

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.02.026

引用格式:马鹏,周磊,孙宗玖,等.凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤酶活性及其化学计量比的影响[J].草地学报,2026,34(2):643—652

MA Peng, ZHOU Lei, SUN Zong-jiu, et al. Effects of Litter Addition on Soil Enzyme Activities and Stoichiometric Ratio in Sagebrush Desert Grassland[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(2):643—652

凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤酶活性及其化学计量比的影响

马鹏¹, 周磊¹, 孙宗玖^{1,2,3*}, 阿斯太肯·居力海提¹, 魏鹏⁴

(1. 新疆农业大学草业学院, 新疆乌鲁木齐 830052; 2. 新疆草地资源与生态自治区重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 3. 西部干旱区草地资源与生态教育部重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830052; 4. 新疆维吾尔自治区畜牧科学院, 新疆乌鲁木齐 830052)

摘要:本研究以伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)叶凋落物和蒿类荒漠土壤为对象,采用梅森瓶室外培养法,探讨叶凋落物不同添加量(0, 2.5, 5.0, 7.5 g)分解320 d(T₁)、410 d(T₂)、500 d(T₃)对100.0 g土壤β-1,4-葡萄糖苷酶(β-1,4-glucosidase, βG)、N乙酰-β-氨基葡萄糖苷酶(N acetyl-β-glucosamine enzymes, NAG)、亮氨酸氨基肽酶(Leucine aminopeptidase, LAP)、碱性磷酸酶(Alkaline phosphatase, AP)活性及其化学计量比的影响。结果表明:酶活性总体随凋落物分解时间的推移递减,其中5.0 g处理在T₂阶段βG活性显著高于T₁、T₃阶段12.16%, 20.53% ($P<0.05$), 7.5 g处理在T₁阶段NAG活性显著高于T₂、T₃阶段19.19%, 19.10% ($P<0.05$);酶活性随添加量增加呈先降后升趋势, T₃阶段7.5 g处理显著增加NAG活性并降低LAP活性 ($P<0.05$);土壤酶C:N、C:P、N:P平均值分别为0.65, 0.91, 1.41, C:N:P化学计量比为1:1.26:1.05, 矢量角度均小于45°。综上,土壤酶活性及其化学计量比受凋落物添加量与分解阶段共同调控,且受土壤氮限制。

关键词:凋落物;蒿类荒漠草地;化学计量比;土壤酶活性

中图分类号:S812.2

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)02-0643-10

Effects of Litter Addition on Soil Enzyme Activities and Stoichiometric Ratio in Sagebrush Desert Grassland

MA Peng¹, ZHOU Lei¹, SUN Zong-jiu^{1,2,3*}, Asitaiken·Julihaiti¹, WEI Peng⁴

(1. College of Grassland Science, Xinjiang Agricultural University, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 2. Xinjiang Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 3. Key Laboratory of Grassland Resources and Ecology of Western Arid Region, Ministry of Education, Urumqi, Xinjiang 830052, China; 4. Xinjiang Uygur Autonomous Region Academy of Animal Science, Urumqi, Xinjiang 830052, China)

Abstract: This study investigated the effects of different addition levels (0, 2.5, 5.0, 7.5 g) of *Seriphidium transiliense* leaf litter on the enzyme activities and stoichiometric ratios of β-1,4-glucosidase (βG), N-acetyl-β-glucosaminidase (NAG), leucine aminopeptidase (LAP), and alkaline phosphatase (AP) in 100.0 g of soil from Sagebrush desert grassland during 320 d (T₁), 410 d (T₂), and 500 d (T₃) of decomposition using an outdoor Mason jar incubation method. The results showed that enzyme activities generally decreased over the decomposition period. Specifically, the βG activity in the 5.0 g treatment at T₂ was significantly higher than that at T₁ and T₃ by 12.16% and 20.53%, respectively ($P<0.05$). The NAG activity in the 7.5 g treatment

收稿日期:2025-04-03;修回日期:2025-05-20

基金项目:国家自然科学基金项目(32060408);新疆维吾尔自治区重点实验室开放课题(2022D04003);新疆维吾尔自治区高校基本科研业务费(XJEDU2022J006);新疆维吾尔自治区自然科学基金(2024D01A41)资助

作者简介:马鹏(1998-),男,回族,甘肃平凉人,硕士研究生,主要从事草地资源与生态方面的研究,E-mail:2864347311@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail:nmszj@21cn.com

at T_1 was significantly higher than that at T_2 and T_3 by 19.19% and 19.10%, respectively ($P < 0.05$). Enzyme activities initially decreased and then increased with increasing litter addition. At T_3 , the 7.5 g treatment significantly enhanced NAG activity while reducing LAP activity ($P < 0.05$). The average soil enzyme stoichiometric ratios of C:N, C:P, and N:P were 0.65, 0.91, and 1.41, respectively, with a C:N:P stoichiometric ratio of 1:1.26:1.05, with the vector angles less than 45° . In conclusion, soil enzyme activities and their stoichiometric ratios were co-regulated by both litter addition amount and decomposition stage, and were constrained by soil nitrogen limitation.

