

DOI:10.13870/j.cnki.stbcb.2026.01.001 CSTR:32310.14.stbcb.2026.01.001

孙悦,毛天旭,张涛,等.青藏高原典型高寒草地土壤化学性质和酶活性特征[J].水土保持学报,2026,40(1):34-42.

SUN Yue, MAO Tianxu, ZHANG Tao, et al. Soil chemical properties and enzyme activity characteristics in typical alpine grasslands of the Tibetan Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2026, 40(1):34-42.

青藏高原典型高寒草地土壤化学性质和酶活性特征

孙悦¹, 毛天旭¹, 张涛², 王根绪³

(1. 贵州大学林学院, 贵阳 550025; 2. 贵州大学乡村振兴研究院(新质生产力研究院), 贵阳 550025; 3. 四川大学水利水电学院, 成都 610065)

摘要: [目的] 为探究青藏高原不同高寒草地类型土壤酶活性的分布规律及其影响因素。[方法] 选择青藏高原分布面积广泛的高寒沼泽草甸(ASM)、高寒草甸(AM)、高寒草原(AS)3种典型高寒草地为研究对象,测定0~100 cm土层剖面上4种酶的活性,分析不同类型高寒草地土壤化学性质对酶活性的影响。[结果] 1)土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和铵态氮质量分数均表现为ASM>AM>AS($p<0.05$),硝态氮质量分数在AS中最高(0.83 mg/g),3种高寒草地土壤pH均呈弱碱性;随着土层深度增加,土壤养分逐渐减少,而pH逐渐升高。2)ASM的土壤蔗糖酶活性显著高于AM和AS,分别提高4.51%和83.18%($p<0.05$),土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性均表现为AM>ASM>AS($p<0.05$);4种土壤酶活性均随着土层深度增加而减弱。3)土壤有机碳对ASM和AM土壤酶活性的影响最为显著,贡献率分别为96.60%和89.20%($p<0.05$),而AS土壤酶活性的主要环境因子是土壤硝态氮和pH,其贡献率分别为55.30%和24.90%($p<0.05$)。[结论] 高寒草地土壤酶活性在不同类型间差异显著,有机碳、硝态氮和pH是其重要的调控因素。研究结果可为揭示高寒草地生态系统土壤酶活性变化机理及其对气候变暖的响应提供科学参考,同时为揭示高寒草地土壤养分循环规律和制定草地管理策略提供科学依据。

关键词: 青藏高原; 高寒草地; 土壤化学性质; 土壤酶活性

中图分类号:S157.1 文献标识码:A 文章编号:1009-2242(2026)01-0034-09

Soil Chemical Properties and Enzyme Activity Characteristics in Typical Alpine Grasslands of the Tibetan Plateau

SUN Yue¹, MAO Tianxu¹, ZHANG Tao², WANG Genxu³

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Institute of Rural Revitalization (Institute of New Quality Productive Forces), Guizhou University, Guiyang 550025, China; 3. College of Water Resource and Hydropower, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: [Objective] To investigate the distribution patterns of soil enzyme activities and their influencing factors in different alpine grassland types on the Tibetan Plateau. [Methods] Three typical alpine grasslands widely distributed on the Tibetan Plateau were selected as research subjects: alpine swamp meadow (ASM), alpine meadow (AM) and alpine steppe (AS). The activities of four enzymes were measured in the 0–100 cm soil profiles, and the effects of soil chemical properties on enzyme activities in different alpine grassland types were analyzed. [Results] 1) The mass fractions of soil organic carbon, total nitrogen, total phosphorus, total potassium, and ammonium nitrogen followed the order: ASM>AM>AS ($p<0.05$). The mass fraction of nitrate nitrogen was highest in AS (0.83 mg/g). The soil of all three alpine grassland types exhibited slightly alkaline pH conditions. As soil depth increased, soil nutrient contents gradually decreased, while pH gradually increased. 2) The soil sucrase activity in ASM was significantly higher than that in AM and AS, increasing by

收稿日期:2025-03-09 修回日期:2025-06-12 录用日期:2025-07-05 网络首发日期(www.cnki.net):2025-08-13

资助项目:国家自然科学基金项目(41701037,41701081)

第一作者:孙悦(1999—),女,硕士,主要从事水土保持与荒漠化防治研究。E-mail:SYue_GZU@163.com

通信作者:毛天旭(1984—),男,博士,副教授,主要从事土壤物理和生态水文研究。E-mail:txmao@gzu.edu.cn

http://stbcb.alljournal.com.cn

4.51% and 83.18%, respectively ($p < 0.05$). The activities of soil urease, alkaline phosphatase, and catalase followed the order: AM > ASM > AS ($p < 0.05$). All four soil enzyme activities decreased with increasing soil depth. 3) Soil organic carbon had the most significant influence on soil enzyme activities in ASM and AM, with contribution rates of 96.60% and 89.20%, respectively ($p < 0.05$). The main environmental factors influencing soil enzyme activities in AS were soil nitrate nitrogen and pH, with contribution rates of 55.30% and 24.90%, respectively ($p < 0.05$). [Conclusion] Soil enzyme activities were significantly different among different types of alpine grassland, and organic carbon, nitrate nitrogen and pH were the important regulatory factors. The results can provide scientific references for revealing the mechanisms of soil enzyme activity variations and their responses to climate warming in alpine grassland ecosystem, as well as a scientific basis for understanding nutrient cycling patterns in alpine grassland soil and formulating grassland management strategies.

