









Research Paper

<https://doi.org/10.5564/pib.v40i1.4006>

PROCEEDINGS OF
PIB
THE INSTITUTE OF BIOLOGY

C, N and P acquiring enzyme activities along climatic gradients in Mongolia

Batsaikhan KHISHIGMAA^{1,2} , Khandaa OYUKHAN¹ , Jambalsuren BAYARMAA² ,
Shagdar ERDENECHIMEG¹ , Erdenebileg ENKHMAA³ , Dashnyam PUNSALDULAM^{1*} 

¹Laboratory of Microbial Synthesis, Institute of Biology, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

²School of Arts and Sciences, National University of Mongolia, Ulaanbaatar, Mongolia

³Laboratory of Vegetation Ecology and Plant Economics, Botanic Garden and Research Institute, Mongolian Academy of Sciences, Ulaanbaatar, Mongolia

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

Abstract. Soil extracellular enzymes are vital indicators of microbial activity and nutrient cycling and significantly influence soil organic matter (SOM) decomposition. Climate and soil resources contribute to the variations of enzyme activities and, thus, regulate the SOM decomposition. This study investigates the activities of carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) acquisition enzymes across different soil depths (0–15 and 15–30 cm) and environmental gradients in Mongolia. Soil samples were collected from 26 sites, with contrasting precipitation and temperature levels, and SOM contents. Our results revealed overall higher activities of C- and P-acquiring enzymes and lower activities (1.9–561.4 and 25.4–536.3 nmol g⁻¹ h⁻¹) of N-acquiring enzymes (6.07–146.2 nmol g⁻¹ h⁻¹). The enzyme activities were significantly higher in the 0–15 cm layer at most sampling sites. Correlation analyses revealed strong positive effects of mean annual precipitation (MAP) (Pearson $r = 0.76$; 0.95) and negative effects of mean annual temperature (MAT) ($r = -0.65$; -0.61) on C- and P-acquiring enzyme activities at both soil depths, whereas N-acquiring enzyme activity was significantly influenced by climate only in the 0–15 cm layer. Soil resources (SOM and TN) were positively correlated ($r = 0.41$ – 0.93) with the enzyme activities. The results indicate that soil microbial communities might be investing more resources in C and P acquisition in Mongolian steppes. Both climate and soil resources influence the enzyme activities, but the relative contributions of MAT and MAP to the variations in the enzyme activities were highest in 0–15 cm and 15–30 cm layers, respectively. Overall, the results imply that predicted warming and changes in precipitation patterns could affect the SOM stock in SOM-rich areas in Mongolia, especially in topsoils.

Keywords: Soil enzymes, β -Glucosidase, Leucine aminopeptidase, N-Acetylglucosaminidase, Acid phosphatase

Received 04 October 2024; received in revised form 02 December 2024; accepted 30 December 2024

© 2024 Author(s). This is an open access article under the [CC BY-NC 4.0 license](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Introduction

Soil microorganisms produce a variety of extracellular enzymes that play a key role in decomposition of soil organic matter (SOM) [1], [2], serving as mediators of soil nutrient mineralization and cycling processes [3]. The decomposition of SOM provides energy and nutrients for microbial growth and metabolism. Certain extracellular enzymes that mediate SOM decomposition represent a large portion of measurable enzyme activities in soil. These enzymes target the most abundant polymers containing carbon (C), nitrogen (N), and phosphorus (P) in the environment [4] and are categorized as C-ac-

quiring (such as β -glucosidase), N-acquiring (such as leucine aminopeptidase and N-acetylglucosaminidase) and P-acquiring (such as acid phosphatase) enzymes [5]. These enzymes break down polymeric compounds into assimilable molecules. For example, phosphatases solubilize phosphorus complexes bound with cations, enhancing nutrient availability for plant uptake, especially in soils with high acidity and phosphorus deficiency [3], [6].

Climatic factors, particularly temperature and precipitation, are crucial drivers of soil organic matter (SOM) dynamic, with net primary productivity in many

water-limited regions linked to precipitation. Humid conditions promote the formation and stabilization of SOM, while higher temperature increase microbial decomposition rates, often resulting in reduced SOM under warmer environments [7]. Yet, climate change is expected to influence SOM turnover rates due to altered precipitation patterns, i.e., more extreme dry and wet periods [8], [9], [10]. Altered precipitation has been shown to affect soil enzyme activities, which can subsequently influence nutrient availability and biogeochemical cycles [11]. Thus, research on soil enzyme activities, involved in the acquisition of carbon and essential nutrients by soil microbial communities across environmental gradients may provide an improved understanding of the climate and edaphic factors governing SOM decomposition in response to changing climate.

In Mongolia, Bayarmaa and Purev studied several soil enzyme activities involved in C, N and P-cycling in wheat and rapeseed farmlands. Their research suggested that land use changes, such as converting natural lands to agricultural use, may change the enzymes essential for SOM dynamics and nutrient cycling [12]. While significant progress has been made globally in understanding how soil enzymes are regulated by climate and soil properties, research on soil enzymes in Mongolia is sparse, particularly concerning their regulations under contrasting climate and soil resources.

Here, we aim to compare the activities of four hydrolytic enzymes involved in SOM decomposition and acquisition of C, N and P to explore how climate and soil variables influence these enzyme activities across environmental gradients in Mongolia. We analyzed two soil depths, as depth significantly influences SOM turnover due to notable differences in substrate quality, soil properties, and microbial diversity [13]. Since soil enzyme activities serve as a proxy for SOM decomposition [6], our research will shed light on current SOM decomposition patterns across distinct environmental and soil resource gradients in Mongolia.

Materials and methods

Soil sampling sites and sampling design

To investigate the effect of precipitation and temperature on soil enzyme activities, we collected soil samples from twenty-six sites along climatic gradients in Mongolia in June 2022 (Fig. 1). The mean annual precipitation (MAP), in these areas ranges from 44 to 353 mm, while the mean annual temperature (MAT) varies from -5.96°C to 5.78°C. The sampling locations include 8 sites in the

forest steppe, 9 sites in the steppe, and 9 sites in the desert and desert steppe zones.

We used the five-point sampling method for soil sampling. At each sampling site, we established a 100 m² plot, within which, five subplots of 1 m² were marked. At each subplot, five cores were collected from the center and each corner using 5 mm corer and separated into two different depths: 0–15 cm (topsoil) and 15–30 cm (subsoil). Five cores from each subplot were mixed in a sterile container to create one composite sample [13]. The composite samples were stored at -80°C before enzyme assays. Prior to analysis, the soil samples were sieved through a 2 mm screen.

Climate and soil physico-chemical properties

Each sampling site's historical precipitation and temperature data (2012–2021) were obtained from WorldClim (v2.1 <https://www.worldclim.org/>). Soil moisture (SMC) was determined by measuring the weight difference before and after drying at 105 °C until reaching a constant weight. The dry soil was then used to determine soil organic matter (SOM) using the loss-on-ignition method [14]. Soil pH was determined in a 1:5 soil-to- CaCl₂ (0.1 M) suspension. Total nitrogen (TN) was measured using the Kjeldahl method [15]. Soil available phosphorus (aP) was analyzed using the Machigin's method [16].

Extracellular enzyme assays

Activities of a C-acquiring enzyme (β -glucosidase (BG)), two N-acquiring enzymes (leucine aminopeptidase (LAP) and N-acetylglucosaminidase (NAG)), and a P-acquiring enzyme (acid phosphatase (AP)) were determined using a colorimetric method [17]. The substrates used were *p*-nitrophenyl (*p*-NP)- β -glucopyranoside, *p*-NP-N-acetyl- β -D-glycosaminide, *p*-NP-phosphate, and L-Leucine-*p*-nitroanilide (Sigma-Aldrich Co. Ltd). The activity assays were conducted in 96-well microplates using the chromogenic substrates. Briefly, 2.5 g of fresh soil was suspended in 10 ml of 50 mM acetate buffer by vortexing for 2 minutes. Then, the soil suspension and solution were mixed in 8-strip tubes and incubated at 27°C for 3 hours. Blanks (buffer + soil suspension) and negative controls (buffer + substrate) were included for each sample. After a brief centrifugation (30 seconds), 150 μ l of the supernatant was taken, and absorbance was measured at 405 nm optical density. The concentration of the released products was calculated using respective calibration curves and enzyme activity was expressed as nanomoles of substrates converted by per gram of dry soil samples per hour (nmol g⁻¹ h⁻¹).

Statistical analysis

All statistical analyses were performed in R (Version 4.2.1). A two-way ANOVA was performed to analyze the differences in enzyme activities across sampling sites and depths. Pearson correlation analysis, utilizing the “corrplot” package, evaluated the relationships between enzyme activities and soil and climate variables. Linear regression analysis was performed, using the *lm* function, to test the effects of climate and soil variables on the enzyme activities. Hierarchical variation partitioning was carried out using the “rdacca.hp” package. Figures were created using R (Version 4.2.1) and GraphPad Prism 10.0 (GraphPad Software, Inc).

Results

Patterns of soil extracellular enzyme activities across the sampling sites and soil depths

The activities of a C-acquiring enzyme (BG), two N-acquiring enzymes (LAP and NAG), and a P-acquiring enzyme (AP) significantly across different sampling sites and soil depths (Fig. 2; Table 1). Yet, sampling depths had smaller contributions in the variation of the enzyme activities in relative to that of sampling sites (Table 1). As illustrated in Figure 2, BG and AP activities were the highest, while the combined activities of NAG and LAP (NAG+LAP) were lowest across the sampling sites. Generally, the enzyme activities were higher in samples collected from the 0–15 cm layer than that in the 15–30 cm layer.

Relationships between soil extracellular enzyme activities and environmental variables

Pearson correlation analysis revealed significant relationships among the enzyme activities, climate, and soil properties (Fig. 3).

MAP positively influenced BG and AP activities at both soil depths (Fig. 3; Fig. 4A, C), and NAG+LAP activity was influenced by MAP only at a soil depth of 0–15 cm (Fig. 3; Fig. 4B). The impact of MAP was strongest on AP and weakest on NAG+LAP activity, as indicated by R^2 value of 0.90 and 0.81 for AP, compared to 0.27 and 0.09 for N-acquiring enzymes (Fig. 4B, C).