Key words: Litter; Sagebrush desert grassland; Stoichiometric ratio; Soil enzyme activities

凋落物指植物在生长发育过程中由地上部分产生并返回到地面,为分解者提供能量和物质的有机残体,是植物地上部分与土壤进行养分交换的关键“桥梁”^[1-3],其在推动陆地生态系统养分交换与能量流动方面起到了重要作用,主要功能包括维持土壤养分平衡,涵养水源,维护生物多样性等方面^[4-5]。土壤酶是指土壤中的聚积酶,包括游离酶、胞内酶和胞外酶^[6],是生态系统的生物催化剂,在凋落物分解、土壤物质循环及能量转化过程中具有重要作用^[7]。土壤酶活性是凋落物分解的重要驱动力,其活性大小与土壤肥力和微生物活性密切相关^[8]。研究表明,叶凋落物的添加与去除,对土壤胞外酶及其化学计量比的影响呈现出不同的结果。陆宇明等^[9]研究发现,在亚热带米槠林添加叶凋落物后显著增加了土壤酶活性,但对土壤酶化学计量比无显著影响,Gao等^[10]研究发现,叶凋落物添加对沙地生态系统土壤酶活性的影响总体呈上升趋势,且对土壤酶化学计量比有显著影响。Han等^[11]在荒漠草原中发现凋落物分解对多种酶活性并没有显著影响。Xiang等^[12]研究表明,在半干旱草地添加叶凋落物能显著提高多种土壤酶活性,而李慧超等^[13]在云杉人工林却发现随叶凋落物添加量的增加土壤 β -葡萄糖苷酶活性显著下降。这些差异可能源于生态系统的多样性和环境条件的差异。与此同时,叶凋落物添加后随分解时间的增加,土壤胞外酶活性变化也呈现不同的变化趋势。如许馨文等^[14]研究发现草甸草原中叶凋落物随分解时间的增加土壤酶活性和酶化学计量比均发生了显著性变化。Wang等^[15]在青藏高原高寒草甸进行为期673天的研究发现,随叶凋落物分解时间的增加土壤多种酶活性呈先上升后下降趋势,这些变化可能反映了土壤功能的逐渐调整和适应。虽然目前关于凋落物添加对土壤酶活性的影响已有开展,但有关天山北坡蒿类荒漠草地凋落物分解过程中土壤酶活性及其化学计量比的响应尚不明确,亟待加强。

蒿类荒漠草地是新疆重要春秋牧场和生态保护脆

弱地带^[16]。近年来,主要受气候变化、人类活动等因素的影响,蒿类荒漠草地出现了大面积的退化^[17],严重威胁了当地草牧业发展及绿洲生态安全。伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)作为新疆蒿类荒漠草地的重要优势种或建群种,其居群主要分布于天山以北的荒漠地带,属于典型的中亚气候型荒漠代表植被,总面积达 $114.25 \times 10^4 \text{ hm}^2$,在维持荒漠生态系统稳定性、连接夏冬牧场时空纽带中具有不可替代的作用^[18-20]。研究发现,凋落物分解动态与碳氮磷释放特征对土壤微生物活性、酶活性及植被更新具有显著调控作用^[21-22],可为退化草地的生态修复提供理论依据。目前有大量研究围绕伊犁绢蒿荒漠草地展开,涵盖土壤微生物响应、围栏封育及刈割管理等方面^[23-24],而凋落物分解对蒿类荒漠草地土壤酶活性及其化学计量比的研究却十分有限,亟待进一步研究。基于此,为深入研究凋落物添加对土壤酶活性的影响,本研究为明确土壤酶活性对凋落物不同添加量及其分解阶段的响应规律,采用室外梅森瓶培养法,探究叶凋落物添加对蒿类荒漠土壤酶活性及其化学计量比的影响,为蒿类荒漠草地生态系统的可持续发展提供科学依据和理论支撑。

1 材料与方法

1.1 材料采集与整理

本试验材料(凋落物、土壤样品)均采自新疆天山北坡伊犁绢蒿类荒漠草地,该区域位于 $43^\circ 22' \sim 43^\circ 47' \text{ N}$, $82^\circ 35' \sim 89^\circ 25' \text{ E}$ 之间,平均海拔约1110 m,地处高原地带。该地区属于典型的大陆性干旱气候,年均温为 $4 \sim 9^\circ \text{ C}$ 之间,年降水量为150~350 mm,而年蒸发量则高达约2000 mm。土壤类型以荒漠灰钙土为主,质地较为疏松,保水能力较弱。由于降水量稀少且蒸发量显著高于降水量,该区域的生态环境较为干旱,植被覆盖度较低,研究区植被建群种为伊犁绢蒿(*Seriphidium transiliense*)半灌木,常见伴生种有木地肤(*Kochia prostrata*)、角果藜(*Ceratocarpus arenarius*)等。

凋落物样品准备:2021年7月,在天山北坡的呼图壁样地围栏内(2015年7月围栏,面积为 $4.0 \times 10^4 \text{ m}^2$)随机布设20个 $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m}$ 样方,采用齐地刈割法收集伊犁绢蒿地上活体生物量,装入塑料袋带回实验室。实验室内用蒸馏水清洗去杂的伊犁绢蒿样品后,分离茎叶。分离的叶片保持原有大小并充分混匀后烘干至恒重(80°C)^[25],形成凋落物样品,叶凋落物初始碳、氮、磷含量依次为 $473.60, 30.11, 1.56 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

土壤样品准备:2021年7月,在收集植被样品的样方内随机布设 $20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 样方采用挖块法进行 $0 \sim 10 \text{ cm}$ 土层土壤样品的采集,混合后带回实验室。室内剔除混合土样中的残根、小石子等碎屑,自然阴干后过 2 mm 筛,混匀形成试验用土,原位土壤初始碳、氮、磷含量依次为 $10.45, 2.91, 0.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。其后称取试验用土 100.0 g ,置于容量为 1 L 的宽口梅森瓶(瓶底直径为 90 mm),共计36瓶,用于凋落物添加试验。