Keywords: Tibetan Plateau; alpine grassland; soil chemical properties; soil enzyme activity

Received: 2025-03-09

Revised: 2025-06-12

Accepted: 2025-07-05

Online(www.cnki.net): 2025-08-13

土壤酶作为土壤微生物代谢、植物根系分泌物及动植物残体分解的产物^[1],具有较强的催化功能,主导着有机物质矿化分解、养分营养元素的循环与迁移,以及能量的传递与转换过程^[2]。土壤酶对温度、降水及土壤理化性质等环境因子具有高度敏感性,可快速响应微生物群落、有机碳及土壤性质细微变化,故常被作为评估土壤物质、能量流动和土壤质量的关键生物学指标^[3]。

青藏高原因其独特的高海拔和寒冷气候特征,是全球气候变化中极为敏感且脆弱的区域^[4]。作为青藏高原重要的陆地生态系统,高寒草地在调节区域气候、涵养水源与维持生物多样性方面发挥着重要功能^[5]。国内外关于高寒草地土壤酶活性的研究主要集中在其对气候变暖^[6]、降雨格局变化^[7]、氮沉降^[8]、施肥^[9]、放牧强度^[10]、土地利用方式^[11]和草地退化等^[12]外界环境因素的响应,大多限于特定的植被类型,对不同高寒草地类型间土壤酶活性的研究较少;此外,大多针对高寒草甸表层(0~20 cm)土壤,对表层以下土壤酶活性鲜有涉及。基于此,本研究以青藏高原分布广泛的高寒沼泽草甸(alpine swamp meadow, ASM)、高寒草甸(alpine meadow, AM)和高寒草原(alpine steppe, AS)3种典型的高寒草地为研究对象,测定0~100 cm土层土壤理化性质和4种土壤酶活性,分析土壤酶活性的剖面分布规律及其与土壤理化性质的相关性,揭示影响不同类型高寒草地土壤酶活性的关键因素,为研究青藏高原高寒草地生态系统土壤酶活性及其对气候变暖的响应提供科学参考,同时为揭示高寒草地土壤养分循环规律和制定高寒草地管理策略提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究选取青藏高原风火山地区的左冒西孔曲小流域(34°40'~34°48'N, 92°50'~93°03'E)作为研究对象,总面积达112.5 km²,隶属于青海省玉树藏族自治州曲麻莱县。该区域属于青藏高原干旱高寒气候区,海拔为4 610~5 323 m,流域区内无冰川发育,为季节性积雪区。研究区年平均气温低至-5.2℃,年平均降水量300 mm,其中超过80%的降水集中在6—9月。每年11月至翌年4月为持续冻结期,此阶段降雪量仅占年降水量的极小部分(<5%),年平均蒸发量1 300 mm。研究区内多年冻土层厚度50~120 m,活动层厚度0.8~2.5 m。研究区内为天然草地,放牧强度低,广泛分布有高寒草甸、高寒沼泽草甸和高寒草原3种草地类型(表1),高寒草甸主要占据山地坡面两侧、圆顶山及河谷阶地等地形部位,其植被组成以耐寒的多年生中生植物为优势种,具有明显的低矮草丛特征,地表覆盖发育良好的草皮结层,植物群落层次结构较为单一,但整体植被覆盖度较高。高寒沼泽草甸则集中分布于地形低洼区域,如山间盆地、排水不良的碟形洼地、平缓滩地及潜水溢出带等水分条件优越的地段,其植物群落以湿中生和湿生多年生草本植物为主,不仅群落盖度大,而且物种多样性较为丰富。相比之下,高寒草原主要分布在丰火山东北部的平原区域,该地区由于土壤水分匮乏,生态环境呈明显的干旱化特征,其优势种主要为适应干旱条件的禾本科植物^[13-14]。

1.2 样品采集

2019年7月底,在青藏高原风火山小流域及周边选择高寒沼泽草甸(alpine swamp meadow,

ASM)、高寒草甸(alpine meadow, AM)和高寒草原(alpine steppe, AS)3种典型高寒草地为研究对象(图1),每种草地类型设3个5 m×5 m的样方,样方间距>100 m,每个样方内沿对角线设置3个采样点,每个采样点开挖土壤剖面分别采集0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层土壤样

品,采样后将3个采样点的土样混合后用四分法取土样约1 kg。土壤样品分为2份,一份经1 mm孔径筛分,并在4℃冷藏保存,供酶活性测定;另一份在实验室自然风干后,人工剔除砾石、根系和凋落物等杂质,再经2 mm孔径筛分,用于土壤理化性质的分析。

表1 样地信息

Table 1 Information of sample plots

草地类型	物种组成	植被盖度/%	土壤类型
高寒草甸(AM)	矮嵩草(<i>K. humilis</i>)、高山嵩草(<i>Kobresia pygmaea</i>)、线叶嵩草(<i>K. capillifolia</i>)、北方嵩草(<i>K. bellardii</i>)、禾叶嵩草(<i>K. graminifolia</i>)和粗喙苔草(<i>Carex scabriuscula</i>)等	30~70	草甸土
高寒沼泽草甸(ASM)	青藏苔草(<i>Carex atrofusca</i>)、藏嵩草(<i>Kobresia xizangica</i>)、羊茅(<i>Festuca ovina</i>)等	90	沼泽化草甸土
高寒草原(AS)	紫花针茅(<i>Stipa purpurea</i> Griseb.)、早熟禾(<i>Poa annua</i> L.)等	20~45	草原土

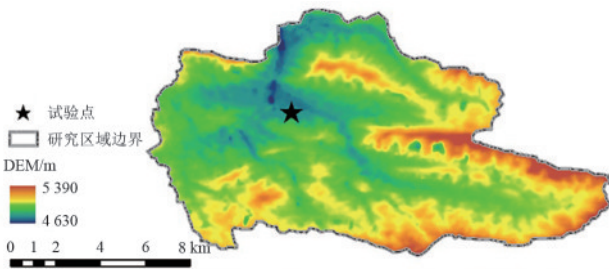


图1 研究区概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.3 样品测定

1.3.1 土壤化学性质测定 用CleverChem全自动间断化学分析仪测定土壤全氮(TN)、硝态氮($\text{NO}_3\text{-N}$)和铵态氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$);土壤全磷(TP)采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法;全钾(TK)采用NaOH消解后,采用火焰光度法测定;土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾氧化-外加加热法测定;土壤pH采用电位法,水土体积质量比为2.5:1^[15]。

1.3.2 土壤酶活性测定 过氧化氢酶(CAT)采用高锰酸钾滴定法测定;脲酶(UE)采用苯酚钠-次氯酸钠比色法测定;碱性磷酸酶(ALP)采用磷酸苯二钠比色法测定;蔗糖酶(SC)采用3,5-二硝基水杨酸比色法^[16]测定。

