current Microbiology*, vol. 77, no. 11. Springer, pp. 3224–3239, Nov. 01, 2020. https://doi.org/10.1007/s00284-020-02169-y.
[73] T. Siddharth, P. Sridhar, V. Vinila, and R. D. Tyagi, "Environmental applications of microbial extracellular polymeric substance (EPS): A review," *Journal of Environmental Management*, vol. 287. Academic Press, Jun. 01, 2021. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112307.
[74] S.-M. Ham, I. Chang, D.-H. Noh, T.-H. Kwon, and B. Muhunthan, "Improvement of Surface Erosion Resistance of Sand by Microbial Biopolymer Formation," *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, vol. 144, no. 7, Jul. 2018, https://doi.org/10.1061/(asce)gt.1943-5606.0001900.
[75] G. Colica, H. Li, F. Rossi, D. Li, Y. Liu, and R. De Philippis, "Microbial secreted exopolysaccharides affect the hydrological behavior of induced biological soil crusts in desert sandy soils," *Soil Biol Biochem*, vol. 68, pp. 62–70, Jan. 2014, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.09.017.
[76] N. Wu, H. X. Pan, D. Qiu, and Y. M. Zhang, "Feasibility of EPS-producing bacterial inoculation to speed up the sand aggregation in the Gurbantunggut Desert, Northwestern China," *J Basic Microbiol*, vol. 54, no. 12, pp. 1378–1386, Dec. 2014, https://doi.org/10.1002/jobm.201400355.
[77] M. Li, Y. Zhao, S. Bian, J. Qiao, X. Hu, and S. Yu, "A green, environment-friendly, high-consolidation-strength composite dust suppressant derived from xanthan gum", https://doi.org/10.1007/s11356-021-16258-3/Published.
[78] T. Lee *et al.*, "Environmentally Friendly Methylcellulose-Based Binders for Active and Passive Dust Control," *ACS Appl Mater Interfaces*, vol. 12, no. 45, pp. 50860–50869, Nov. 2020, https://doi.org/10.1021/acsami.0c15249.
[79] J. Yan *et al.*, "Synthesis and performance measurement of a modified polymer dust suppressant," *Advanced Powder Technology*, vol. 31, no. 2, pp. 792–803, Feb. 2020, https://doi.org/10.1016/j.apt.2019.11.033.
[80] J. L. Sieger, B. G. Lottermoser, and J. Freer, "Effectiveness of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Results from Wind Tunnel and Penetrometer Testing," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 13, no. 7, Apr. 2023, https://doi.org/10.3390/app13074158.
[81] H. Fatehi, D. E. L. Ong, J. Yu, and I. Chang, "The Effects of Particle Size Distribution and Moisture Variation on Mechanical Strength of Biopolymer-Treated Soil," *Polymers (Basel)*, vol. 15, no. 6, Mar. 2023, https://doi.org/10.3390/polym15061549.
[82] J. L. Sieger, B. G. Lottermoser, and J. Freer, "Effectiveness of Protein and Polysaccharide Biopolymers as Dust Suppressants on Mine Soils: Large-Scale Field Trials," *Mining*, vol. 3, no. 3, pp. 428–462, Jul. 2023, https://doi.org/10.3390/mining3030026.
[83] M. Dagliya, N. Satyam, and A. Garg, "Biopolymer based stabilization of Indian desert soil against wind-induced erosion," *Acta Geophysica*, vol. 71, no. 1, pp. 503–516, Feb. 2023, https://doi.org/10.1007/s11600-022-00905-5.
[84] T. T. More, J. S. S. Yadav, S. Yan, R. D. Tyagi, and R. Y. Surampalli, "Extracellular polymeric substances of bacteria and their potential environmental applications," *Journal of Environmental Management*, vol. 144. Academic Press, pp. 1–25, Nov. 01, 2014. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.05.010.
[85] S. Ghatak, S. Manna, and D. Roy, "First-Order Assessment of the Influence of Three EPS and Calcite-Producing Microbes Isolated from a Cemented Sand Site on Soil Shear Strength," *Geomicrobiol J*, vol. 32, no. 9, pp. 761–770, Oct. 2015, https://doi.org/10.1080/01490451.2014.981646.
[86] S. H. Sadeghi, A. Jafarpoor, M. Homaee, and B. Zarei Darki, "Changeability of rill erosion properties due to microorganism inoculation," *Catena (Amst)*, vol. 223, Apr. 2023, https://doi.org/10.1016/j.catena.2023.106956.
[87] V. K. Shanmugam and V. R. Rangamaran, "Microbial Calcification: An insight into carbonate precipitation and its emerging influence in diverse applications," *Am. J. PharmTech Res*, vol. 8, no. 4, 2018, [Online]. Available: www.ajptr.com
[88] E. B. Roberson' And and M. K. Firestone2, "Relationship between desiccation and exopolysaccharide production in a soil Pseudomonas sp," 1992. [Online]. Available: https://journals.asm.org/journal/aem
[89] W. S. Chang, M. Van De Mortel, L. Nielsen, G. N. De Guzman, X. Li, and L. J. Halverson, "Alginate production by Pseudomonas putida creates a hydrated microenvironment and contributes to biofilm architecture and stress tolerance under water-limiting