1.2 试验设计

2022年4月,采用随机区组试验设计,设置4个叶凋落物添加处理,依次为 $0.0 \text{ g}(\text{CK}), 2.5 \text{ g}, 5.0 \text{ g}, 7.5 \text{ g}$,每处理重复9个,共计36个重复。将称好的凋落物保持原状置入盛有 100.0 g 荒漠土的梅森瓶中,并将凋落物均匀置于瓶中土壤表面,随后将梅森瓶埋于新疆农业大学试验样地(埋深 5 cm)进行500 d的凋落物分解实验。实验期间,梅森瓶均用白色纱窗网进行遮盖,防止外界凋落物进入,保持空气、降雨自由进入。试验开始后,分别在 $320 \text{ d}(\text{T}_1)$ 、 $410 \text{ d}(\text{T}_2)$ 、 $500 \text{ d}(\text{T}_3)$ 进行取样,每次每个处理随机选取3个梅森瓶进行相关指标测定。

1.3 测定内容与方法

土壤酶活性采用微孔板荧光法^[26],重点测定表征碳氮磷生物地球化学循环的关键指标: β -1,4-葡萄糖苷酶(βG)反映碳代谢过程、氮循环相关酶包含 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶(NAG)和亮氨酸氨基肽酶(LAP),磷循环密切相关的碱性磷酸酶(AP)活性。

1.4 数据统计与分析

1.4.1 土壤酶活性化学计量比计算公式

$$\text{EEA}_{\text{C:N}} = \ln \beta\text{G} : \ln(\text{NAG} + \text{LAP})$$

$$\text{EEA}_{\text{C:P}} = \ln \beta\text{G} : \ln \text{AP}$$

$$\text{EEA}_{\text{N:P}} = \ln(\text{NAG} + \text{LAP}) : \ln \text{AP}$$

其中, βG 表示 β -1,4-葡萄糖苷酶;NAG表示 β -1,4-N-乙酰氨基葡萄糖苷酶;LAP表示亮氨酸氨基肽酶;AP则是碱性磷酸酶。

$$\text{C:N:P 化学计量比} = \ln(\beta\text{G}) : \ln(\text{NAG} + \text{LAP}) : \ln(\text{AP})$$

酶化学计量向量长度和向量角度计算如下:

$$\text{VL} = \text{SQRT}(X^2 + Y^2)$$

$$\text{VA} = \text{DEGREES}[\text{ATAN2}(X, Y)]$$

$$X = \beta\text{G} : \text{ALP}, Y = \beta\text{G} : (\text{NAG} + \text{LAP})$$

式中:VL代表向量长度,向量长度较长时,表明碳限制较强;向量长度较短时,表明碳限制较弱。VA代表向量角度,当角度大于 45° 时,表明存在磷限制;当角度小于 45° 时,表明存在氮限制。

1.4.2 数据分析 数据通过Excel 2016进行预处理,借助SPSS 26软件中的双因素方差分析(Two-way ANOVA)方法分析不同凋落物添加量及分解阶段对向量长度、向量角度、土壤酶活性及其化学计量比的影响及交互作用;利用单因素方差分析(One-way ANOVA)方法分析不同添加量间、分解阶段间对土壤酶活性及其化学计量比、向量长度、向量角度的差异显著性。所有图形均通过Origin Pro 2021绘制,数据结果以“平均值±标准误”的形式呈现。

2 结果与分析

2.1 β -1,4-葡萄糖苷酶(βG)活性

由图1可知,同一分解阶段不同凋落物添加量间土壤 βG 活性均不显著,且 $\text{T}_1, \text{T}_2, \text{T}_3$ 土壤 βG 活性均值依次为 $23.55, 22.96, 22.86 \text{ nmol} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{h}^{-1}$;同一添加量上仅 5.0 g 添加处理不同分解阶段间土壤 βG 活性差异显著,且 T_2 阶段显著高于 T_1, T_3 阶段 $12.16\%, 20.53\% (P < 0.05)$ 。

2.2 N-乙酰- β -氨基葡萄糖苷酶(NAG)活性

由图2可知, T_1, T_2 阶段不同凋落物添加量间土壤NAG活性均差异不显著,但 T_3 阶段凋落物添加 5.0 g 处理较 2.5 g 处理显著降低 $27.33\% (P < 0.05)$,凋落物添加 7.5 g 处理较CK, 2.5 g 处理分别显著降低 $22.24\%, 32.21\% (P < 0.05)$;从分解阶段看,仅凋落物添加 7.5 g 处理 T_1 与 T_2, T_3 间土壤NAG活性差异显著,且 T_2, T_3 依次较 T_1 显著降低 $19.19\%, 19.10\% (P < 0.05)$ 。

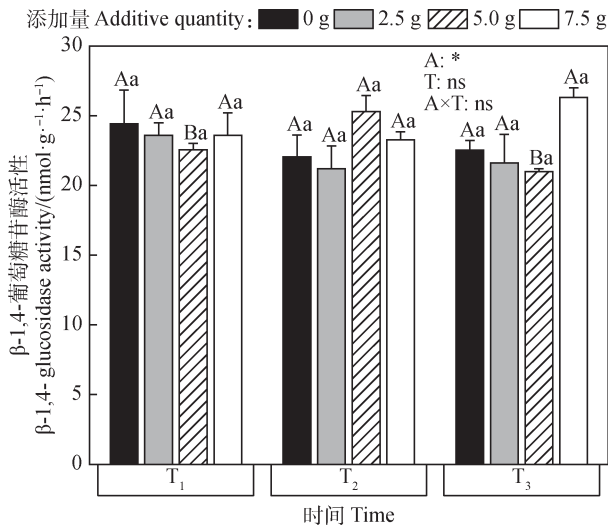


图1 凋落物添加对βG活性的影响

Fig. 1 Effects of litter addition on βG activity

注: A, 凋落物添加量; T, 凋落物分解阶段; 双因素方差分析结果以 A, T, A×T 表示, *为 $P<0.05$, **为 $P<0.01$, ns 为 $P>0.05$ 。大写字母的差异用于标识同一凋落物添加处理在不同分解阶段的显著性差异 ($P<0.05$), 而小写字母的差异则用于标识同一分解阶段下不同凋落物添加量处理的显著性差异 ($P<0.05$)。下同