1.4 数据分析

使用Excel 2016软件对数据进行整理,统计分析通过SPSS 27软件完成,包括单因素方差分析(One-way ANOVA)和多重比较(Duncan);采用Pearson相关性分析高寒草地土壤酶活性和化学性质的关系。使用Canoco 5软件进行冗余分析(RDA),通过蒙特卡洛检验评估各因子对土壤酶活性的解释率及显著性。

2 结果与分析

2.1 不同高寒草地土壤化学性质

由图2可知,在0~100 cm全土层,ASM土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和铵态氮质量分数显著高于AM和AS($p<0.05$);而AS的硝态氮质量分数显著高于其他2种草地类型($p<0.05$);AM土壤pH显著高于ASM和AS($p<0.05$)。整体来看,ASM养分含量最高,AS最低,说明AS土壤养分储存能力较弱。ASM和AM有机碳质量分数在10~20、20~40 cm土层显著下降,相较于0~10 cm土层分别下降41.82%、61.71%和19.43%、42.55%。土壤全氮、全钾质量分数在ASM和AM的40~60 cm土层显著下降,而在AS各土层间无显著变化($p>0.05$)。3种草地类型中土壤全磷质量分数随土层深度增加变化不显著($p>0.05$),土壤铵态氮和硝态氮质量分数随土层深度增加呈下降趋势,而土壤pH呈增加趋势。

2.2 不同高寒草地土壤化学计量比

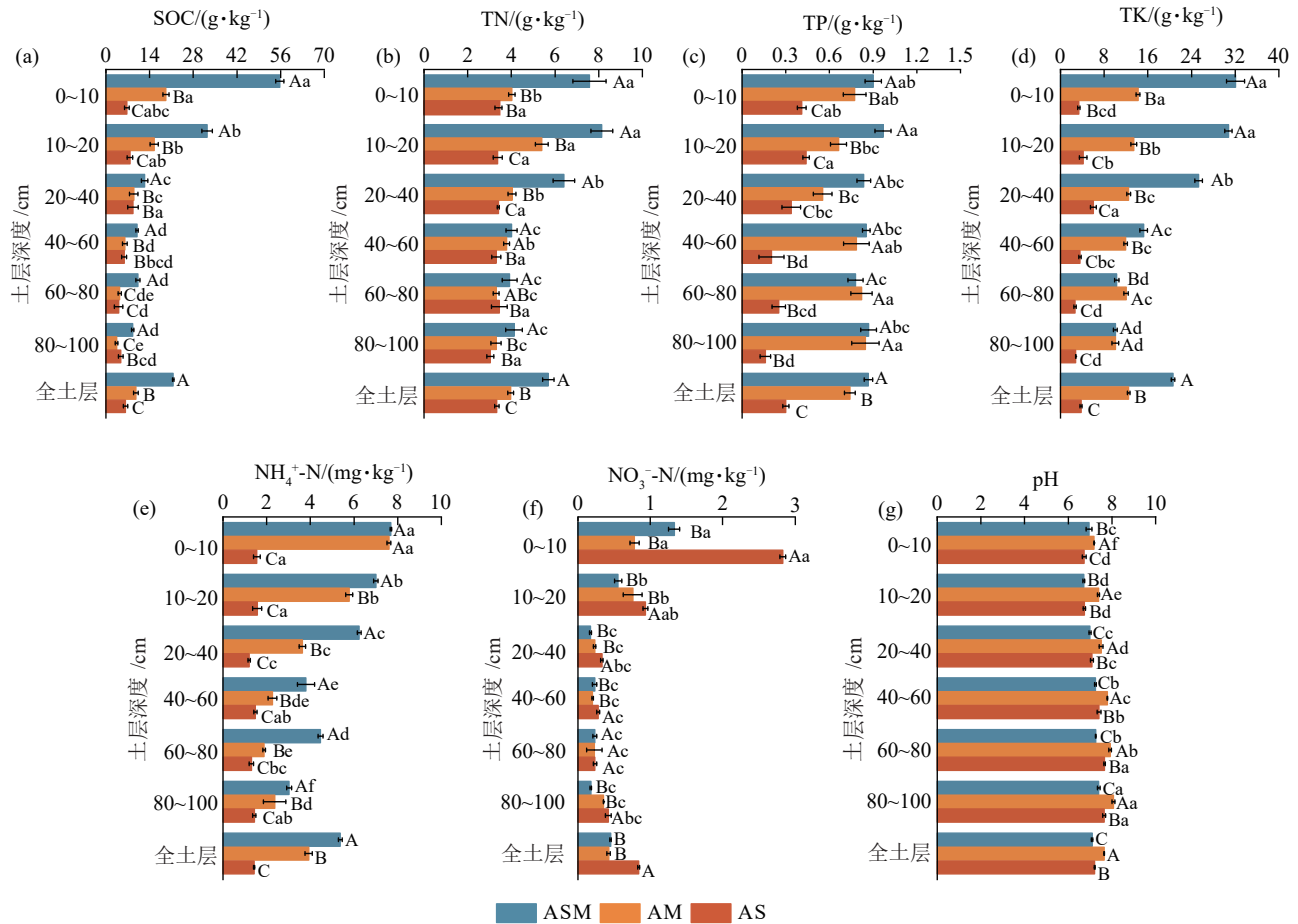
由图3可知,3种高寒草地类型在不同土层深度的土壤化学计量比存在显著差异。土壤C:N在ASM、AM和AS中分别为1.95~7.40、1.04~5.11和1.20~2.55,整体表现为ASM>AM>AS,且随土层深度的增加整体呈下降趋势,表明高寒草地表层土壤碳积累较多,而氮分布相对稳定。土壤C:P在3种高寒草地中分别为9.89~62.01、4.03~25.12和16.16~27.51。随土层加深,ASM和AM的C:P普遍呈下降趋势;而AS在各土层间波动较小,变化不显著。土壤N:P在ASM、AM和AS分别为4.69~8.43、3.93~8.17和7.70~19.49。ASM和AM在40~