conditions," in *Journal of Bacteriology*, Nov. 2007, pp. 8290–8299. https://doi.org/10.1128/JB.00727-07.

[90] R. Tecon and D. Or, "Biophysical processes supporting the diversity of microbial life in soil," *FEMS Microbiology Reviews*, vol. 41, no. 5. Oxford University Press, pp. 599–623, Sep. 01, 2017. https://doi.org/10.1093/femsre/fux039.

[91] P. Benard, S. Bickel, A. Kaestner, P. Lehmann, and A. Carminati, "Extracellular polymeric substances from soil-grown bacteria delay evaporative drying," *Adv Water Resour*, vol. 172, Feb. 2023, https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2022.104364.

[92] D. Or, S. Phutane, and A. Dechesne, "Extracellular polymeric substances affecting pore-scale hydrologic conditions for bacterial activity in unsaturated soils," *Vadose Zone Journal*, vol. 6, no. 2, pp. 298–305, May 2007, https://doi.org/10.2136/vzj2006.0080.

[93] Y. S. Guo *et al.*, "Bacterial extracellular polymeric substances amplify water content variability at the pore scale," *Front Environ Sci*, vol. 6, no. SEP, Sep. 2018, https://doi.org/10.3389/fenvs.2018.00093.

[94] M. Brax, C. Buchmann, and G. E. Schaumann, "Review article biohydrogel induced soil-water interactions: How to untangle the gel effect? A review," *Zeitschrift fur Pflanzenernahrung und Bodenkunde*, vol. 180, no. 2. Wiley-VCH Verlag, pp. 121–141, Apr. 01, 2017. https://doi.org/10.1002/jpln.201600453.

[95] H. Zhang, J. Bian, H. Wan, N. Wei, and Y. Ma, "Soil–water characteristic curves of extracellular polymeric substances-affected soils and sensitivity analyses of correlated parameters," *Water Sci Technol Water Supply*, vol. 21, no. 3, pp. 1323–1333, May 2021, https://doi.org/10.2166/ws.2020.377.

[96] R. Rosenzweig, U. Shavit, and A. Furman, "Soil phvsics water retention curves of biofilm-affected soils using xanthan as an analogue", https://doi.org/10.2136/sssai.

[97] G. E. Schaumann, B. Braun, D. Kirchner, W. Rotard, U. Szewzyk, and E. Grohmann, "Influence of biofilms on the water repellency of urban soil samples," *Hydrol Process*, vol. 21, no. 17, pp. 2276–2284, Aug. 2007, https://doi.org/10.1002/hyp.6746.