Note: A, litter addition; T, litter decomposition stage; two-way ANOVA results were expressed as A, T, A×T, * for $P<0.05$, ** for $P<0.01$, ns for $P>0.05$. Uppercase letters denote significant differences among decomposition stages for the same litter addition treatment ($P<0.05$), while lowercase letters indicate significant differences among litter addition levels within the same decomposition stage ($P<0.05$). The same below

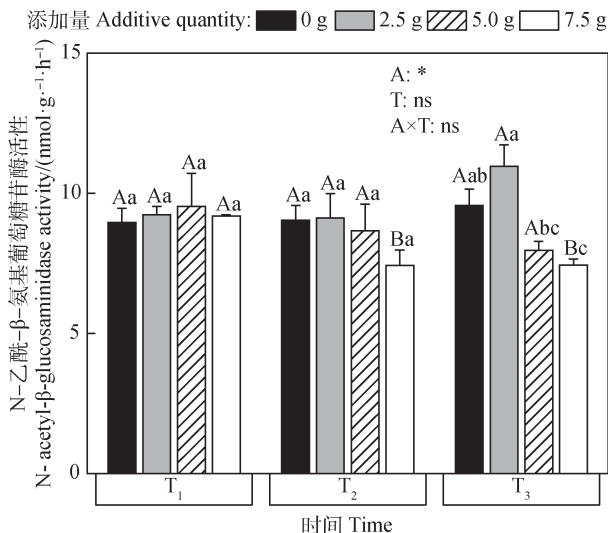


图2 凋落物添加对NAG活性的影响

Fig. 2 Effects of litter addition on NAG activity

2.3 亮氨酸氨基肽酶(LAP)活性

由图3可知, T₁, T₂阶段不同凋落物添加量间土壤LAP活性均无显著差异, 但T₃阶段凋落物添加2.5 g处理较CK, 7.5 g处理依次显著降低10.00%,

23.70% ($P<0.05$), 而凋落物添加7.5 g处理较5.0 g处理显著提高29.70% ($P<0.05$); 同一凋落物添加处理下不同分解阶段间差异不显著, CK, 2.5 g, 5.0 g, 7.5 g处理土壤LAP活性均值依次为117.06, 108.95, 113.06, 130.04 nmol·g⁻¹·h⁻¹。

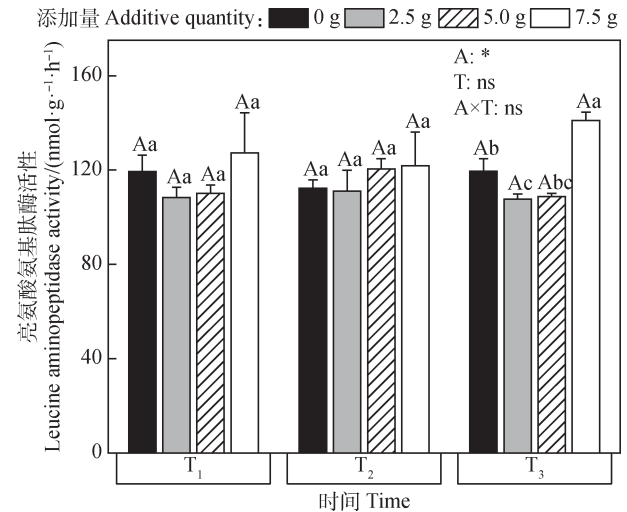


图3 凋落物添加对LAP活性的影响

Fig. 3 Effects of litter addition on LAP activity

2.4 碱性磷酸酶(AP)活性

由图4可知, T₁, T₂, T₃阶段不同凋落物添加量间土壤AP活性差异不显著, T₁, T₂, T₃阶段土壤AP活性均值依次为33.29, 30.33, 30.79 nmol·g⁻¹·h⁻¹; 同一凋落物添加处理下不同分解阶段间土壤AP活性差异不显著, CK, 2.5 g, 5.0 g, 7.5 g处理土壤AP活性均值依次为31.99, 31.43, 30.23, 32.20 nmol·g⁻¹·h⁻¹。