60 cm 土层 N:P 显著下降后趋于稳定;而 AS 则随土层深度增加逐渐升高,尤其在 60 cm 以下土层中显著高于浅层土壤。

2.3 不同高寒草地土壤酶活性

由图 4 可知,土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶活性依次表现为 AM>ASM>AS($p<0.05$);在 0~

100 cm 全土层中 ASM 土壤蔗糖酶活性分别比 AM 和 AS 提高 4.51%、83.18%($p<0.05$)。随着土层深度的增加,3 种高寒草地类型土壤脲酶、土壤碱性磷酸酶和土壤蔗糖酶活性在 0~40 cm 土层内急剧下降,表明表层土壤是酶活性最活跃区域。AM 和 AS 土壤过氧化氢酶活性在各土层间变化较小。



注:不同大写字母表示在同一土层不同草地类型间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示在同一草地类型不同土层间差异显著($p<0.05$)。下同。

图 2 不同高寒草地类型土壤化学性质

Fig. 2 Soil chemical properties in different alpine grassland types

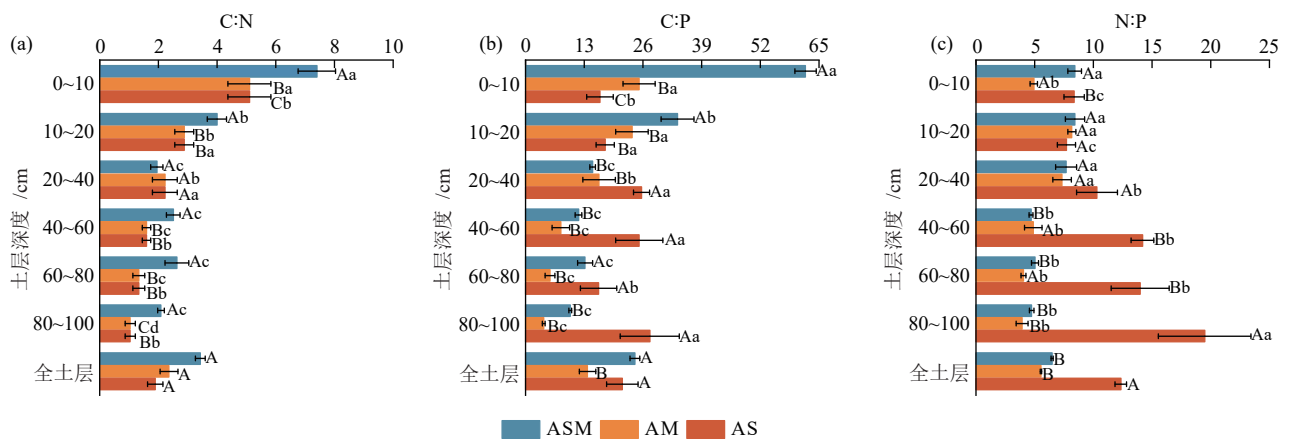
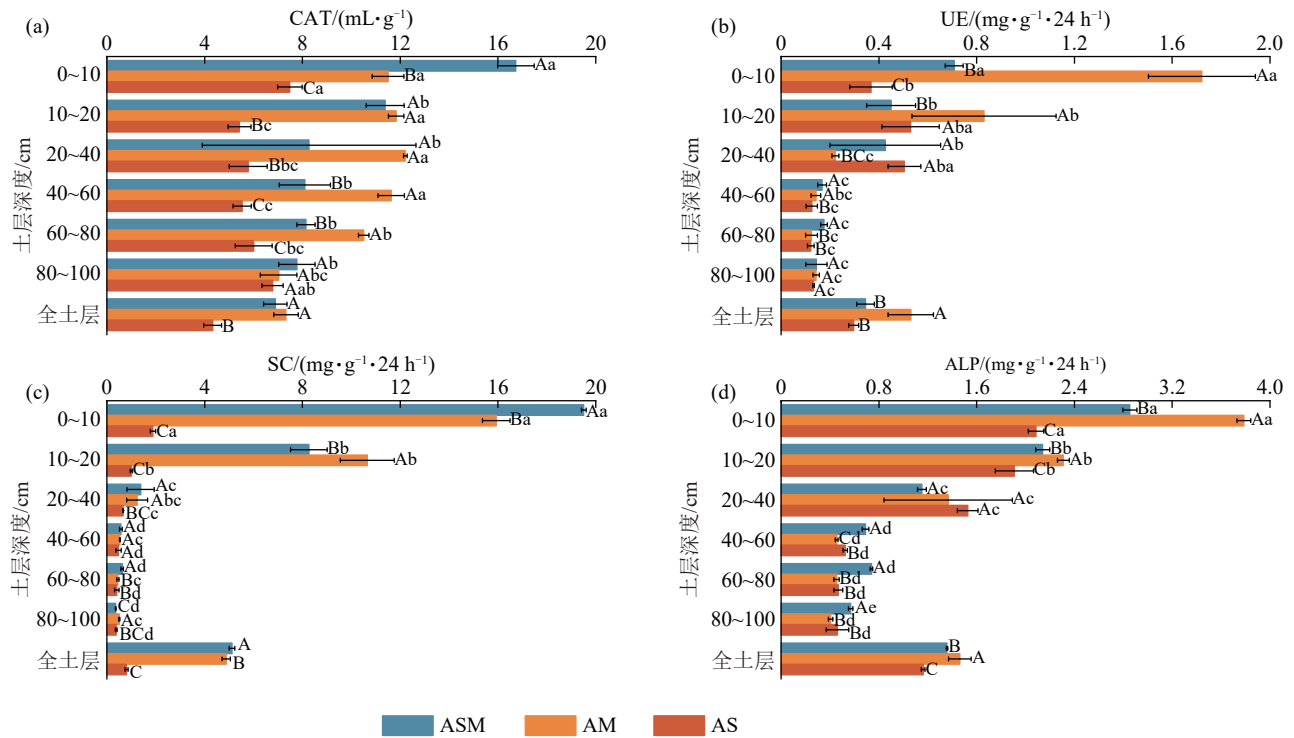