[98] P. Cai *et al.*, "Soil biofilms: microbial interactions, challenges, and advanced techniques for ex-situ characterization," *Soil Ecology Letters*, vol. 1, no. 3–4. Springer Nature, pp. 85–93, Dec. 01, 2019. https://doi.org/10.1007/s42832-019-0017-7.

[99] J. H. T. Zethof *et al.*, "Prokaryotic community composition and extracellular polymeric substances affect soil microaggregation in carbonate containing semiarid grasslands," *Front Environ Sci*, vol. 8, Jun. 2020, https://doi.org/10.3389/fenvs.2020.00051.

[100] R. Cao *et al.*, "Exopolysaccharide-producing bacteria enhanced Pb immobilization and influenced the microbiome composition in rhizosphere soil of pakchoi (Brassica chinensis L.)," *Front Microbiol*, vol. 14, 2023, https://doi.org/10.3389/fmicb.2023.1117312.

[101] G. Z. De Caire, M. S. De Cano, R. M. Palma, and C. Z. De Mulé, "Changes in soil enzyme activities following additions of cyanobacterial biomass and exopolysaccharide," *Soil Biol and Biochem*, vol. 32, issue 13, pp. 1985–1987. 2000. https://doi.org/10.1016/S0038-0717(00)00174-7.

[102] A. Karimi, A. Tahmourespour, and M. Hoodaji, "The formation of biocrust and improvement of soil properties by the exopolysaccharide-producing cyanobacterium: a biogeotechnological study," *Biomass Convers Biorefin*, 2022, https://doi.org/10.1007/s13399-022-02336-0.

[103] R. J. L. Morcillo and M. Manzanera, "The effects of plant-associated bacterial exopolysaccharides on plant abiotic stress tolerance," *Metabolites*, vol. 11, no. 6. MDPI AG, 2021. https://doi.org/10.3390/metabo11060337.

[104] H. Naseem, M. Ahsan, M. A. Shahid, and N. Khan, "Exopolysaccharides producing rhizobacteria and their role in plant growth and drought tolerance," *Journal of Basic Microbiology*, vol. 58, no. 12. Wiley-VCH Verlag, pp. 1009–1022, Dec. 01, 2018. https://doi.org/10.1002/jobm.201800309.

[105] V. Sandhya and S. Z. Ali, "The production of exopolysaccharide by Pseudomonas putida GAP-P45 under various abiotic stress conditions and its role in soil aggregation," *Microbiology (Russian Federation)*, vol. 84, no. 4, pp. 512–519, Jul. 2015, https://doi.org/10.1134/S0026261715040153.

[106] D. Ghosh, A. Gupta, and S. Mohapatra, "A comparative analysis of exopolysaccharide and phytohormone secretions by four drought-tolerant rhizobacterial strains and their impact on osmotic-stress mitigation in Arabidopsis thaliana," *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 35, no. 6, Jun. 2019, https://doi.org/10.1007/s11274-019-2659-0.

[107] J. Kaur *et al.*, "An exopolysaccharide-producing novel Agrobacterium pusense strain JAS1 isolated from snake plant enhances plant growth and soil water retention," *Sci Rep*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, https://doi.org/10.1038/s41598-022-25225-y.

[108] T. Fatima and N. K. Arora, "Pseudomonas entomophila PE3 and its exopolysaccharides as biostimulants for enhancing growth, yield and tolerance responses of sunflower under saline conditions," *Microbiol Res*, vol. 244, Mar. 2021, https://doi.org/10.1016/j.micres.2020.126671.

[109] T. Gu *et al.*, "Microbial extracellular polymeric substances alleviate cadmium toxicity in rice (Oryza sativa L.) by regulating cadmium uptake, subcellular distribution and triggering the expression of stress-related genes," *Ecotoxicol Environ Saf*, vol. 257, Jun. 2023, https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2023.114958.