In contrast to MAP, MAT negatively influenced the activities of BG and AP at both soil depths, as well as NAG+LAP in 0–15 cm layer (Fig. 3). Linear regression analysis revealed that the relationships between MAT and the enzyme activities were weaker than those observed with MAP, as indicated by R^2 ranging from 0.24 to 0.42 for the 0–15 cm soil layer and from 0.14 to 0.31 for the

15–30 cm layer. Additionally, R^2 values for the relationships between MAT and the enzyme activities were higher in the 0–15 cm layer relative to the 15–30 cm layer (Fig. 4D-F).

The negative effect of soil pH was significant on BG activity in the 0–15 cm layer and AP activity at both depths. Soil aP did not show significant correlations with the enzyme activities, except a positive correlation with AP activity at the 0–15 cm layer. Positive correlations were found between the enzyme activities and SMC, SOM, and TN in both soil depths (Fig. 3).

Regression analysis of SOM and BG and that for MAP and BG provided similar R^2 values at the 0–15 cm layer (0.60 and 0.58). However, at the 15–30 cm layer, SOM appeared to exert a stronger influence on BG in relative to MAP (Fig. 4A, G). The effect of SOM content was strong on NAG+LAP activity at the 0–15 cm layer ($R^2=0.87$) and weak on NAG+LAP activity at 15–30 cm layer ($R^2=0.37$) (Fig. 4H). This sharp difference was not observed for BG and AP between the two soil depths.

We performed a variation partitioning analysis to compare the relative contributions of climate and soil variables on the enzyme activities. The response variables were the four enzyme activities, while MAT, MAP, soil pH, and SOM were selected as the explanatory variables. The results indicated that climate had a stronger effect on the enzyme activities compared to soil pH and SOM. Specifically, the relative contribution of MAT was highest in the 0–15 cm layer, while the contribution of MAP was highest in the 15–30 cm layer (Fig. 5).

Discussion

Our results demonstrate significant variations in soil enzyme activities across different sampling sites and soil depths, particularly in response to climate factors (MAP and MAT). The resource allocation theory suggests that the relative investment in the production of each nutrient-acquiring enzymes reflect the nutrient demands of microorganisms [18], [19]. Along the precipitation gradient, the activities of C- and P-acquiring enzymes were higher in relative to N-acquiring enzymes suggesting that microbial communities could be investing more resources for in C and P acquisition, especially in regions with higher precipitation. Besides climate, soil enzyme activities are often associated with the changes in soil resource availability [20]. Previous research has shown that C- and P-acquiring enzyme activities were associated with increased litter decomposition and inputs of soluble organic constituents [21], [22]. In our study, higher enzyme

activities at the 0–15 cm layer can be attributed to the fact that SOM level is higher in this soil layer compared to the 15–30 cm layer. Moreover, microbial activity tends to decrease with soil depth [23]. On the Mongolian Plateau, soil microbial biomass and bacteria:fungi ratio, as well as C and N mineralization rates, decreased with soil depth and aridity [24].

Enhanced soil moisture from increased precipitation can stimulate microbial activity and productivity [25], [26]. This suggests that wetter conditions not only increase enzyme activities but also potentially enhance carbon cycling and nutrient availability. Our results showed that the elevated activities of C- and P-acquiring enzymes with increasing MAP, which aligns with increased SOM levels ($r=0.61$). On the other hand, higher activities of C- and P-acquiring enzymes could indicate SOM is a major C and P source, leading to a higher decomposition rate in SOM-rich sites in our study. A global meta-analysis on SOC measurement suggested SOC loss is higher in SOC-rich soils [27]. Furthermore, higher temperature is typically linked to increased microbial activity and soil respiration [22], with warming often stimulating hydrolytic enzyme activities [10]. Our results indicated negative correlations between the enzyme activities and MAT. This trend can be explained by decreased SOM content and MAP level with rising MAT ($r = (-0.52)$). It implies that the current rate of SOM decomposition in SOM-rich and high-precipitation regions in Mongolia could be constrained by low temperatures. In contrast, in warmer and SOM-poor areas, drought may reduce microbial activity [22].

Linear regression analysis indicated that MAP and SOM were stronger predictors of enzyme activities than MAT in our study area, particularly for C- and P-acquiring enzymes (Fig. 4). For N-acquiring enzymes, SOM appears to be a more significant predictor in the 0–15 cm soil layer, suggesting that SOM chemistry, in addition to its content, may influence the activities of these enzymes. However, variation partitioning analysis showed that the top contributors to the variations in enzyme activities were MAT in the 0–15 cm soil layer and MAP in the 15–30 cm layer. This suggests that the effect of MAT in subsoil might be muted. The results are consistent with a previous finding that warming leads to more significant losses of SOC in topsoil compared to subsoil, particularly in SOC-rich soils located at high latitude [27]. Enzyme activities increased with warming and elevated precipitation [22]. Thus, our findings suggest that predicted warming could further enhance SOM decomposition in SOM-

rich areas in Mongolia, particularly in topsoils.

Conclusions

Our findings indicate that enzyme activities involved in C, N, P acquisition, are strongly associated with climate and soil resource availability and C- and P-acquiring enzyme activities are higher than that of N-acquiring enzyme activities. MAT and MAP explained the most variations of the enzyme activities in topsoil and subsoil, respectively, suggesting environmental control on soil microbial activities could differ along vertical gradients of soils. The observed increase in soil enzyme activities with increasing SOM and MAP levels and decreasing MAT levels imply that projected warming could negatively impact SOM stock in Mongolia, especially in SOM-rich areas.

Acknowledgements

This research is a part of project ANSO-CR-PP-2021-09, supported by the Alliance of International Science Organizations.

References

- [1] B. G. Waring, S. R. Weintraub, and R. L. Sinsabaugh, "Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils," *Biogeochemistry*, vol. 117, no. 1, pp. 101-113, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9849-x>
- [2] Z. Xu et al., "Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC)," *Soil Biol Biochem.*, vol. 104, pp. 152-163, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.10.020>
- [3] K. Ndabankulu, S. O. Egbewale, Z. Tsvuura, and A. Magaddelela, "Soil microbes and associated extracellular enzymes largely impact nutrient bioavailability in acidic and nutrient poor grassland ecosystem soils," *Sci Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16949-y>
- [4] Y. Yang, C. Liang, Y. Wang, H. Cheng, S. An, and S. X. Chang, "Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the shift from P- to N-limitation of microorganisms with grassland restoration," *Soil Biol Biochem.*, vol. 149, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107928>
- [5] F. K. Olagoke, K. Kaiser, R. Mikutta, K. Kalbitz, and C. Vogel, "Persistent activities of extracellular enzymes adsorbed to soil minerals," *Microorganisms*, vol. 8, no. 11, pp. 1-15, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111796>
- [6] R. L. Sinsabaugh et al., "Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale," *Glob.Ecol.Biogeogr.*, Nov. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>

- [7] M. Wiesmeier et al., "Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales," *Geoderma*, vol. 338, pp. 83-100, Jan. 01, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- [8] Y. Cui et al., "Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region," *Sci. Total Environ.*, vol. 658, pp. 1440-1451, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.289>
- [9] J. Ru, Y. Zhou, D. Hui, M. Zheng, and S. Wan, "Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland," *Glob Chang Biol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1001-1011, Mar. 2018, <https://doi.org/10.1111/gcb.13941>
- [10] W. Xiao, X. Chen, X. Jing, and B. Zhu, "A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change," *Soil Biol Biochem.*, vol. 123, pp. 21-32, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.001>
- [11] D. S. Akinyemi, Y. Zhu, M. Zhao, P. Zhang, H. Shen, and J. Fang, "Response of soil extracellular enzyme activity to experimental precipitation in a shrub-encroached grassland in Inner Mongolia," *Glob Ecol Conserv.*, vol. 23, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01175>
- [12] J. Bayarmaa and D. Purev, "Enzyme activity of zhargalant farm soil, central province of Mongolia," *Mongolian J. Agric. Sci.*, vol. 22, no. 03, pp. 109-113, May 2018, <https://doi.org/10.5564/mjas.v22i03.953>
- [13] S. Li et al., "Sampling cores and sequencing depths affected the measurement of microbial diversity in soil quadrats," *Sci. Total Environ.*, vol. 767, May 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144966>
- [14] M. J. J. Hoogsteen, E. A. Lantinga, E. J. Bakker, J. C. J. Groot, and P. A. Tittonell, "Estimating soil organic carbon through loss on ignition: Effects of ignition conditions and structural water loss," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 66, no. 2, pp. 320-328, Mar. 2015, <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>
- [15] J. M. Bremner and C. S. Mulvaney, Nitrogen-Total. In A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties- Agronomy Monograph*, vol. 9, pp. 595-624. <https://doi.org/10.2134/agron-monogr9.2.2ed.c31>
- [16] J. Zoljargal and B. Namuun, "Comparison of methods to determine soil available phosphorus," *Mongolian Soil Sci.*, vol. 4, pp. 107-113, [in Mongolian].
- [17] C. R. Jackson, H. L. Tyler, and J. J. Millar, "Determination of microbial extracellular enzyme activity in waters, soils, and sediments using high throughput microplate assays," *J. Vis Exp.*, no. 80, 2013, <https://doi.org/10.3791/50399>
- [18] D. S. Allison and M. P. Virousek, "Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 37, pp. 937-944, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.09.014>
- [19] D. S. Allison, N. M. B. Weintraub, T. Gartner, and M. P. Waldrop, "Evolutionary-Economic Principles as Regulators of Soil Enzyme Production and Ecosystem Function", In *Soil Enzym, Soil Biol*, vol. 22. G. Shukla and A. Varma, Eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_12
- [20] V. L. Cenini et al., "Linkages between extracellular enzyme activities and the carbon and nitrogen content of grassland soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 96, pp. 198-206, May 2016, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.015>
- [21] Z. Kotroczo et al., "Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 70, pp. 237-243, Mar. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.028>
- [22] G. Li, S. Kim, S. H. Han, H. Chang, D. Du, and Y. Son, "Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming," *Soil Biol Biochem.*, vol. 120, pp. 212-221, May 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.014>
- [23] N. C. Dove, M. E. Barnes, K. Moreland, R. C. Graham, A. A. Berhe, and S. C. Hart, "Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition," *ISME Commun.*, vol. 1, no. 1, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>
- [24] D. Chen et al., "Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau," *Funct. Ecol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1561-1571, 2019, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13359>
- [25] W. Borken and E. Matzner, "Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 15, no. 4, pp. 808-824, 2009, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x>
- [26] R. Vargas et al., "Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 18, no. 4, pp. 1401-1411, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02628.x>
- [27] L. Wang et al., "Extracellular Enzyme Stoichiometry Reveals Soil Microbial Carbon and Phosphorus Limitations in the Yimeng Mountain Area, China," *Forests*, vol. 13, no. 5, May 2022, <https://doi.org/10.3390/f13050692>