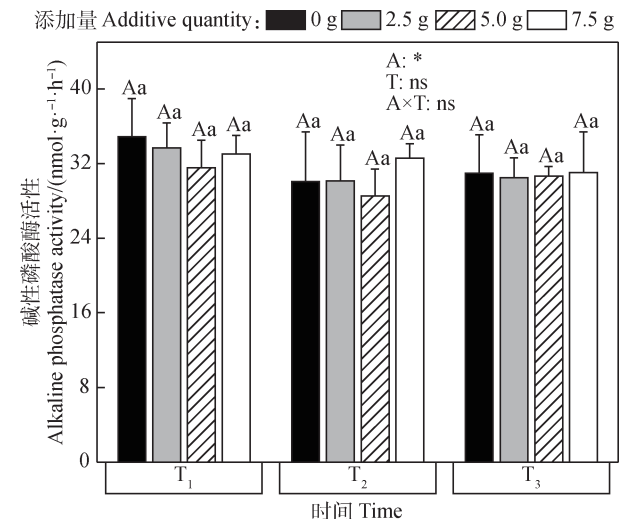


图4 凋落物添加对AP活性的影响

Fig. 4 Effects of litter addition on AP activity

2.5 土壤酶活性化学计量比

由图5可知,凋落物添加对土壤酶活性化学计量比无显著影响。土壤 $\beta\text{G}:(\text{NAG}+\text{LAP})$ 、 $\beta\text{G}:\text{AP}$ 和 $(\text{NAG}+\text{LAP}):\text{AP}$ 的均值分别为0.18,0.75和4.12。土壤 $\ln(\beta\text{G}):\ln(\text{NAG}+\text{LAP})$ 、土壤 $\ln(\beta\text{G}):\ln(\text{AP})$ 、土壤 $\ln(\text{NAG}+\text{LAP}):\ln(\text{AP})$ 的均值依次为0.65,0.91,1.41。凋落物添加前土壤酶化学计量C:N:P为1:1.32:1.05,凋落物添加后土壤酶化学计量C:N:P为1:1.26:1.05,表明凋落物添加在一定程度上缓解了土壤氮限制,偏离全球生态系统土壤酶活性1:1:1,表明氮可能是研究区土壤微生物的主要限制元素。

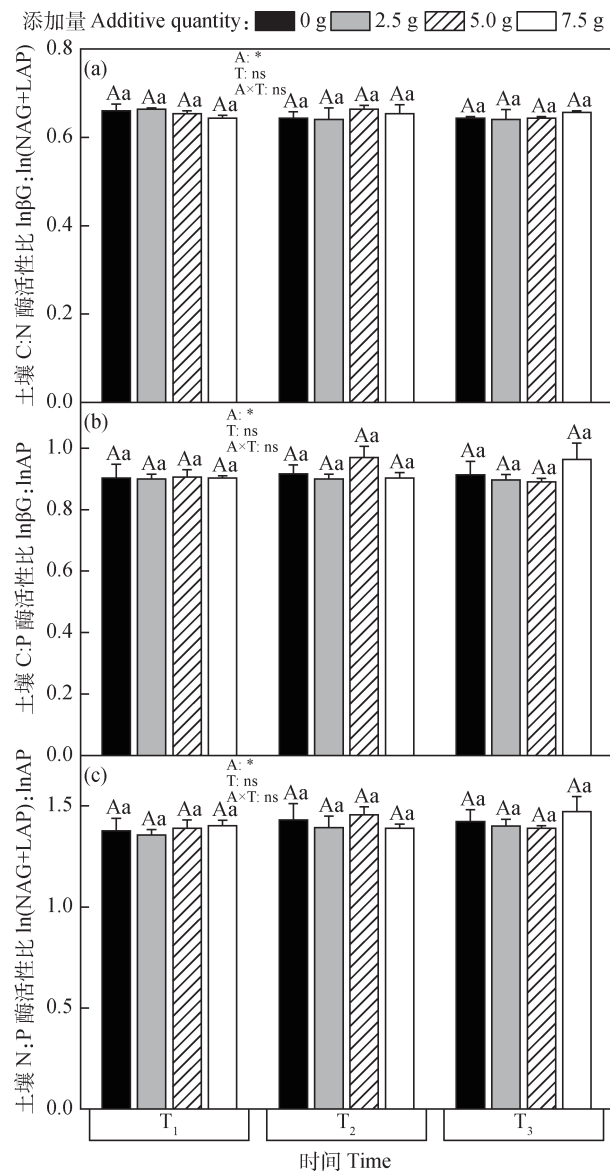


图5 凋落物添加对土壤碳氮磷化学计量特征的影响

Fig. 5 Effects of litter addition on stoichiometric characteristics of soil carbon, nitrogen and phosphorus

2.6 酶化学计量的向量长度和向量角度

由图6可知, T_1, T_2, T_3 阶段不同凋落物添加量间向量长度和向量角度差异均不显著, T_1, T_2, T_3 阶段向量长度均值依次为0.74,0.80,0.78,向量角度均值依次为15.02,13.78,13.65;同一凋落物添加处理下不同分解阶段间向量长度和向量角度差异均不显著,CK,2.5 g,5.0 g,7.5 g处理向量长度均值依次为0.77,0.73,0.80,0.81,向量角度均值依次为14.29,14.93,13.99,13.37。其中向量长度为0.55~1.24,向量角度均值为14.15°,所有处理下向量角度都小于45°,说明土壤处于氮限制的环境。与凋落物添加前相比,凋落物添加后向量长度均递增,向量角度均递减,但无显著变化。