图 3 不同高寒草地类型土壤化学计量比

Fig. 3 Soil stoichiometric ratios in different alpine grassland types



注:CAT单位mL/g表示1g土壤消耗高锰酸钾的体积,mL;UE单位mg/(g·24h)表示24h后1g土壤中NH₃-N的质量,mg;SC单位mg/(g·24h)表示24h后1g土壤生成葡萄糖的质量,mg;ALP单位mg/(g·24h)表示24h后1g土壤中释放出酚的质量,mg。

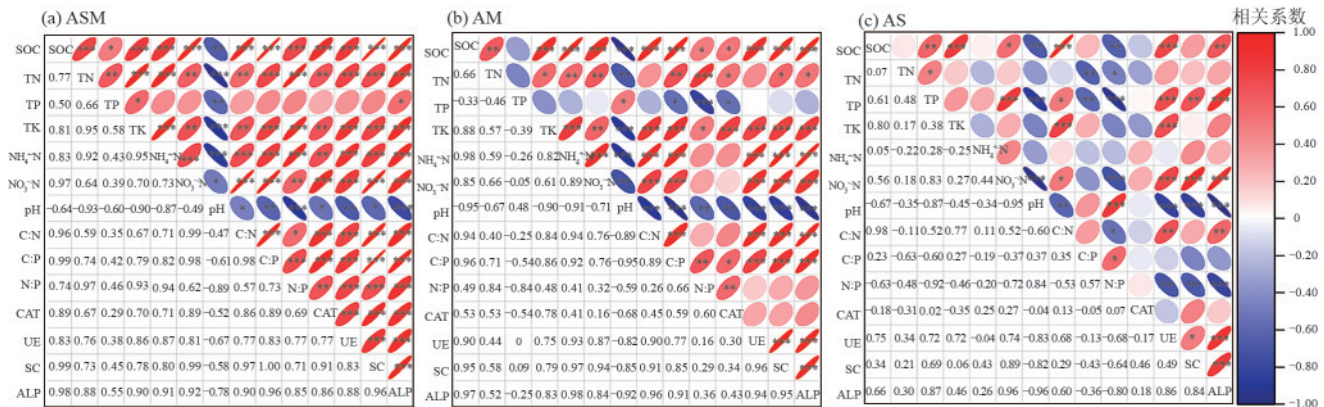
图 4 不同高寒草地类型土壤酶活性

Fig. 4 Soil enzyme activities in different alpine grassland types

2.4 不同高寒草地土壤化学性质与酶活性相关性

在0~100 cm全土层中,Pearson相关性分析结果(图5)显示,3种高寒草地类型土壤pH与土壤酶活性均呈显著负相关($p < 0.05$)。在ASM和AM中,土壤酶活性与土壤大部分养分指标呈显著正相关($p < 0.05$),而在AS中土壤酶活性仅与有机碳、硝态氮和全磷呈显著正相关($p < 0.05$)。ASM土壤中C:N、C:

P和N:P均与4种酶活性呈极显著正相关($p < 0.05$),AM土壤中C:N和C:P与土壤脲酶、蔗糖酶和碱性磷酸酶活性呈显著正相关($p < 0.05$),而AS中仅N:P与土壤酶活性呈显著负相关($p < 0.05$)。总体上,ASM和AM中土壤酶活性与土壤化学性质的相关性系数显著高于AS,说明ASM和AS土壤理化性质对酶活性调控作用更为显著。



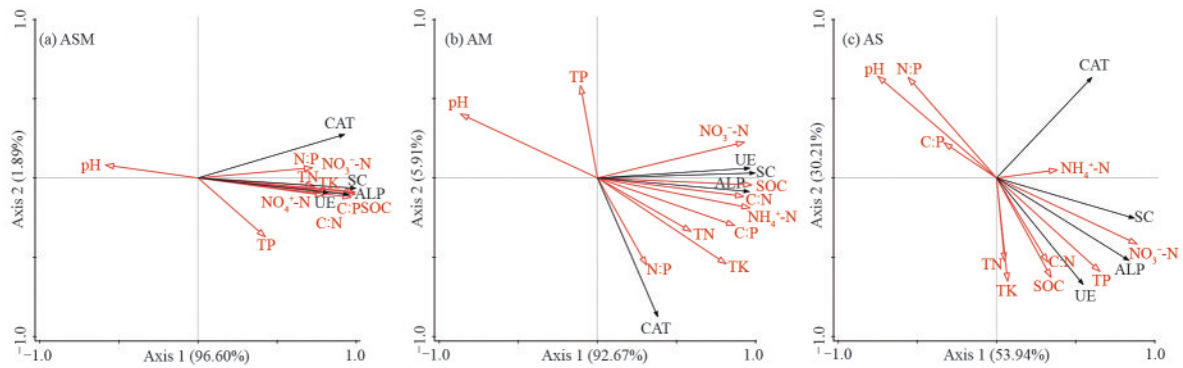
注:*表示显著相关($p < 0.05$);**表示极显著相关($p < 0.01$)。

图 5 不同高寒草地类型土壤酶活性与土壤因子的相关性

Fig. 5 Soil enzyme-parameter relationships in different alpine grasslands

冗余分析结果(图6)显示,3种草地类型第1、2主成分轴的累计贡献率均超过53.0%,表明分析结果的可靠性。由表2可知,SOC是ASM和AM土壤酶活性的主要环境因子,对土壤酶活性有显著

影响,其贡献率分别为96.6%和89.2%($p < 0.05$)。AS土壤酶活性的主要环境因子是土壤硝态氮和pH,对土壤酶活性的贡献率分别为55.3%和24.9%($p < 0.05$)。



注:黑色实心箭头表示土壤酶活性,红色空心箭头表示土壤因子。

图 6 不同高寒草地类型土壤酶活性与土壤因子的 RDA

Fig. 6 RDA of soil enzyme activities and soil factors in different alpine grassland types

表 2 不同高寒草地类型 RDA 排序结果各土壤因子的单独贡献率

Table 2 Individual contribution rates of soil factors in RDA ranking results for different alpine grassland types