Supplementary materials

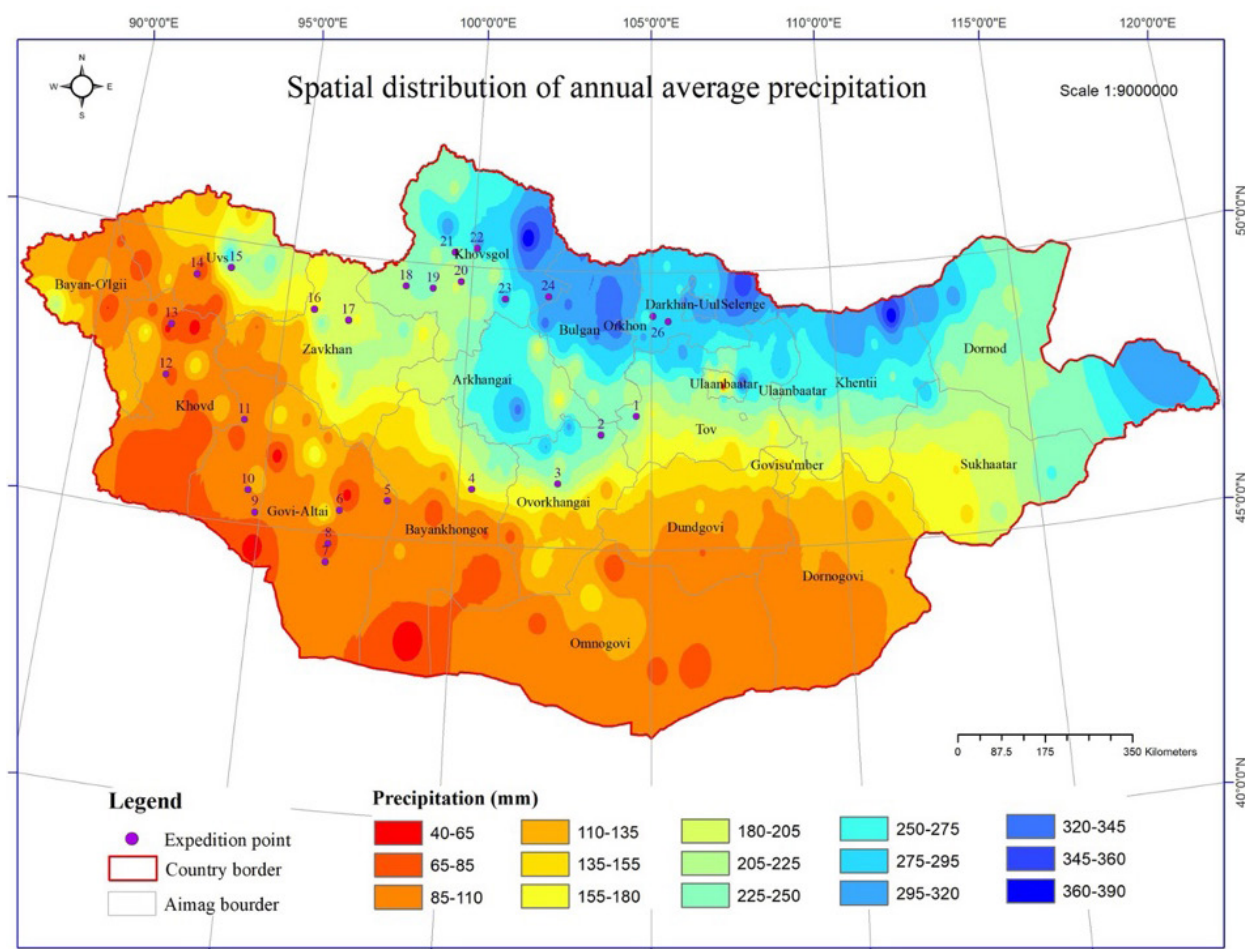


Fig.1. Soil sampling sites

Table 1. Two-way ANOVA results showing the variations of C-, N-, and P-acquiring enzyme activities across the sampling sites and depths.

		BG	NAG+LAP	AP
Site	F ratio	4.8	3.55	10.8
	p value	<0.0001	0.001	<0.0001
	% of total variation	70.2	70.4	94.8
Depth	F ratio	26.62	12.23	24.6
	p value	<0.0001	0.001	<0.0001
	% of total variation	15.5	9.7	8.6

BG, β -glucosidase;
 LAP, leucine aminopeptidase;
 NAG, N-acetylglucosaminidase;
 AP, acid phosphatase;

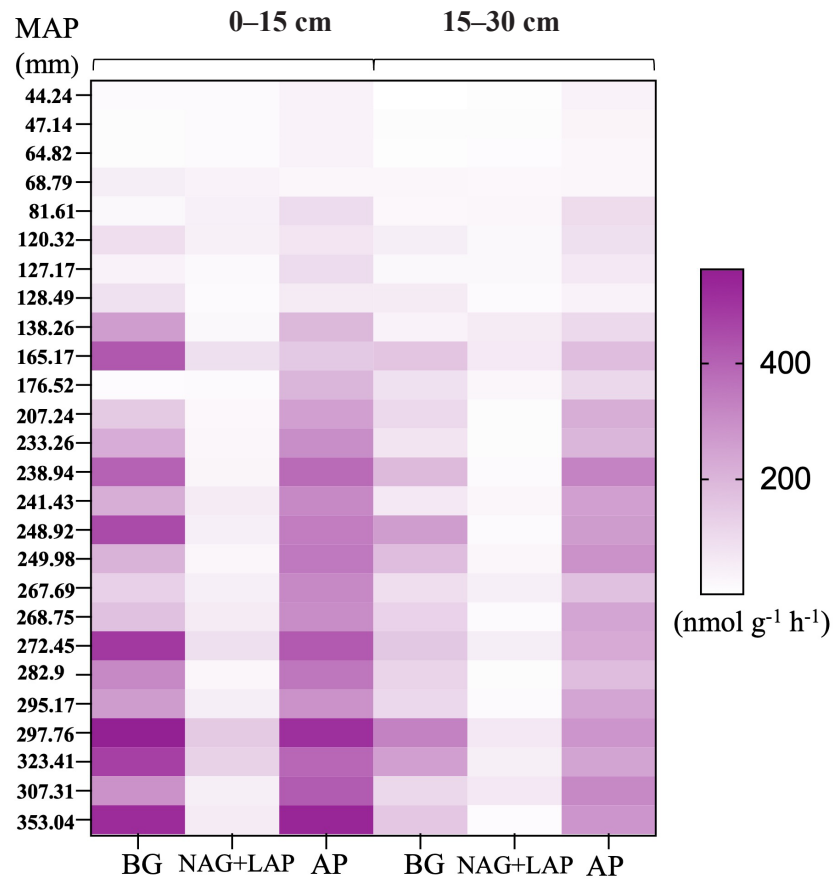


Fig.2. A heatmap, illustrating the activities of C-, N- and P-acquiring enzymes. The enzyme activities measured at two different soil depths are arranged in increasing order of mean annual precipitation (MAP). The darker the cell color indicate higher enzyme activity levels. BG, NAG+LAP, and AP represent C-acquiring enzyme, N-acquiring enzymes, P-acquiring enzyme, respectively.

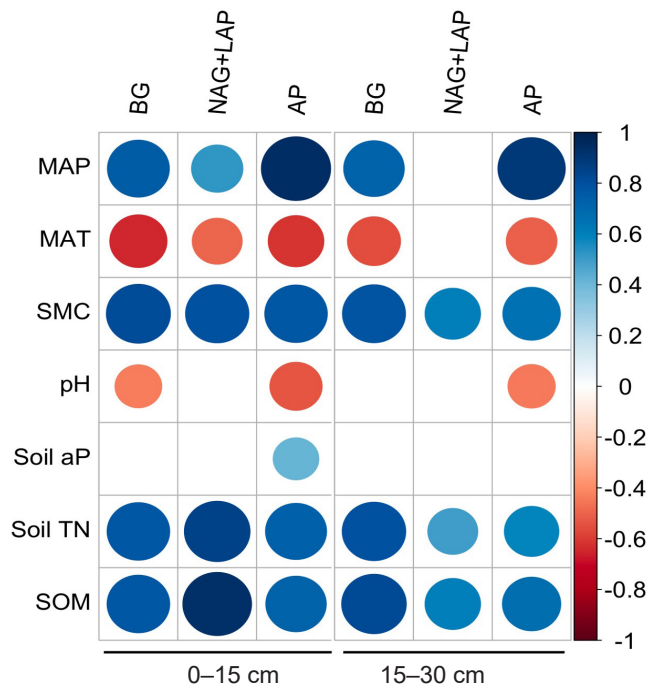


Fig. 3. Pearson correlation plot shows the relationships between the enzyme activities and environmental variables at two different soil depths (0–15 cm and 15–30 cm). MAP, mean annual precipitation; MAT, mean annual temperature; SOM, soil organic matter; SMC, soil moisture content; pH; soil pH; soil aP, soil available phosphorus; soil TN, soil total nitrogen; Only significant correlations ($p < 0.05$) are displayed.