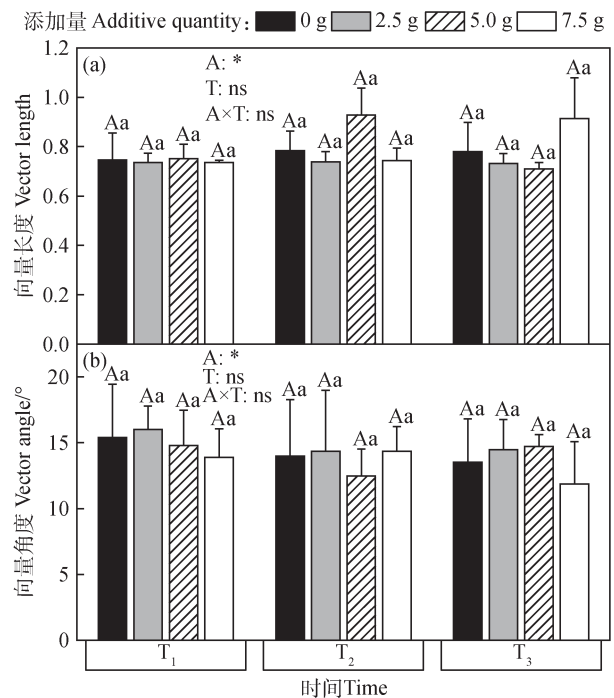


图6 凋落物添加对土壤酶向量长度和向量角度的影响

Fig. 6 Effects of litter addition on soil enzyme vector length and vector angle

2.7 土壤酶活性及其化学计量比的相关性分析

由图7可知,随凋落物添加量的增加,土壤 βG 活性与酶C:N均呈显著正相关($P<0.05$ 或 $P<0.01$),但凋落物添加7.5 g处理下不显著;土壤AP活性与酶C:P、酶N:P和向量长度之间均呈显著负相关($P<0.01$),土壤AP活性与向量角度均呈显著正相关($P<0.01$),但凋落物添加7.5 g处理下不显著;酶C:P与向量长度存在显著正相关关系($P<0.01$),而酶N:P与向量角度呈现显著负相关性($P<0.01$)。土壤LAP活性与向量角度随凋落物添

加量的增加负相关性逐步加强;土壤 LAP 活性与酶 N:P 随凋落物添加量的增加正相关性逐渐加强;酶

C:N 与酶 C:P 随凋落物添加量的增加,由不显著转变为显著正相关。

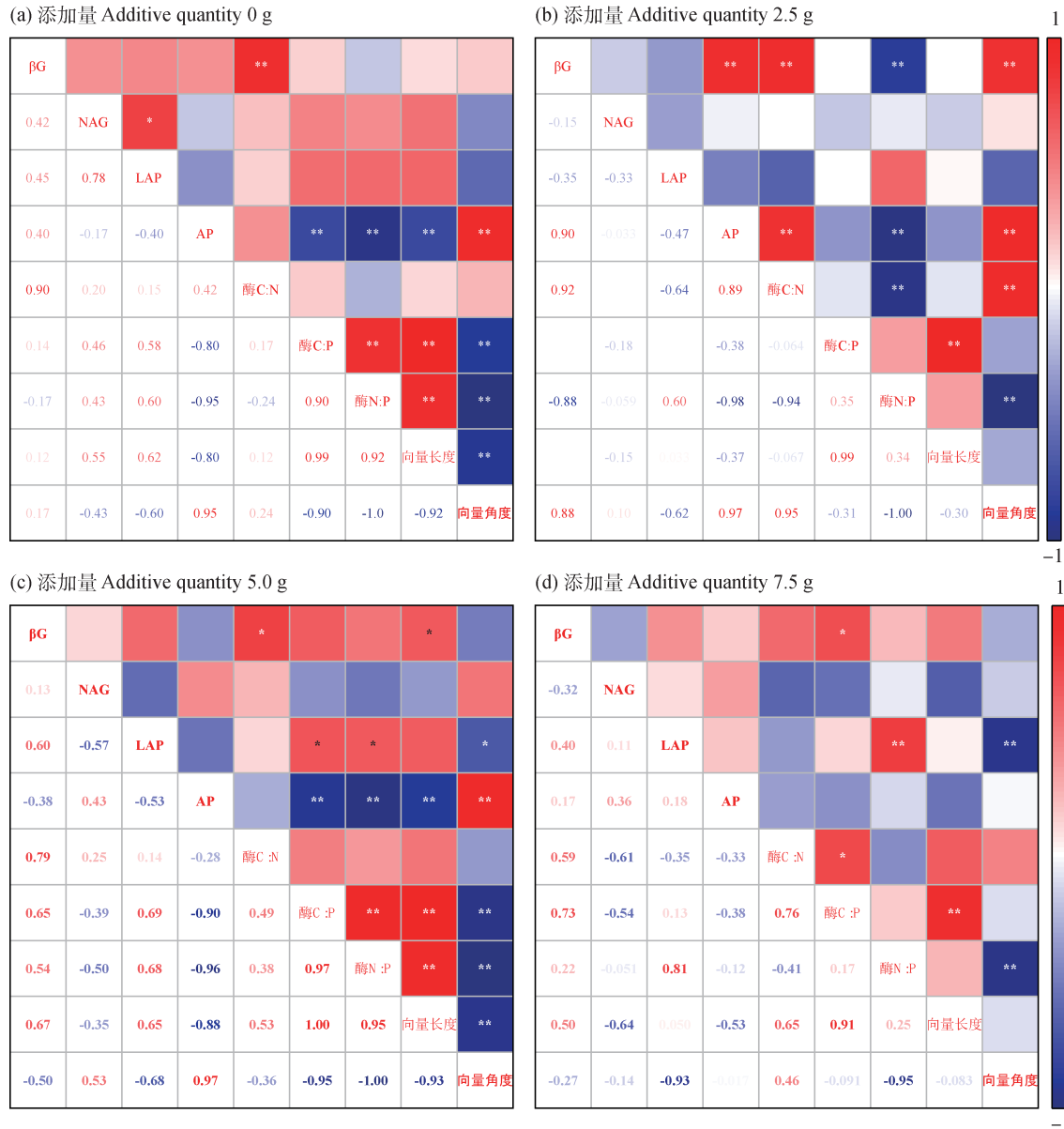


图 7 土壤酶活性、酶化学计量和矢量特征的相关关系

Fig. 7 Correlation between soil enzyme activity, enzyme stoichiometry and vector characteristics