草地类型	土壤化学性质	贡献率/%	F	p
高寒沼泽草甸(ASM)	SOC	96.6	318.0	0.002
	TP	0.3	0.9	0.332
	C:P	0.6	2.2	0.150
	pH	0.3	0.9	0.398
	N:P	0.5	1.8	0.232
	NH ₄ ⁺ -N	0.6	2.7	0.124
	NO ₃ ⁻ -N	0.7	3.4	0.114
	TN	0.3	1.4	0.304
	C:N	0.2	1.3	0.292
TK	<0.1	<0.1	0.872	
高寒草甸(AM)	SOC	89.2	120	0.002
	pH	4.7	9.9	0.002
	TP	2.3	6.5	0.006
	TK	1.4	5.3	0.008
	NH ₄ ⁺ -N	1.5	9.2	0.006
	N:P	0.3	2.2	0.118
	NO ₃ ⁻ -N	0.2	1.1	0.322
高寒草原(AS)	C:P	0.2	1.4	0.240
	C:N	<0.1	0.6	0.512
	TN	<0.1	0.3	0.696
	NO ₃ ⁻ -N	55.3	14.6	0.002
	pH	24.9	10.5	0.004
	TK	2.1	0.9	0.372
	N:P	1.0	0.4	0.596
	TP	3.2	1.3	0.292
	TN	1.3	0.5	0.534
	C:P	2.3	0.9	0.370
SOC	9.4	5.2	0.038	
C:N	0.3	0.1	0.852	
NH ₄ ⁺ -N	0.3	0.1	0.872	

注:p<0.05表示差异性显著。

3 讨论

土壤有机碳是土壤肥力的物质基础,也是氮、磷、钾等营养元素的主要来源。因此,有机碳在土壤中的积累与矿化过程直接影响氮、磷、钾质量分数的变化。本研究中,土壤养分表现为ASM>AM>AS,主要归因于ASM形成于高寒偏湿润气候区,海拔较低,植被发育良好,能够为土壤提供更多有机质输入。高洋等^[17]分析长江源区高寒草地土壤特征发现,土壤养分质量分数依次为沼泽化草甸>典型草甸>草原化草甸>沙生草地,与本研究结果一致;张阳灿等^[18]对祁连山不同草地类型研究表明,土壤养分顺序为高寒草甸>高寒湿地>温性草原>高寒荒漠,该研究测得有机碳质量分数高于本研究,可能因采样区植被盖度和地上生物量差异所致,进一步表明不同草地类型生产力的差异引起养分输入的变化;李娅丽等^[19]以陇中温性草原为研究对象,其草地土壤养分质量分数低于本研究区,说明区域气候差异影响植被生长,进而影响土壤养分积累。此外,因高寒草地常年处于低温冻土环境,土壤生物活动受限,不同草地类型土壤养分分解速率存在差异,是造成土壤养分差异的另一重要原因^[20]。在ASM中,多年冻土层保存完好,有效阻止土壤水分下渗,增强保水保肥能力,同时限制微生物活性,有利于养分固定^[17]。本研究发现,AS土壤硝态氮质量分数和土壤N:P显著高于ASM和AM,可能导致氮素损失,生态系统稳定性较弱。YANG等^[21]研究指出,草地退化导致植被种类减少,固氮功能减弱,生物残体分解加速,有机氮向无机氮转化增强,从而提高硝态氮。除土壤全磷外,3种高寒草地类型土壤养分和土壤化学计量比均随着土层深度的增加呈先下降后趋于稳定趋势,与土壤养分的垂直分布规律一致^[22-24]。高寒草地以浅根植物为主,根系集中在0~20 cm表层^[25],地表植被对表层土壤养分积累作用更显著;随土层深

度增加,水分迁移和溶质扩散作用进一步稀释土壤养分^[22]。本研究中,全磷质量分数随土层深度变化不显著,可能与磷元素迁移性弱、吸附性强有关。3种高寒草地类型的土壤均呈弱碱性,且pH随着土层深度的增加而升高,与土壤养分的变化趋势相反。杨媛媛等^[26]研究发现,上层土壤有机质及有机酸积累较多,导致pH低于下层土壤,与本研究结果相符。

土壤酶作为微生物代谢的关键驱动因子,其活性可直接反映土壤肥力状态及养分循环强度^[1]。本研究结果表明,不同草地类型土壤酶活性存在显著差异,土壤脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶依次表现为AM>ASM>AS。AS养分低,底物供给量不足,限制微生物可利用养分的获取,进而影响碳氮循环相关酶类的活性。张欢欢等^[27]研究表明,藏北不同高寒草地类型间土壤养分是导致酶活性显著差异的原因。此外,不同草地类型的生态环境与土壤酶活性密切相关。ASM常年处于淹水状态,厌氧环境抑制好氧微生物及其代谢相关酶类的活性,降低土壤碳矿化速率;而AS环境较为干燥,植被稀疏且种类少,不利于根系分泌酶类物质,也间接影响土壤酶活性水平。因此,在高寒气候长期作用形成的特殊生境,使得微生物分泌酶与其养分需求间呈协同关系,是维持草地生态系统稳定性的关键调节机制^[28]。土壤有机碳与土壤蔗糖酶活性呈显著正相关,蔗糖酶活性可作为评价土壤熟化程度和土壤肥力的指标^[29]。在本研究中,ASM和AM的土壤蔗糖酶活性高于AS,推测与其土壤有机碳质量分数相关。3种高寒草地类型土壤酶活性随土层深度的增加而逐渐降低,主要由于植物根系集中分布于表层土壤,使得表层土壤养分、水分和通气性优于下层土壤,为酶促反应提供更适宜的环境条件^[26]。