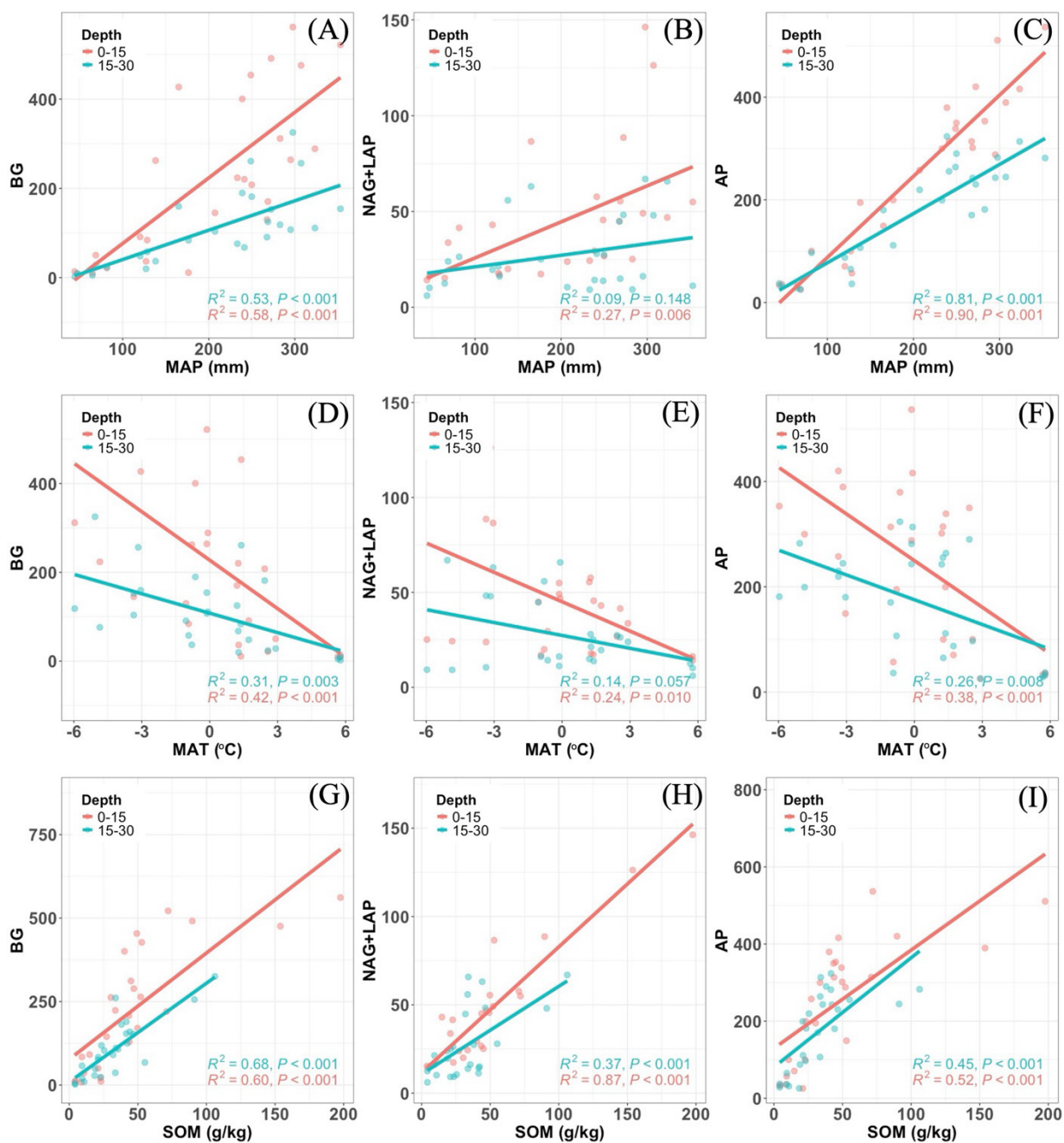


Fig. 4. Linear regression analysis of C-, N- and P-acquiring enzymes in relation to MAP (A-C), MAT (D-F), and SOM (G-I). The MAP, mean annual precipitation; MAT, mean annual temperature; SOM, soil organic matter.

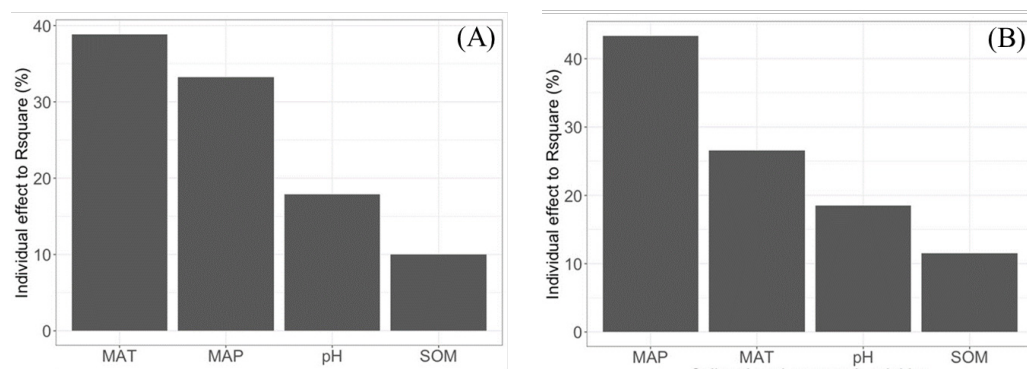


Fig. 5. Variation partitioning analysis shows the individual contributions of soil and environmental variables on C, N and P-acquiring enzyme activities in two different soil depths. A. 0–15 cm and B. 15–30 cm. MAP, mean annual precipitation; MAT, mean annual temperature; pH, soil pH; SOM, soil organic matter.



С, N, P-ын эргэлтэд оролцдог хөрсний энзимийн идэвхийг уур амьсгалын градиентын дагуу судалсан үр дүн

Батсайхан Хишигмаа^{1,2} , Хандаа Оюухан¹ , Жамбалсүрэн Баярмаа² ,
Шагдар Эрдэнэчимэг¹ , Эрдэнэбилэг Энхмаа³ , Дашням Пунсалдулам^{1*} 

¹Монгол улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухааны академи, Биологийн хүрээлэн, Микробын нийлэгжлийн лаборатори

²Монгол Улс, Улаанбаатар, Монгол Улсын Их сургуулийн Шинжлэх Ухааны Сургуулийн Биологийн тэнхим, Биохимийн лаборатори

³Монгол улс, Улаанбаатар, Шинжлэх ухааны академи, Ботаникийн цэцэрлэгт хүрээлэн, Ургамалжлын экологи, ургамлын эдийн засгийн лаборатори

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

Хураангуй. Хөрсний энзим нь хөрсний бичил биетний үйл ажиллагаа, шим тэжээлийн нэгдлийн эргэлтийн чухал индикатор байхаас гадна хөрсний органик нэгдлийн задралын төлвийг илтгэдэг. Хөрсний энзим нь уур амьсгалын нөлөөнд мэдрэг тул уур амьсгал өөрчлөгдөхөд органик нэгдлүүдийн задралд хэрхэн нөлөөлөхийг судлах боломж олгодог. Энэ зорилгоор бид хур тунадас болон температурын ялгаатай 26 цэгээс, хөрсний хоёр өөр гүн (0–15 см болон 15–30 см)-ээс цуглуулсан дээжид нүүрстөрөгч (C), азот (N), фосфор (P)-ын эргэлтэд оролцдог дөрвөн энзимийн идэвхийг судлав. Судалгаагаар C болон P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх ($1.9\text{--}561.4$ ба $25.4\text{--}536.3$ нмоль г^{-1} ц^{-1}), N-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх ($6.07\text{--}146.2$ нмоль г^{-1} ц^{-1})-ээс харьцангуй өндөр, хөрсний 0–15 см гүнд идэвх нь нэмэгдэж байна. Хөрсний хоёр гүний аль алинд нь C, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх олон жилийн дундаж хур тунадас (цаашид хур тунадас гэх)-тай эерэг (Пирсон $r = 0.76; 0.95$) харин олон жилийн дундаж температур (цаашид температур гэх)-тай сөрөг хамааралтай ($r = -0.65; -0.61$) байгаа зүй тогтол илрэв. N-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийн хувьд хөрсний 0–15 см-ийн гүнд дээрхтэй ижил зүй тогтол тодорхойлогдсон бол 15–30 см-ийн гүнд уур амьсгалын нөлөө илрээгүй. Харин хөрсний органик нэгдэл, нийт азот нь бүх энзимийн идэвхтэй эерэг ($r = 0.41\text{--}0.93$) хамааралтай байна. Уур амьсгал, хөрсний органик нэгдэл энзимийн идэвхэд нөлөөлж байгаа боловч 0–15 см-ийн гүнд температур, 15–30 см-ийн гүнд хур тунадасны нөлөө харьцангуй өндөр байгаа үр дүн гарлаа. Эдгээр үр дүнгээс харахад температур болон хур тунадасны өөрчлөлт нь Монгол орны хувьд органик нэгдлээр баялаг бүсийн хөрсний органик нэгдлийн нөөцөд (ялангуяа өнгөн хөрсний өнгөн давхаргад) сөргөөр нөлөөлж болзошгүй байна.

Түлхүүр үг: β -глюкозидаза, хүчиллэг фосфатаза, лейцин аминопептидаза, N-ацетилглюкозаминидаза, хөрсний энзим

Хүлээн авсан 2024.10.04; хянан тохиолдуулсан 2024.12.02; зөвшөөрсөн 2024.12.30

© 2024 Зохиогч(д). [CC BY-NC 4.0 лиценз](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/).

Оршил

Хөрсний бичил биетэн нь хөрсний органик нэгдлийн задралд чухал үүрэгтэй төрөл бүрийн энзимүүдийг ялгаруулдаг [1], [2]. Ингэснээр хөрсний органик нэгдлийг задлан өсөлт, бодисын солилцоондоо шаардлагатай энерги, шим тэжээлийн нэгдлээр хангана. Иймээс эдгээр энзим хөрсний шим тэжээл, органик нэгдлийн эргэлтэд чухал үүрэгтэй оролцдог [3]. Хөрсөнд элбэг тохиолддог, нүүрстөрөгч (C), азот (N), фосфор (P) бүхий полимер нэгдлийн задралд оролцдог энзимүүдээс түгээмэл судлагддаг

нь C-ийн эргэлтэд оролцдог β -глюкозидаза, N-ын эргэлтэд оролцдог лейцин аминопептидаза болон N-ацетилглюкозаминидаза, P-ын эргэлтэд оролцдог хүчиллэг фосфатаза юм [4], [5]. Эдгээр энзимийн үйлчлэлээр полимер нэгдлүүд задран бичил биетэн, бусад организм ашиглах боломжтой энгийн нэгдлүүд үүснэ. Жишээлбэл, фосфатаза нь фосфорын комплексыг задалж хөрсөнд фосфорын уусдаг хэлбэрийг үүсгэснээр ургамалд ашиглагдах боломжийг нэмэгдүүлнэ [3], [6].