[110] P. S. P. Arachchige *et al.*, "Sub-micron level investigation

reveals the inaccessibility of stabilized carbon in soil microaggregates," *Sci Rep*, vol. 8, no. 1, Dec. 2018, https://doi.org/10.1038/s41598-018-34981-9.

[111] T. L. Swenson *et al.*, "A novel method to evaluate nutrient retention by biological soil crust exopolymeric matrix," *Plant Soil*, vol. 429, no. 1–2, pp. 53–64, Aug. 2018, https://doi.org/10.1007/s11104-017-3537-x.

[112] O. Y. A. Costa, A. Pijl, and E. E. Kuramae, "Dynamics of active potential bacterial and fungal interactions in the assimilation of acidobacterial EPS in soil," *Soil Biol Biochem*, vol. 148, Sep. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107916.

[113] R. Mikutta, U. Zang, J. Chorover, L. Haumaier, and K. Kalbitz, "Stabilization of extracellular polymeric substances (Bacillus subtilis) by adsorption to and coprecipitation with Al forms," *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 75, no. 11, pp. 3135–3154, Jun. 2011, https://doi.org/10.1016/j.gca.2011.03.006.

[114] M. Zhang *et al.*, "Selective retention of extracellular polymeric substances induced by adsorption to and coprecipitation with ferrihydrite," *Geochim Cosmochim Acta*, vol. 299, pp. 15–34, Apr. 2021, https://doi.org/10.1016/j.gca.2021.02.015.

[115] Y. Yi, W. Huang, and Y. Ge, "Exopolysaccharide: A novel important factor in the microbial dissolution of tricalcium phosphate," *World J Microbiol Biotechnol*, vol. 24, no. 7, pp. 1059–1065, Jul. 2008, https://doi.org/10.1007/s11274-007-9575-4.

[116] Y. Wang *et al.*, "Extracellular polymeric substances and biocorrosion/biofouling: recent advances and future perspectives," *International Journal of Molecular Sciences*, vol. 23, no. 10. MDPI, May 01, 2022. https://doi.org/10.3390/ijms23105566.

[117] R. Breitenbach *et al.*, "Corrosive extracellular polysaccharides of the rock-inhabiting model fungus Knufia petricola," *Extremophiles*, vol. 22, no. 2, pp. 165–175, Mar. 2018, https://doi.org/10.1007/s00792-017-0984-5.

[118] P. Gupta and B. Diwan, "Bacterial exopolysaccharide mediated heavy metal removal: A review on biosynthesis, mechanism and remediation strategies," *Biotechnology Reports*, vol. 13. Elsevier B.V., pp. 58–71, Mar. 01, 2017. https://doi.org/10.1016/j.btre.2016.12.006.

[119] P. M. Joshi and A. A. Juwarkar, "In vivo studies to elucidate the role of extracellular polymeric substances from Azotobacter in immobilization of heavy metals," *Environ Sci Technol*, vol. 43, no. 15, pp. 5884–5889, Aug. 2009, https://doi.org/10.1021/es900063b.

[120] D. Kalita and S. R. Joshi, "Study on bioremediation of lead by exopolysaccharide producing metallophilic bacterium isolated from extreme habitat," *Biotechnology Reports*, vol. 16, pp. 48–57, Dec. 2017, https://doi.org/10.1016/j.btre.2017.11.003.

[121] A. Tang *et al.*, "Simultaneous leaching of multiple heavy metals from a soil column by extracellular polymeric substances of Aspergillus tubingensis F12," *Chemosphere*, vol. 263, Jan. 2021, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127883.

[122] A. Shukla, P. Parmar, D. Goswami, B. Patel, and M. Saraf, "Exemplifying an archetypal thorium-EPS complexation by novel thoriotolerant Providencia thoriotolerans AM3," *Sci Rep*, vol. 11, no. 1, Dec. 2021, https://doi.org/10.1038/s41598-021-82863-4.