本研究发现,土壤化学性质与土壤酶活性间关系密切。尤其在ASM与AM中,二者的相关系数整体高于AS,说明土壤酶活性强度直接影响有机质分解和养分释放速率,进而决定土壤有效养分的供给能力。酶活性越高,越有利于高寒草地生态系统中的土壤养分循环^[30]。本研究土壤有机碳是ASM和AM土壤酶活性的主要驱动因子。土壤有机碳不仅为酶促反应提供底物来源,还作为有机载体在维持酶活性和稳定性方面发挥关键作用^[31]。同时,有机碳有助于改善土壤孔隙结构和通气性,为土壤酶提供适宜的环境。本研究还发现,ASM和AS土壤C:N和C:P比与土壤酶活性显著相关,揭示土壤酶活性在碳稳定性评估和草地管理中的潜在价值。相比之下,AS的酶活性主要受硝态氮和pH调控,可能

与其土壤有机碳较少和硝态氮积累有关。已有研究^[32]表明,氮素矿化过程能显著增强微生物和酶活性,而pH则通过影响有机质分解、微生物群落结构及活性水平,从而间接调控酶促反应^[33]。不同高寒草地土壤性质的异质性和土壤酶影响因子的差异,反映高寒草地在特殊环境下,土壤酶活性受到较为复杂且特殊的调控机制。

4 结论

1)高寒沼泽草甸土壤养分最高,其次是高寒草甸,说明在长期湿润、低温环境下具有较强的碳氮积累与养分固持能力;而高寒草原养分较低,土壤贫瘠,退化风险高。

2)高寒沼泽草甸表层土壤蔗糖酶活性最高,高寒草甸中脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶活性最高。土壤酶活性在0~40 cm土层内显著下降,40 cm以下土层趋于稳定,说明表层土壤是土壤酶活性的主要分布区。

3)有机碳是高寒沼泽草甸与高寒草甸土壤酶的驱动因子,贡献率分别为96.6%和89.2%,而高寒草原主要受硝态氮和pH调控,说明土壤酶活性高低与土壤中可供养分密切相关。

参考文献:

- [1] 徐春燕,王涛,贾晨波,等.贺兰山东麓荒漠植物对土壤化学性质和酶活性的影响[J].生态环境学报,2020,29(12):2346-2354.
XU C Y, WANG T, JIA C B, et al. Effects of different desert plants on the soil chemical properties and enzyme activities in Helanshan eastern region [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(12): 2346-2354.
- [2] SINSABAUGH R L. Phenol oxidase, peroxidase and organic matter dynamics of soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2010, 42(3): 391-404.
- [3] 刘进,李娟,龙健,等.西南喀斯特区土壤生态化学计量与酶活性的海拔特征[J].森林与环境学报,2022,42(2):113-122.
LIU J, LI J, LONG J, et al. Altitude dependence of soil ecological stoichiometry and enzyme activities in a karst region of Southwest China [J]. Journal of Forest and Environment, 2022, 42(2): 113-122.
- [4] ZHANG Y, DONG S K, GAO Q Z, et al. Soil bacterial and fungal diversity differently correlated with soil biochemistry in alpine grassland ecosystems in response to environmental changes [J]. Scientific Reports, 2017, 7: e43077.
- [5] SUN J, ZHOU T C, LIU M, et al. Water and heat availability are drivers of the aboveground plant carbon accumulation rate in alpine grasslands on the Tibetan Plateau [J].

- Global Ecology and Biogeography, 2020, 29(1):50-64.
- [6] 霍皇煜,米琦,周天财,等.青藏高原高寒草地土壤酶活性海拔地带性特征[J].生态学报,2024,44(1):405-415. HUO H Y, MI Q, ZHOU T C, et al. Altitude pattern of soil enzyme activities in alpine grasslands across the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(1):405-415.
- [7] JING X, CHEN X, XIAO W, et al. Soil enzymatic responses to multiple environmental drivers in the Tibetan grasslands: Insights from two manipulative field experiments and a meta-analysis[J]. Pedobiologia, 2018, 71:50-58.
- [8] WU J Q, WANG H Y, LI G, et al. Effects of nitrogen deposition on soil nitrogen fractions and enzyme activities in wet meadow of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientific Reports, 2024, 14: e31848.
- [9] 安晓婷,于中阳,胡生斌,等.不同施肥组合对高寒矿区土壤理化性质及酶活性的影响[J].草地学报,2025,33(3):984-991. AN X T, YU Z Y, HU S B, et al. Effects of different fertilization combinations on soil physicochemical properties and enzyme activities in alpine mining area [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3):984-991.
- [10] LIU S B, RAZAVI B S, SU X, et al. Spatio-temporal patterns of enzyme activities after manure application reflect mechanisms of niche differentiation between plants and microorganisms [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017, 112:100-109.
- [11] YANG Y G, YANG Y, GENG Y Q, et al. Effects of different land types on soil enzyme activity in the Qinghai Lake region [J]. Wetlands, 2018, 38(4):711-721.
- [12] WU J Q, WANG H Y, LI G, et al. Vegetation degradation impacts soil nutrients and enzyme activities in wet meadow on the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Scientific Reports, 2020, 10: e21271.
- [13] 蒋观利,吴青柏,张中琼.青藏高原不同高寒生态系统类型下多年冻土活动层水热过程差异研究[J].冰川冻土, 2018, 40(1):7-17. JIANG G L, WU Q B, ZHANG Z Q. Study on the differences of thermal-moisture dynamics in the active layer of permafrost in different alpine ecosystems on the Tibetan Plateau [J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(1):7-17.
- [14] 杨凯,王根绪,张涛,等.青藏高原多年冻土区不同水分条件的高寒草甸根系功能性状对增温的响应[J].生态学报, 2020, 40(18):6362-6373. YANG K, WANG G X, ZHANG T, et al. Responses of root functional traits to experimental warming in the alpine meadow with different soil moisture in the permafrost region of the Qinghai-Tibet Plateau [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(18):6362-6373.
- [15] 杨剑虹,王成林,代亨林.土壤农化分析与环境监测[M].北京:中国大地出版社,2008. YANG J H, WANG C L, DAI H L. Soil agrochemical analysis and environmental monitoring [M]. Beijing: China Land Press, 2008.
- [16] 林先贵.土壤微生物研究原理与方法[M].北京:高等教育出版社,2010. LIN X G. Principles and methods of soil microbiology research [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010.
- [17] 高洋,王根绪,高永恒.长江源区高寒草地土壤有机质和氮磷含量的分布特征[J].草业科学, 2015, 32(10):1548-1554. GAO Y, WANG G X, GAO Y H. Distribution characteristics of soil organic matter and nitrogen, phosphorus content in alpine grassland ecosystem in upper Yangtze River [J]. Pratacultural Science, 2015, 32(10):1548-1554.
- [18] 张阳灿,杨文权,魏兴勇,等.祁连山国家公园不同类型草地植被及土壤特征研究[J].中国草地学报, 2024, 46(11):23-34. ZHANG Y C, YANG W Q, WEI X Y, et al. Study on vegetation and soil characteristics of different types of grassland in Qilian Mountain National Park [J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(11):23-34.
- [19] 李娅丽,柳小妮,张德罡,等.陇中温性草原不同草地型植被特征和土壤理化性质研究[J].草地学报, 2023, 31(11):3045-3414. LI Y L, LIU X N, ZHANG D G, et al. Vegetation characteristics and soil physicochemical properties of different grassland types of temperate steppe in Longzhong [J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11):3045-3414.
- [20] 张苗苗,陈伟,林丽,等.青海省不同高寒草地土壤主要养分及可溶性有机碳特性研究[J].草业学报, 2019, 28(3):20-28. ZHANG M M, CHEN W, LIN L, et al. A study of soil nutrient characteristics and soil soluble organic carbon levels in different types of alpine grassland in Qinghai Province [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2019, 28(3):20-28.
- [21] YANG Z N, ZHU Q A, ZHAN W, et al. The linkage between vegetation and soil nutrients and their variation under different grazing intensities in an alpine meadow on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. Ecological Engineering, 2018, 110:128-136.
- [22] 王瑛瑛,汤萃文,贺媛真,等.甘肃民勤荒漠区植物群落土壤的理化性质和酶活性分析[J].植物资源与环境学报, 2024, 33(6):56-64. WANG Y Y, TANG C W, HE Y Z, et al. Analyses on soil physicochemical properties and enzyme activities of plant communities in Minqin desert region of Gansu Province [J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2024, 33(6):56-64.