Уур амьсгалын хүчин зүйлс, ялангуяа температур

болон хур тунадас нь хөрсний органик нэгдлийн динамикт чухал үүрэгтэй. Тухайлбал, хур тунадас хязгаарлагдмал бүс нутагт экосистемийн анхдагч бүтээмж нь чийгээр хязгаарлагддаг. Чийглэг нөхцөл нь органик нэгдэл үүсэх, тогтворжиход тохиромжтой бол өндөр температур нь органик нэгдэл бичил биетнээр задрах процессыг нэмэгдүүлдэг [7]. Уур амьсгалын өөрчлөлт нь хур тунадас буух зүй тогтлыг өөрчлөн (хэт хуурай, чийглэг үетэй болох) энзимийн идэвхэд нөлөөлснөөр хөрсний органик нэгдлийн задралд нөлөөлөх боломжтой хэмээн олон судлаачид үзсэн [8], [9], [10]. Хур тунадасны горимыг өөрчлөх туршилтаар хөрсний энзимийн идэвхэд гарах өөрчлөлт, шим тэжээлийн нэгдлийн хүртээмж болон биогехимийн эргэлтэд нөлөөлж байгааг тогтоосон [11]. Иймээс, хөрсний бичил биетний бүлгэмдлийн C, N, P-ын хэрэгцээг хангахад чухал үүрэгтэй хөрсний энзимийн идэвхийг уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлсийн ялгаатай нөхцөлд судлах нь органик нэгдлийн задралд уур амьсгалын өөрчлөлтийн үзүүлэх нөлөөг тогтоох, ойлгоход чухал ач холбогдолтой юм.

Манай орны судлаачид улаан буудай, рапсын тариалангийн талбайн хөрсөнд C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог хэд хэдэн энзимийн идэвхийг судалсан [12]. Хөрсний энзимийн идэвхэд уур амьсгал болон хөрсний шинж чанар хэрхэн нөлөөлдөг талаар дэлхий даяар ихээр судалж байгаа боловч Монгол орны хувьд энэ талын судалгаа ховор байна.

Энэхүү судалгаагаар бид C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог дөрвөн энзимийн идэвхэд уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлс хэрхэн нөлөөлж байгааг судлахыг зорилоо. Хөрсний өөр өөр гүнд органик нэгдлийн чанар, хөрсний шинж чанар, бичил биетний олон янз байдал ялгаатай байдаг [13] учир бид хөрсний энзимийн идэвхийг хөрсний хоёр өөр гүнд тодорхойллоо. Хөрсний энзимийн идэвх нь органик нэгдлийн задралын төлвийг илтгэдэг тул [6] бидний судалгаа Монгол орны уур амьсгалын ялгаатай нөхцөл бүхий цэгүүдэд органик нэгдлийн задралын төлвийг тодруулахад чухал мэдээллийг бий болгоно.

Материал, арга зүй

Хөрсний дээж цуглуулсан загвар, цэгүүд

Хөрсний дээжийг 2022 оны 06 сард уур амьсгалын ялгаатай нөхцөл бүхий 26 цэгээс цуглуулсан ба эдгээрээс 8 нь ойт хээр, 9 нь хээр, 9 нь цөлөрхөг хээр ба цөлийн бүсэд хамаарч байсан (1-р зураг). Цэгүүдийн олон жилийн дундаж хур тунадас 44 мм-ээс 353 мм

хүртэл, харин олон жилийн дундаж температур -5.96°C -ээс 5.78°C байсан.

Дээжийг дугтуйн аргаар цуглуулсан ба цэг тус бүрт 100 м^2 талбай байгуулж, талбайн дотор нь 1 м^2 хэмжээтэй таван дэд талбайг сонгож төвөөс болон дөрвөн булангаас дээж авч, 0–15 см болон 15–30 см хоёр өөр гүнд хуваасан. Нэг нийлмэл дээж үүсгэхийн тулд дэд талбай бүрээс авсан таван дээжийг хольсон [13]. Дээжийг -80°C -д хадгалж, туршилт хийхээс өмнө 2 мм-ийн шигшүүрээр шигшиж бэлдсэн.

Уур амьсгалын мэдээлэл, хөрсний физик-химийн шинж чанар

WorldClim v2.1, <https://www.worldclim.org/> сайтаас дээж цуглуулсан цэгүүдийн хур тунадас, температурын мэдээллийг (2012–2021) авсан. Хөрсний чийгийг 105°C -д хатааж, органик нэгдлийн агууламжийг хатаасан хуурай хөрсийг 550°C -т шатааж үлдэгдлийг хэмжих жингийн аргаар тодорхойлсон [14]. Хөрсний pH-ийг хөрс болон 0.1 M CaCl_2 -ын 1:5 харьцаатай суспензэд потенциометрийн аргаар, нийт азотыг Кьельдалийн аргаар [15], хөдөлгөөнт фосфорыг Мачигиний аргаар [16] тус тус тодорхойлсон.

Хөрсний энзимийн идэвх тодорхойлох

C-ийн эргэлтэд оролцдог β -глюкозидаза (β -glucosidase (BG)), N-ын эргэлтэд оролцдог лейцин аминопептидаза (leucine aminopeptidase (LAP)) ба N-ацетилглюкозаминидаза (N-acetylglucosaminidase (NAG)), болон P-ын эргэлтэд оролцдог хүчиллэг фосфатаза (acid phosphatase (AP)) энзимийн идэвхийг Jackson нар (2013)-ын протоколын дагуу колориметрийн аргаар тодорхойлсон [17]. Ингэхдээ *p*-нитрофенил ба *p*-нитроанилиний бүлэг бүхий хромоген субстратуудыг ашигласан. Энзимийн идэвхийг 1 гр хуурай хөрсөн дэх энзимийн нэг цагт үүсгэж буй бүтээгдэхүүний хэмжээгээр (нмоль $\text{г}^{-1}\text{ц}^{-1}$) илэрхийлсэн.

Статистик анализ

Статистик анализыг R программ (Version 4.2.1) ашиглан гүйцэтгэв. Дээж цуглуулсан цэгүүд болон гүнээс хамаарсан энзимийн идэвхийн ялгааг two-way ANOVA, энзимийн идэвх, хөрс болон уур амьсгалын хүчин зүйлс хоорондын хамаарлыг Пирсон корреляцийн аргыг ашиглан шалгасан. Уур амьсгал болон хөрсний хүчин зүйлсийн энзимийн идэвхэд үзүүлэх нөлөөг шугаман регресс, хүчин зүйл тус бүрийн харьцангуй нөлөөг hierarchical variation

partition анализ ашиглан шалгасан. Графикуудыг R (Version 4.2.1) болон GraphPad Prism 10.0 (GraphPad Software, Inc) ашиглан байгуулсан.

Судалгааны үр дүн

Хөрсний хоёр гүн дэх энзимийн идэвх

С-ийн эргэлтэд оролцдог BG, N-ын эргэлтэд оролцдог LAP ба NAG, P-ын эргэлтэд оролцдог AP энзимийн идэвхийг тодорхойлоход эдгээр энзимийн идэвх дээж цуглуулсан цэг болон гүнээс хамаарч ялгаатай байв (2-р зураг; 1-р хүснэгт). Дээж цуглуулсан цэгүүдтэй харьцуулахад хөрсний гүнээс хамаарсан ялгаа бага байна (1-р хүснэгт).

2-р зурагт харуулснаар NAG болон LAP-ийн нийлбэр идэвхтэй харьцуулахад BG болон AP-ын идэвх харьцангуй өндөр байна. Ихэнх тохиолдолд, 0–15 см-ийн гүнээс цуглуулсан дээжид 15–30 см-ийн гүнээс цуглуулсан дээжтэй харьцуулахад энзимийн идэвх илүү өндөр байна.

Хөрсний энзимийн идэвх ба хүрээлэн буй орчны хүчин зүйлсийн хамаарал

Корреляцийн анализээр энзимийн идэвх уур амьсгал, хөрсний шинж чанартай мэдэгдэхүйц хамааралтай болох нь илэрсэн (3-р зураг). Хур тунадас нь BG болон AP -ын идэвхтэй хөрсний хоёр гүнд аль алинд нь эерэг хамааралтай байна (3-р зураг; 4А, В-р зураг). Харин NAG+LAP -ын идэвхийн хувьд энэ хамаарал зөвхөн 0–15 см-ийн гүнд илэрч байна (3-р зураг; 4Б-р зураг). Хур тунадасны нөлөө AP энзимд хамгийн хүчтэй ($R^2=0.90$) харин NAG+LAP энзимийн хувьд сул ($R^2=0.27$ ба 0.09) байна (4Б, В-р зураг).

Температур нь хөрсний хоёр гүнд BG болон AP энзимийн идэвхтэй эерэг хамааралтай байгаа бол NAG+LAP-ын хувьд температурын нөлөө хөрсний 0–15 см-ийн гүнд ач холбогдолтой байгаа үр дүн гарлаа (3-р зураг). Шугаман регрессийн үр дүнгээс үзвэл, температур болон энзимийн идэвх хоорондын хамаарал нь хур тунадас болон энзимийн идэвх хоорондын хамааралтай харьцуулахад сул байгааг хөрсний 0–15 см-ийн гүнд R^2 утга 0.2–0.42, 15–30 см-ийн гүнд 0.14–0.31 хооронд хэлбэлзэж байгаагаас харж болно. Мөн, температур ба энзимийн идэвх хоорондын хамаарал 0–15 см-ийн гүнд (15–30 см-ийн гүнтэй харьцуулахад) харьцангуй өндөр байна (4Г-Е-р зураг).

Хөрсний pH 0–15 см-ийн гүнд BG, харин хөрсний хоёр гүнд AP -ын идэвхэд сөргөөр нөлөөлж байна.

Хөрсний хөдөлгөөнт фосфор нь 0–15 см-ийн гүнд AP-ын идэвхтэй эерэг хамааралтай байгаа бол бусад тохиолдолд энзимийн идэвхтэй мэдэгдэхүйц хамаарал үзүүлээгүй. Харин хөрсний хоёр гүнд энзимийн идэвх болон хөрсний чийг, органик нэгдэл, нийт азотын хооронд эерэг хамаарал илэрлээ (3-р зураг).