[123] O. Y. A. Costa, J. M. Raaijmakers, and E. E. Kuramae, "Microbial extracellular polymeric substances: Ecological function and impact on soil aggregation," *Frontiers in Microbiology*, vol. 9, no. JUL. Frontiers Media S.A., Jul. 23, 2018. https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.01636.

[124] C. Kantar, Z. Cetin, and H. Demiray, "In situ stabilization of chromium (VI) in polluted soils using organic ligands: The role of galacturonic, glucuronic and alginic acids," *J Hazard Mater*, vol. 159, no. 2–3, pp. 287–293, Nov. 2008, https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.02.022.

[125] Y. Chen, M. Wang, X. Zhou, H. Fu, X. Qu, and D. Zhu, "Sorption fractionation of bacterial extracellular polymeric substances (EPS) on mineral surfaces and associated effects on phenanthrene sorption to EPS-mineral complexes," *Chemosphere*, vol. 263, Jan. 2021, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128264.

[126] W. Zeng *et al.*, "Role of extracellular polymeric substance (EPS) in toxicity response of soil bacteria Bacillus sp. S3 to multiple heavy metals," *Bioprocess Biosyst Eng*, vol. 43, no. 1, pp. 153–167, Jan. 2020, https://doi.org/10.1007/s00449-019-02213-7.

[127] G. Vinothini, S. Latha, M. Arulmozhi, and D. Dhanasekaran, "Statistical optimization, physio-chemical and bio-functional attributes of a novel exopolysaccharide from probiotic Streptomyces griseorubens GD5," *Int J Biol Macromol*, vol. 134, pp. 575–587, Aug. 2019, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.05.011.

[128] P. P. Han, Y. Sun, X. Y. Wu, Y. J. Yuan, Y. J. Dai, and S. R. Jia, "Emulsifying, flocculating, and physicochemical properties of exopolysaccharide produced by cyanobacterium Nostoc flagelliforme," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 172, no. 1, pp. 36–49, Jan. 2014, https://doi.org/10.1007/s12010-013-0505-7.

[129] F. Martínez-Checa, F. L. Toledo, K. El Mabrouki, E. Quesada, and C. Calvo, "Characteristics of bioemulsifier V2-7 synthesized in culture media added of hydrocarbons: Chemical composition, emulsifying activity and rheological properties," *Bioresour Technol*, vol. 98, no. 16, pp. 3130–3135, Nov. 2007, https://doi.org/10.1016/j.biortech.2006.10.026.

[130] C. Jia, P. Li, X. Li, P. Tai, W. Liu, and Z. Gong, "Degradation of pyrene in soils by extracellular polymeric substances (EPS) extracted from liquid cultures," *Process Biochemistry*, vol. 46, no. 8, pp.

1627–1631, Aug. 2011, https://doi.org/10.1016/j.procbio.2011.05.005.

[131] C. Calvo, G. A. Silva-Castro, I. Uad, C. García Fandiño, J. Laguna, and J. González-López, "Efficiency of the EPS emulsifier produced by Ochrobactrum anthropi in different hydrocarbon bioremediation assays," in *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, Nov. 2008, pp. 1493–1501. https://doi.org/10.1007/s10295-008-0451-5.

[132] P. J. Yesankar, M. Pal, A. Patil, and A. Qureshi, "Microbial exopolymeric substances and biosurfactants as 'bioavailability enhancers' for polycyclic aromatic hydrocarbons biodegradation," *International Journal of Environmental Science and Technology*, vol. 20, no. 5, pp. 5823–5844, May 2023, https://doi.org/10.1007/s13762-022-04068-0.

[133] Y. Zhang *et al.*, "Extracellular polymeric substances enhanced mass transfer of polycyclic aromatic hydrocarbons in the two-liquid-phase system for biodegradation," *Appl Microbiol Biotechnol*, vol. 90, no. 3, pp. 1063–1071, May 2011, https://doi.org/10.1007/s00253-011-3134-5.