- [23] 田永胜,马瑞,刘腾,等.阻沙固沙带不同治沙措施对土壤理化性质和酶活性的影响[J].水土保持学报,2025,39(2):57-64.
TIAN Y S, MA R, LIU T, et al. The effects of different desertification control measures on soil physicochemical properties and enzyme activities in sand blocking and fixation zone[J].Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):57-64.
- [24] 马大卫,马彦军,郭咏淳,等.河西走廊盐碱地4种典型植被类型土壤理化性质和酶活性特征[J].水土保持学报,2025,39(2):102-110.
MA D W, MA Y J, GUO Y C, et al. Soil physicochemical properties and enzyme activity characteristics of four typical vegetation types in saline-alkali lands of the Hexi Corridor [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025,39(2):102-110.
- [25] 王玉琴,尹亚丽,李世雄.不同退化程度高寒草甸土壤理化性质及酶活性分析[J].生态环境学报,2019,28(6):1108-1116.
WANG Y Q, YIN Y L, LI S X. Physicochemical properties and enzymatic activities of alpine meadow at different degradation degrees [J].Ecology and Environmental Sciences,2019,28(6):1108-1116.
- [26] 杨媛媛,陈奇伯,黎建强,等.滇中地区常绿阔叶林土壤酶活性与理化因子通径分析[J].中南林业科技大学学报,2017,37(3):86-91.
YANG Y Y, CHEN Q B, LI J Q, et al. Path analysis of soil enzyme activity and soil chemical-physical factors of evergreen broad-leaved forest in middle Yunnan region, China[J].Journal of Central South University of Forestry and Technology,2017,37(3):86-91.
- [27] 张欢欢,李林昊,陈德炜,等.藏北不同类型高寒草地土壤酶活性及酶化学计量比特征[J].草地学报,2025,33(8):2482-2493.
ZHANG H H, LI L H, CHEN D W, et al. Characteristics of soil enzyme activity and enzyme stoichiometry in different types of alpine grasslands in northern Tibet [J].Acta Agrestia Sinica 2025, 33(8):2482-2493.
- [28] 马书琴,汪子微,陈有超,等.藏北高寒草地土壤有机质化学组成对土壤蛋白酶和脲酶活性的影响[J].植物生态学报,2021,45(5):516-527.
MA S Q, WANG Z W, CHEN Y C, et al. Effect of soil organic matter chemical compositions on soil protease and urease activity in alpine grassland soils in northern Xizang, China [J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2021,45(5):516-527.
- [29] 蒋永梅,师尚礼,田永亮,等.高寒草地不同退化程度下土壤微生物及土壤酶活性变化特征[J].水土保持学报,2017,31(3):244-249.
JIANG Y M, SHI S L, TIAN Y L, et al. Characteristics of soil microorganism and soil enzyme activities in alpine meadows under different degrees of degradation [J].Journal of Soil and Water Conservation,2017,31(3):244-249.
- [30] 马源,杨洁,张德罡,周恒,周会程,陈建纲.高寒草甸退化对祁连山土壤微生物生物量和氮矿化速率的影响[J].生态学报,2020,40(8):2680-2690.
MA Y, YANG J, ZHANG D G, et al. Effects of alpine meadow degradation on soil microbial biomass and nitrogen mineralization rate in the Qilian Mountains [J].Acta Ecologica Sinica,2020,40(8):2680-2690.
- [31] ZHOU J, MIAO Y, GUO L L, et al. Evaluating the enzyme activities and soil physicochemical properties of four typical halophytic communities in saline-sodic soil [J].Agronomy,2024,14(1):e141.
- [32] JIAN S Y, LI J W, CHEN J, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry,2016,101:32-43.
- [33] NAETHER A, FOESEL B U, NAEGELE V, et al. Environmental factors affect acidobacterial communities below the subgroup level in grassland and forest soils [J].Applied and Environmental Microbiology,2012,78(20):7398-7406.