Органик нэгдэл ба хур тунадасны BG-ын идэвхэд үзүүлэх нөлөө 0–15 см-ийн гүнд ойролцоо (R^2 утгууд 0.60 ба 0.58) байсан бол 15–30 см-ийн гүнд органик нэгдлийн нөлөө хур тунадастай харьцуулахад илүү хүчтэй илэрч байна (4А, Ё-р зураг). Органик нэгдлийн нөлөө 0–15 см-ийн гүнд NAG+LAP -ын идэвхэд хамгийн их ($R^2=0.87$), харин 15–30 см-ийн гүнд мөн NAG+LAP -ын идэвхэд хамгийн бага нөлөө үзүүлсэн ($R^2=0.37$) (4Ж-р зураг).

Температур, хур тунадас, хөрсний pH, органик нэгдлийн хөрсний энзимийн идэвхэд үзүүлэх харьцангуй нөлөөг variation partition анализаар шалгахад хөрсний pH ба органик нэгдэлтэй харьцуулахад уур амьсгал нь энзимийн идэвхэд илүү нөлөөтэй байна. Тодруулбал, температурын харьцангуй нөлөө хөрсний 0–15 см-ийн гүнд хамгийн их байсан бол хур тунадасны харьцангуй нөлөө хөрсний 15–30 см-ийн гүнд хамгийн их байна (5-р зураг).

Хэлэлцүүлэг

Бидний судалгааны үр дүн Монгол орны уур амьсгал, хөрсний үржил шимээр ялгаатай цэгүүдийн хөрсний энзимийн идэвхэд хур тунадас болон температур ихээхэн нөлөөлж байгааг харууллаа. Түүнчлэн энзимийн идэвхэд уур амьсгалын үзүүлэх нөлөө хөрсний гүнээс хамаарч ялгаатай байгаа бөгөөд температурын харьцангуй нөлөө 0–15 см-ийн гүнд, харин хур тунадасны харьцангуй нөлөө 15–30 см-ийн гүнд өндөр байв.

Хөрсний энзимийн идэвх уур амьсгалаас гадна хөрсний шим тэжээлийн нэгдлийн агууламжтай холбоотой байдаг [18]. Стехиометрийн онол ёсоор бичил биетний бүлгэмдэл хэрэгцээт элементийг ашиглахын тулд шаардагдах энзимийг нийлэгжүүлэх процесст илүү энерги зарцуулдаг [19], [20]. Бидний судалгааны үр дүнгээр С ба P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх N-ын эргэлтэд оролцдог энзимтэй харьцуулахад илүү өндөр байгаа нь тухайн хөрсний бичил биетэнд N-тай харьцуулахад С, P-ын хэрэгцээ өндөр байгааг илтгэж байна.

Мөн бусад судлаачдын үр дүнгээр С ба P-ын

эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх нь ургамлын үлдэгдлийн задрал, уусдаг органик нэгдлийн хангамжтай холбоотой өөрчлөгддөг болох нь тогтоогдсон байна [21], [22]. Бидний судалгааны үр дүнд, хөрсний 15–30 см-ийн гүнтэй харьцуулахад 0–15 см-ийн гүнд энзимийн идэвх өндөр байгаа нь хөрсний органик нэгдлийн агууламж өндөр байгаатай холбоотой байх магадлалтай. Нөгөө талаас хөрсний гүнрүү бичил биетний үйл ажиллагаа буурдагтай холбоотой байх боломжтой [23]. Судлаачид Монголын тэгш өндөрлөгт хөрсний бичил биетний биомасс, бактери ба мөөгөнцрийн харьцаа, С ба N-ын эрдэсжих хурд хөрсний гүн, хуурайшилтаас хамаарч буурдаг болохыг тогтоосон байдаг [24].

Хур тунадас, органик нэгдэл, температур бидний судалгааны цэгүүд дэх хөрсний энзимийн идэвхэд, ялангуяа С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхэд илүү хүчтэй нөлөөлж байгаа нь регрессийн анализын үр дүнгээс харагдаж байна (4-р зураг). Хур тунадас ихсэхэд хөрсний чийгшил нэмэгдэж бичил биетний идэвх, бүтээмж нэмэгддэг [25], [26]. Бидний судалгааны үр дүнгээс харахад хур тунадас нэмэгдэхэд С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх нэмэгдэхийн зэрэгцээ, органик нэгдлийн агууламж нэмэгдэж ($r=0.61$) байна. С ба Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх харьцангуй өндөр байгаа нь бичил биетний С ба Р-ын эх үүсвэр нь голдуу хөрсний органик нэгдэл байж болохыг илтгэнэ. Өөрөөр хэлбэл, хөрсөнд органик нэгдлийн задрал ихээр явагдаж байж болзошгүйг харуулж байна.

Нөгөө талаас, өндөр температур нь бичил биетний идэвх, хөрсний амьсгалыг нэмэгдүүлдэг [22]. Температур нэмэгдэхэд гидролитик энзимийн идэвх нэмэгддэг [10]. Харин бидний судалгаа энзимийн идэвх болон температурын хооронд сөрөг хамаарал байгааг харууллаа. Үүнийг температур нэмэгдэхэд хур тунадасны хэмжээ, үүнийг дагаад органик нэгдлийн агууламж ($r=-0.52$) буурч байгаатай холбон тайлбарлаж болно.

Глобал мета-анализын үр дүнгээс харахад температур болон хур тунадас ихсэх тусам энзимийн идэвх нэмэгддэг [22] боловч дэлхийн дулаарал нь органик нэгдлээр баялаг бүсийн өнгөн хөрсөн дэх органик нэгдлийн алдагдалд илүү хүчтэй нөлөөлж байна [27]. Үүнээс дүгнэхэд Монгол орны хувьд харьцангуй дулаан, органик нэгдлийн агууламж багатай бүс нутагт бичил биетний идэвхийг хуурайшил хязгаарлаж байх боломжтой юм. Харин органик нэгдлийн агууламж өндөртэй, хур тунадас

харьцангуй ихтэй бүс нутгуудын хөрсний органик нэгдлийн задрал бага температур (хүйтэн)-ын нөлөөгөөр хязгаарлагдаж байна.

Дүгнэлт

С, N, Р-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвх уур амьсгал болон хөрсний органик нэгдлийн агууламжтай нягт хамааралтай байна. Температур нь хөрсний өнгөн хэсэгт (0–15 см-ийн гүнд) энзимийн идэвхэд хамгийн хүчтэй нөлөөлөгч хүчин зүйл байсан бол хөрсний гүн рүү температурын нөлөө буурч, харин хур тунадасны нөлөө нэмэгдэж байна. Уур амьсгалын өөрчлөлттэй холбоотойгоор цаашид дулаарах, хур тунадасны хэмжээ өөрчлөгдөх нь Монгол орны хувьд органик нэгдлээр баялаг бүсийн хөрсний органик нэгдлийн нөөц (ялангуяа өнгөн хөрсний өнгөн давхаргад), тогтвортой байдалд сөргөөр нөлөөлж болзошгүй байна.

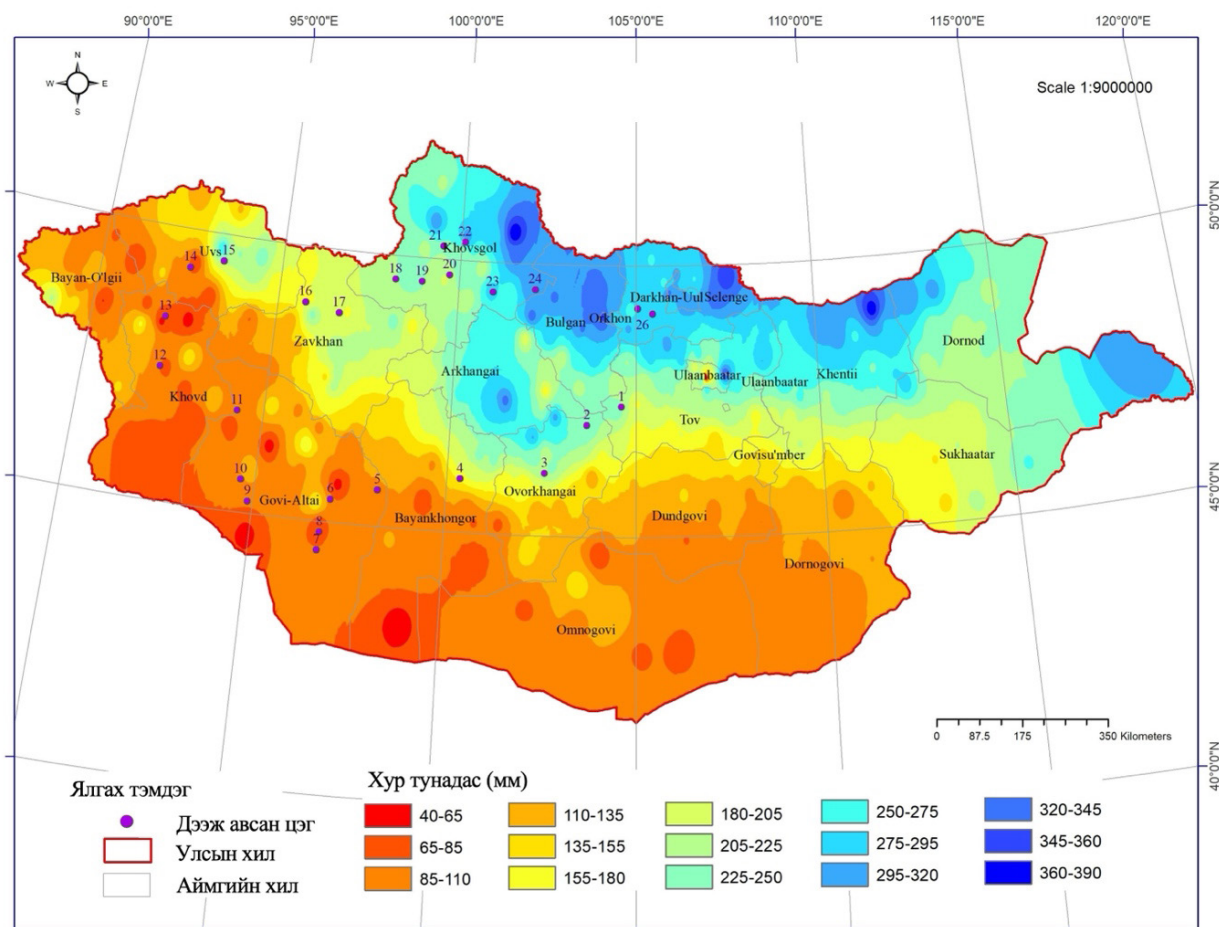
Талархал

Энэхүү судалгаа нь Олон улсын шинжлэх ухааны байгууллагуудын холбооны санхүүжилттэй “ANSO-CR-PP-2021-09” дугаартай төслийн нэг хэсэг юм.