[134] S. Chamizo, A. Adessi, G. Mugnai, A. Simiani, and R. De Philippis, "Soil type and cyanobacteria species influence the macromolecular and chemical characteristics of the polysaccharidic matrix in induced biocrusts," *Microb Ecol*, vol. 78, no. 2, pp. 482–493, Aug. 2019, https://doi.org/10.1007/s00248-018-1305-y.

[135] A. Bhattacharjee *et al.*, "Soil microbial EPS resiliency is influenced by carbon source accessibility," *Soil Biol Biochem*, vol. 151, Dec. 2020, https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.108037.

[136] R. Raliya *et al.*, "ZnO nanoparticles induced exopolysaccharide production by B. subtilis strain JCT1 for arid soil applications," *Int J Biol Macromol*, vol. 65, pp. 362–368, 2014, https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2014.01.060.

[137] A. Shukla, K. Mehta, J. Parmar, J. Pandya, and M. Saraf, "Depicting the exemplary knowledge of microbial exopolysaccharides in a nutshell," *European Polymer Journal*, vol. 119. Elsevier Ltd, pp. 298–310, Oct. 01, 2019. https://doi.org/10.1016/j.eurpolymj.2019.07.044.

[138] A. Vaishnav, K. Upadhayay, D. Tipre, and S. Dave, "Utilization of mixed fruit waste for exopolysaccharide production by Bacillus species SRA4: medium formulation and its optimization," *3 Biotech*, vol. 10, no. 12, Dec. 2020, https://doi.org/10.1007/s13205-020-02545-2.

[139] V. Ventorino *et al.*, "Bioprospecting of exopolysaccharide-producing bacteria from different natural ecosystems for biopolymer synthesis from vinasse," *Chemical and Biological Technologies in Agriculture*, vol. 6, no. 1, Dec. 2019, https://doi.org/10.1186/s40538-019-0154-3.

[140] S. V. Patil, R. B. Salunkhe, C. D. Patil, D. M. Patil, and B. K. Salunke, "Bioflocculant exopolysaccharide production by Azotobacter indicus using flower extract of Madhuca latifolia L," *Appl Biochem Biotechnol*, vol. 162, no. 4, pp. 1095–1108, Oct. 2010, https://doi.org/10.1007/s12010-009-8820-8.

[141] A. Kumar, N. Sajna, K. V Swati, and S. Editors, "Polymer and composite materials microbial exopolysaccharides as novel and significant biomaterials." A. Kumar, N. Sajna, K. V Swati, and S. eds. Springer, 2021.

[142] P. Zhang *et al.*, "Composition of EPS fractions from suspended sludge and biofilm and their roles in microbial cell aggregation," *Chemosphere*, vol. 117, no. 1, pp. 59–65, 2014, https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.05.070.

[143] H. Ba-Haddou *et al.*, "Combination of 3D Fluorescence/PARAFAC and UV–Vis Absorption for the Characterization of Agricultural Soils from Morocco," *J Fluoresc*, vol. 32, no. 6, pp. 2141–2149, Nov. 2022, https://doi.org/10.1007/s10895-022-03011-3.

[144] B. Cania *et al.*, "Biological soil crusts from different soil substrates harbor distinct bacterial groups with the potential to produce exopolysaccharides and lipopolysaccharides," *Microb Ecol*, vol. 79, no. 2, pp. 326–341, Feb. 2020, https://doi.org/10.1007/s00248-019-01415-6.

[145] C. Oertel, J. Matschullat, K. Zurba, F. Zimmermann, and S. Erasmi, "Greenhouse gas emissions from soils—A review," *Chemie der Erde*, vol. 76, no. 3. Elsevier GmbH, pp. 327–352, Oct. 01, 2016. https://doi.org/10.1016/j.chemer.2016.04.002.