注:红色代表正相关,蓝色代表负相关,颜色越深相关关系越大,*为 $P < 0.05$,**为 $P < 0.01$

Note: Red represents positive correlation and blue represents negative correlation, and the darker the color, the greater the correlation, * for $P < 0.05$, ** for $P < 0.01$

3 讨论

3.1 凋落物添加对土壤酶活性的影响

凋落物输入是土壤物质循环和能量交换的关键过程,其动态变化会调控土壤酶活性,在生态系统功能维系中,凋落物分解对维持生物地球化学循环具有不可替代的作用^[27],凋落物中纤维素、木质素等分

子的降解需胞外酶的广泛参与^[28]。土壤酶是凋落物分解过程中最活跃的生物催化剂,对凋落物的纤维素和木质素的分解产生积极的促进作用,土壤酶活性能够反映土壤养分转化的强度和方向^[29-30]。土壤胞外酶广泛参与土壤的生物化学反应过程,其活性变化能灵敏地指示环境波动特征^[31],是连接凋落物和土壤养分释放及供应关系的枢纽^[32]。本研究发

现, T_2 分解阶段土壤 β G活性在5.0 g叶凋落物添加量下显著增加,这是因为凋落物分解过程中,可溶性糖含量逐渐减少,而纤维素水解关键酶的含量相对增加,这促使以多糖为底物的酶的生成,与纤维素降解相关的 β G活性显著升高^[33]; T_2 , T_3 分解阶段凋落物添加量为7.5 g时,土壤NAG活性显著下降,这是因为凋落物分解过程中,分解酶主要来源于土壤及凋落物中的微生物群落,在分解初期微生物倾向于优先利用易于分解的物质,以此支持自身的生长与繁殖活动^[34],随着凋落物分解的持续进行,难分解的物质相对增加,导致微生物活性下降,微生物活性与土壤酶活性有关,酶活性也随之下降。土壤碱性磷酸酶在凋落物分解过程中无显著变化,这是因为土壤胞外酶活性与土壤含水量及土壤养分含量密切相关^[35],蒿类荒漠草地土壤含水量与养分含量相对较低,因此凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤酶活性及其化学计量比的影响并不显著。此外,本研究还发现凋落物输入量的改变会显著影响土壤NAG活性、LAP活性,且相关性分析表明NAG活性与土壤LAP活性呈负相关,这与刘佩雯等^[36]研究结果一致,这可能是由于在养分受限的情况下,微生物可能会优先分配资源来提高一种酶的活性,从而导致另一种酶的活性下降。此外,土壤的pH值、温度、湿度等环境因素也会影响酶的活性^[37]。

3.2 凋落物添加对土壤酶活性计量比的影响

土壤胞外酶化学计量比是揭示土壤养分循环的重要指标,反映微生物活动的相对限制状况以及土壤养分有效性与微生物需求间的动态平衡^[38]。研究发现全球生态系统土壤酶活性C:N, C:P, N:P平均值依次是为1.41, 0.62, 0.44^[39]。本研究发现,叶凋落物添加后伊犁绢蒿荒漠草地土壤酶碳氮比平均水平为0.65, 低于全球平均水平, 碳磷比为0.96、氮磷比为1.45, 均高于全球水平。除此以外,土壤胞外酶活性的向量角度小于45°,表明研究区中可分解氮的酶活性较高,可分解磷的酶活性较低,这与李思媛等^[40]研究结果一致,这是基于生态经济学“最佳配置”原则,微生物会把目标放在自身主要缺乏的养分上,因此该区域土壤缺乏氮元素^[41],并且随着凋落物添加量的增加,矢量角度先增大后减小,随着凋落物分解时间的增加,矢量角度增大,表明随凋落物量的增加,氮限制先缓解,但过多的凋落物添加以及分解时间的增加氮限制反而越严重,因此合理的叶凋落

物添加量及分解阶段对土壤碳氮磷养分循环有促进作用。值得注意的是,凋落物在不同分解阶段以及不同凋落物添加量处理下,土壤酶C:N(0.62~0.69), C:P(0.86~1.07)和N:P(1.28~1.62)均无显著变化,但均呈增加趋势。凋落物添加处理下土壤酶化学计量比无显著变化,这与Bai等^[42]研究结果不一致,这是因为在荒漠生态系统中,微生物通常面临长期的氮限制,这种限制具有稳定性,微生物生态化学计量特征与土壤全磷含量密切相关,即使凋落物增加,土壤基础磷未显著,微生物的酶合成策略仍会维持原有的比例平衡^[43],这与本研究结果一致。其次土壤酶活性受水分、温度、pH值等的影响,水分限制可能会掩盖凋落物输入对酶活性的影响,土壤pH值等理化性质的缓冲作用可能抑制酶化学计量比的强烈波动,长期资源受限的环境土壤微生物群落可能通过功能冗余或代谢策略的调整维持酶化学计量比的稳定性^[44-46]。本研究中,叶凋落物不同添加量及分解阶段对土壤胞外酶化学计量比均无显著影响,可能研究区土壤碳氮磷循环受很多因素的影响,土壤微生物分泌酶的合成不是简单的受资源分配策略调控,微生物作用机制涉及复杂的调控网络的协同运作^[47-48]。已有研究结果表明^[49],土壤酶活性及其化学计量比受土壤养分、水热条件、pH值、地理条件等多种因子的影响。因此,未来需聚焦于“微生物-凋落物-环境因子”的交互影响,开展多因子交互实验,分析其对荒漠草地土壤酶活性及土壤酶化学计量比的综合调控机制,为退化草地的适应性管理提供理论支撑。