Ашигласан бүтээл

- [1] B. G. Waring, S. R. Weintraub, and R. L. Sinsabaugh, “Ecoenzymatic stoichiometry of microbial nutrient acquisition in tropical soils,” *Biogeochemistry*, vol. 117, no. 1, pp. 101-113, Jan. 2014, <https://doi.org/10.1007/s10533-013-9849-x>
- [2] Z. Xu et al., “Soil enzyme activity and stoichiometry in forest ecosystems along the North-South Transect in eastern China (NSTEC),” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 104, pp. 152-163, Jan. 2017, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.10.020>
- [3] K. Ndabankulu, S. O. Egbewale, Z. Tsvuura, and A. Magaddelela, “Soil microbes and associated extracellular enzymes largely impact nutrient bioavailability in acidic and nutrient poor grassland ecosystem soils,” *Sci. Rep.*, vol. 12, no. 1, Dec. 2022, <https://doi.org/10.1038/s41598-022-16949-y>
- [4] Y. Yang, C. Liang, Y. Wang, H. Cheng, S. An, and S. X. Chang, “Soil extracellular enzyme stoichiometry reflects the shift from P- to N-limitation of microorganisms with grassland restoration,” *Soil Biol. Biochem.*, vol. 149, Oct. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107928>
- [5] F. K. Olagoke, K. Kaiser, R. Mikutta, K. Kalbitz, and C. Vogel, “Persistent activities of extracellular enzymes adsorbed to soil minerals,” *Microorganisms*, vol. 8, no. 11, pp. 1-15, Nov. 2020, <https://doi.org/10.3390/microorganisms8111796>
- [6] R. L. Sinsabaugh et al., “Stoichiometry of soil enzyme activity at global scale,” *Glob. Ecol. Bio-*

- geogr., Nov. 2008. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2008.01245.x>
- [7] M. Wiesmeier et al., "Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales," *Geoderma*, vol. 338, pp. 83-100, Jan. 01, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.07.026>
- [8] Y. Cui et al., "Patterns of soil microbial nutrient limitations and their roles in the variation of soil organic carbon across a precipitation gradient in an arid and semi-arid region," *Sci. Total Environ.*, vol. 658, pp. 1440-1451, Mar. 2019, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.289>
- [9] J. Ru, Y. Zhou, D. Hui, M. Zheng, and S. Wan, "Shifts of growing-season precipitation peaks decrease soil respiration in a semiarid grassland," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 24, no. 3, pp. 1001-1011, Mar. 2018, <https://doi.org/10.1111/gcb.13941>
- [10] W. Xiao, X. Chen, X. Jing, and B. Zhu, "A meta-analysis of soil extracellular enzyme activities in response to global change," *Soil Biol Biochem.*, vol. 123, pp. 21-32, Aug. 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.05.001>
- [11] D. S. Akinyemi, Y. Zhu, M. Zhao, P. Zhang, H. Shen, and J. Fang, "Response of soil extracellular enzyme activity to experimental precipitation in a shrub-encroached grassland in Inner Mongolia," *Glob. Ecol. Conserv.*, vol. 23, Sep. 2020, <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01175>
- [12] Ж. Баярмаа ба Д. Пүрэв, "Төв аймгийн жаргалантын аж ахуйн хөрсний ферментийн идэвхийн судалгаа," *Mongolian J. Agric. Sci.*, vol. 22, no. 03, хх. 109-113, May 2018, <https://doi.org/10.5564/mjas.v22i03.953>
- [13] S. Li et al., "Sampling cores and sequencing depths affected the measurement of microbial diversity in soil quadrats," *Sci. Total Environ.*, vol. 767, May 2021, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144966>
- [14] M. J. J. Hoogsteen, E. A. Lantinga, E. J. Bakker, J. C. J. Groot, and P. A. Tittonell, "Estimating soil organic carbon through loss on ignition: Effects of ignition conditions and structural water loss," *Eur. J. Soil Sci.*, vol. 66, no. 2, pp. 320-328, Mar. 2015, <https://doi.org/10.1111/ejss.12224>
- [15] J. M. Bremner and C. S. Mulvaney, Nitrogen-Total. In A.L. Page, R.H. Miller, and D.R. Keeney, Eds., *Methods of Soil Analysis, Part 2. Chemical and Microbiological Properties- Agronomy Monograph*, vol. 9, pp. 595-624. <https://doi.org/10.2134/agronomogr9.2.2ed.c31>
- [16] Ж. Золжаргал ба Б. Намуун, "Хөрсний хөдөлгөөнт фосфор тодорхойлох аргуудын харьцуулалт," *Монголын хөрс судлал.*, vol. 4, хх. 107-113.
- [17] C. R. Jackson, H. L. Tyler, and J. J. Millar, "Determination of microbial extracellular enzyme activity in waters, soils, and sediments using high throughput microplate assays," *J. Vis. Exp.*, no. 80, 2013, <https://doi.org/10.3791/50399>
- [18] V. L. Cenini et al., "Linkages between extracellular enzyme activities and the carbon and nitrogen content of grassland soils," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 96, pp. 198-206, May 2016, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2016.02.015>
- [19] D. S. Allison and M. P. Virousek, "Responses of extracellular enzymes to simple and complex nutrient inputs," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 37, pp. 937-944, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2004.09.014>
- [20] D. S. Allison, N. M. B. Weintraub, T. Gartner, and M. P. Waldrop, "Evolutionary-Economic Principles as Regulators of Soil Enzyme Production and Ecosystem Function", In *Soil Enzym. Soil Biol*, vol. 22. G. Shukla and A. Varma, Eds., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011. https://doi.org/10.1007/978-3-642-14225-3_12
- [21] Z. Kotrocó et al., "Soil enzyme activity in response to long-term organic matter manipulation," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 70, pp. 237-243, Mar. 2014, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2013.12.028>
- [22] G. Li, S. Kim, S. H. Han, H. Chang, D. Du, and Y. Son, "Precipitation affects soil microbial and extracellular enzymatic responses to warming," *Soil Biol. Biochem.*, vol. 120, pp. 212-221, May 2018, <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.02.014>
- [23] R. Vargas et al., "Precipitation variability and fire influence the temporal dynamics of soil CO₂ efflux in an arid grassland," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 18, no. 4, pp. 1401-1411, Apr. 2012, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2011.02628.x>
- [24] L. Wang et al., "Extracellular Enzyme Stoichiometry Reveals Soil Microbial Carbon and Phosphorus Limitations in the Yimeng Mountain Area, China," *Forests*, vol. 13, no. 5, May 2022, <https://doi.org/10.3390/f13050692>
- [25] N. C. Dove, M. E. Barnes, K. Moreland, R. C. Graham, A. A. Berhe, and S. C. Hart, "Depth dependence of climatic controls on soil microbial community activity and composition," *ISME Commun.*, vol. 1, no. 1, Dec. 2021, <https://doi.org/10.1038/s43705-021-00081-5>
- [26] D. Chen et al., "Effects of aridity on soil microbial communities and functions across soil depths on the Mongolian Plateau," *Funct. Ecol.*, vol. 33, no. 8, pp. 1561-1571, 2019, <https://doi.org/10.1111/1365-2435.13359>
- [27] W. Borken and E. Matzner, "Reappraisal of drying and wetting effects on C and N mineralization and fluxes in soils," *Glob. Chang. Biol.*, vol. 15, no. 4, pp. 808-824, 2009, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2008.01681.x>

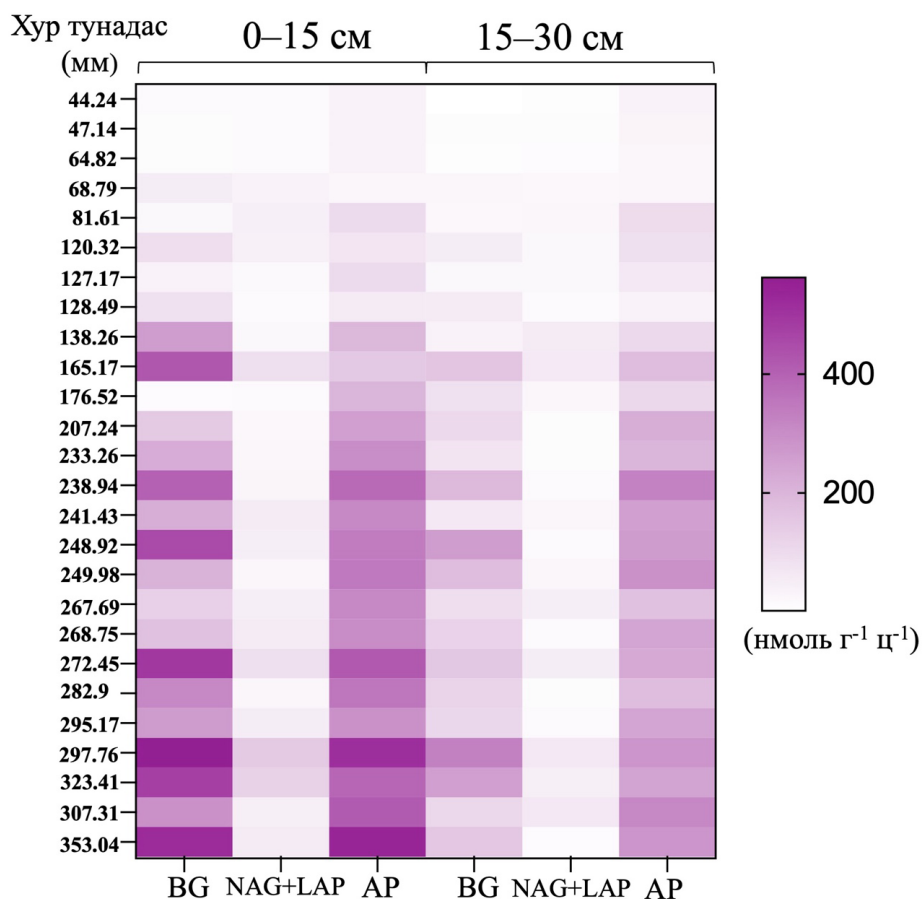


1-р зураг. Хөрсний дээж цуглуулсан цэгүүдийг хур тунадасны градиентын зурагт тэмдэглэсэн байдал.

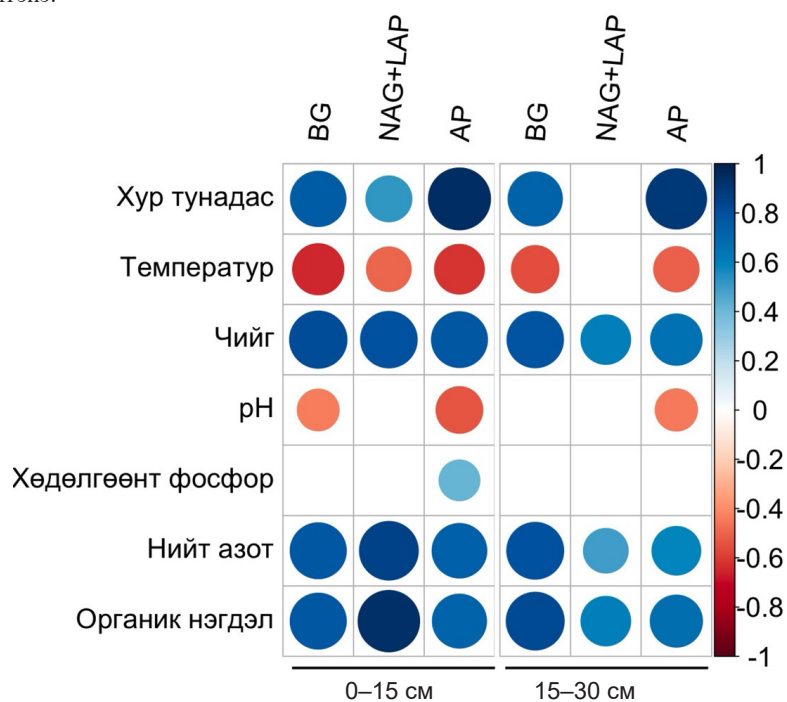
1-р хүснэгт. С, N, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийн дээж цуглуулсан цэгүүд болон хөрсний гүнээс хамаарсан ялгааг two-way ANOVA ашиглан шалгасан үр дүн

		BG	NAG+LAP	AP
Дээж цуглуулсан цэгүүд	F-харьцаа	4.8	3.55	10.8
	p-утга	<0.0001	0.001	<0.0001
	Нийт вариацийн %	70.2	70.4	94.8
Хөрсний гүн	F-харьцаа	26.62	12.23	24.6
	p-утга	<0.0001	0.001	<0.0001
	Нийт вариацийн %	15.5	9.7	8.6

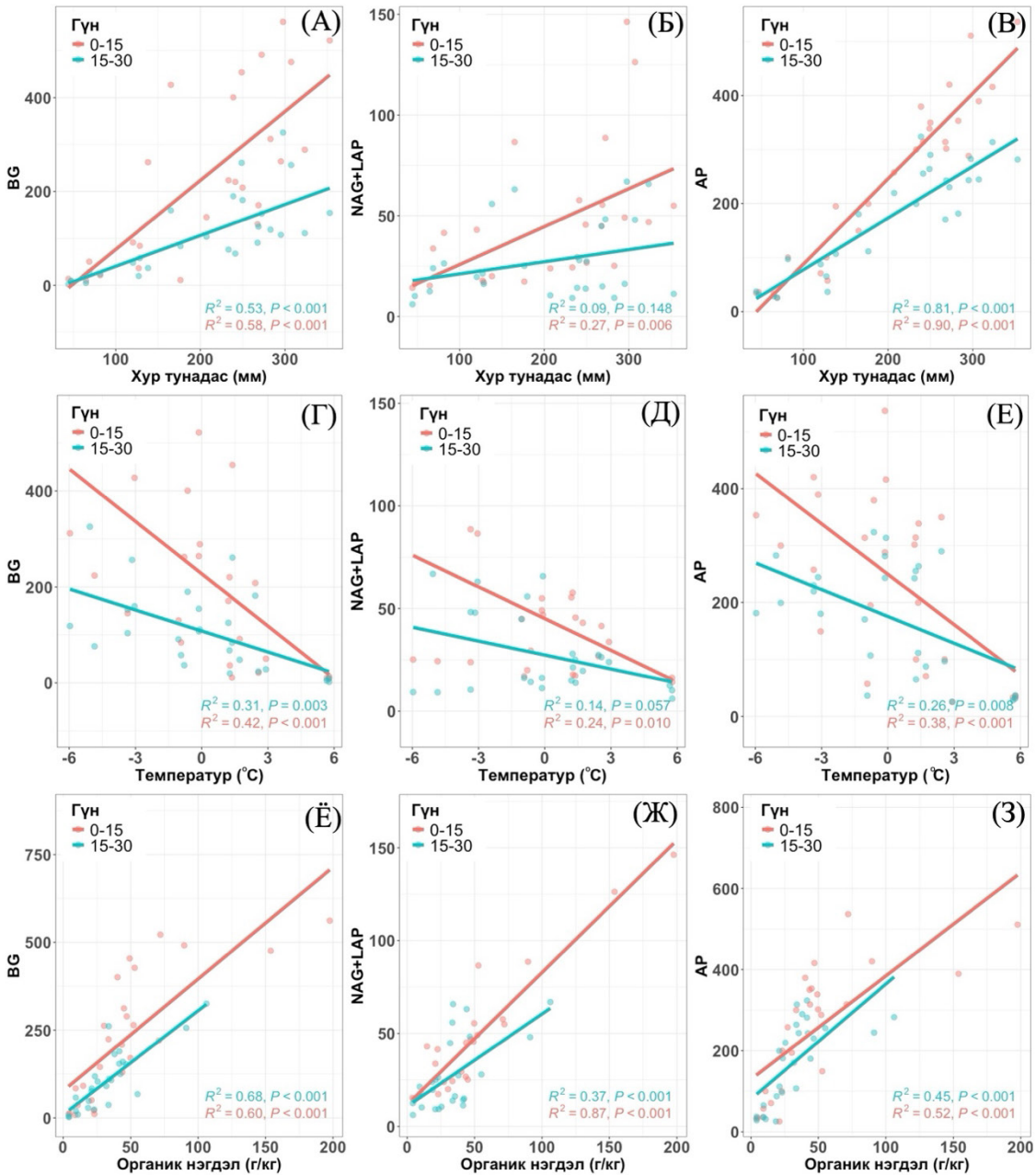
BG: β-глокозидаза
 LAP: Лейцин аминопептидаза
 NAG: N-ацетилглюкозамидаза
 AP: Хүчиллэг фосфатаза



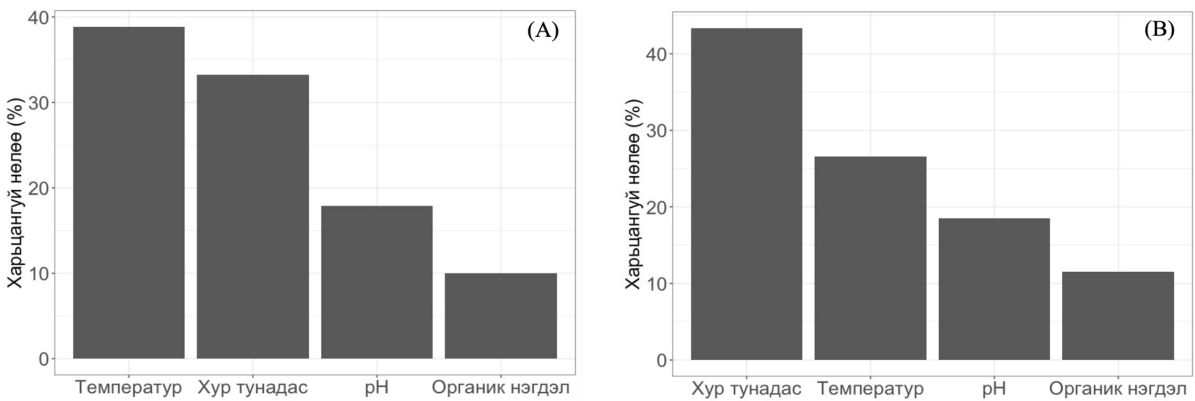
2-р зураг. C, N, P-ын эргэлтэд оролцдог энзимийн идэвхийг харьцуулсан байдал. Хөрсний хоёр өөр гүн дэх энзимийн идэвхийг олон жилийн дундаж хур тунадасны нэмэгдэх дарааллаар байрлуулав. Өнгө нь гүн байх тусам энзимийн идэвх өндөр гэдгийг илтгэнэ.



3-р зураг. Хөрсний энзимийн идэвх болон хүрээлэн буй орчны хувьсагчдын хоорондын хамаарлыг Пирсоны корреляцийн анализаар шалгасан үр дүнг хөрсний хоёр өөр гүнээр (0–15 см ба 15–30 см) харуулав. Хур тунадас, олон жилийн дундаж хур тунадас; Температур, олон жилийн дундаж температур; Органик нэгдэл, хөрсний органик нэгдэл; Чийг, хөрсний чийгийн агууламж; рН; хөрсний рН; Хөдөлгөөнт фосфор, хөрсний хөдөлгөөнт фосфор; Нийт азот, хөрсний нийт азот; Зөвхөн статистикийн ач холбогдол бүхий хамаарал ($p < 0.05$)-ыг харуулав.



4-р зураг. Хур тунадас (А-В), температур (Г-Е) болон хөрсний органик нэгдэл (Ё-З)-ийн C, N ба P-ын эргэлтэд оролцдог энзимүүдийн идэвхэд үзүүлэх нөлөөг шугаман регрессийн анализаар шалгасан үр дүн.



5-р зураг. Хөрсний энзимийн идэвхэд хөрс ба хүрээлэн буй орчны хүчин зүйлийн харьцангуй нөлөөг хөрсний хоёр гүнд харуулсан байдал. А. 0–15 см; Б. 15–30 см.