4 结论

伊犁绢蒿叶凋落物添加量及分解阶段对伊犁绢蒿荒漠土壤胞外酶化学计量比无显著影响,但对土壤胞外酶活性影响显著,且凋落物不同添加量及分解阶段对土壤胞外酶活性的影响不同。结合土壤酶化学计量分析发现,蒿类荒漠草地土壤微生物普遍受到氮限制,短期凋落叶添加会加剧土壤微生物氮限制。综上,伊犁绢蒿荒漠草地土壤酶活性及其化学计量比对凋落物添加的响应受凋落物添加量与分解阶段的共同调控,同时受土壤氮的限制。未来需开展多因子的交互实验,分析其对土壤酶活性及土壤酶化学计量比的综合调控机制。

参考文献

- [1] 余涵霞,王家宜,万方浩,等. 植物凋落物影响土壤有机质分解的研究进展[J]. 生物安全学报,2018,27(2):88-94
YU H X, WANG J Y, WAN F H, et al. Research progress on effects of plant litter on the decomposition of soil organic matter[J]. Journal of Biosafety, 2018, 27(2):88-94
- [2] 苏卓侠,苏冰倩,上官周平. 植物凋落物分解对土壤有机碳稳定性影响的研究进展[J]. 水土保持研究, 2022, 29(2): 406-413
SU Z X, SU B Q, SHANGGUAN Z P. Advances in effects of plant litter decomposition on the stability of soil organic carbon[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(2):406-413
- [3] 周磊,孙宗玖,聂婷婷,等. 凋落物添加对蒿类荒漠草地土壤碳氮磷含量及其化学计量特征的影响[J]. 草地学报,2024,32(2):462-469
ZHOU L, SUN Z J, NIE T T, et al. Effects of litter additions on soil carbon, nitrogen and phosphorus contents and their stoichiometric characteristics in sagebrush desert grassland [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(2):462-469
- [4] 梁东,王一新,马强,等. 植物凋落物分解研究进展[J]. 吉林林业科技,2019,48(4):37-40,43
LIANG D, WANG X Y, MA Q, et al. Research progress on decomposition of plant Litter[J]. Journal of Jilin Forestry Science and Technology, 2019, 48(4):37-40,43
- [5] 李学斌,马林,陈林,等. 草地枯落物分解研究进展及展望[J]. 生态环境学报,2010,19(9):2260-2264
LI X B, MA L, CHEN L, et al. Research progress and the prospect of grassland litters decomposition[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(9):2260-2264
- [6] 杜伟文,欧阳中万. 土壤酶研究进展[J]. 湖南林业科技, 2005, 32(5):80-83,86
DU W W, OUYANG Z W. Research progress of soil enzymes[J]. Hunan Forestry Science and Technology, 2005, 32(5):80-83,86
- [7] 向泽宇,王长庭,宋文彪,等. 草地生态系统土壤酶活性研究进展[J]. 草业科学,2011,28(10):1801-1806
XIANG Z Y, WANG C T, SONG W B, et al. Advances on soil enzymatic activities in grassland ecosystem [J]. Pratacul-tural Science, 2011, 28(10):1801-1806
- [8] 杨金鹏,牟兰,仇嘉悦,等. 生草对滇中苹果园土壤酶活性和微生物群落多样性的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(2): 419-428
YANG J P, MU L, QIU J Y, et al. Effects of grass cultivation on soil enzyme activity and microbial community diversity of apple orchards in dianzhong area of China [J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(2):419-428
- [9] 陆宇明,许恩兰,吴东梅,等. 凋落物双倍添加和移除对米楮林土壤水解酶活性及其化学计量比的影响[J]. 水土保持学报,2021,35(4):313-320
LU Y M, XU E L, WU D M, et al. Effects of double addition or removal of litter on soil hydrolases activities and their stoichiometry in castanopsis carlesii forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(4):313-320
- [10] GAO H Y, ZHANG S N, YANG Z G, et al. Effects of litter input on soil enzyme activities and their stoichiometric ratios in sandy soil [J]. Agronomy, 2025, 15(5):1152
- [11] HAN C, KANG Y, YU H, et al. Effects of precipitation on soil enzyme activities during litter decomposition in a desert steppe of Northwestern China [J]. Ecology and Environment, 2022, 31(9):1802
- [12] XIANG Y, AN S S, CHENG M, et al. Changes of soil micro-biological properties during grass litter decomposition in Loess Hilly Region, China [J]. International Journal of Environmental Research and Public Health, 2018, 15(9):1797
- [13] 李慧超,潘红丽,冯秋红,等. 凋落叶输入量对川西亚高山不同密度云杉人工林土壤酶活性及其化学计量比的影响[J]. 生态学杂志,2024,43(10):2967-2978
LI H C, PAN H L, FENG Q H, et al. Effects of litter quantity on soil enzymes and stoichiometric ratios of spruce plantations with different stand densities in the subalpine region of western Sichuan [J]. Chinese Journal of Ecology, 2024, 43(10):2967-2978
- [14] 许馨文,陈梦娅,张润,等. 草地不同性状凋落物分解对土壤酶活性的影响[J]. 草学,2025(1):35-42
XU X W, CHEN M Y, ZHANG R, et al. Effects of different trait litter on soil enzyme activities in grassland [J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(1):35-42
- [15] WANG X P, MA Y S, ZHANG S T. Soil enzyme activity and stoichiometry indicates that litter quality regulates soil microbial nutrient demand in a Tibetan alpine meadow [J]. European Journal of Soil Biology, 2024, 123:103686
- [16] 聂婷婷,董乙强,杨合龙,等. 围栏封育对蒿类荒漠植物-土壤碳氮磷化学计量特征的影响[J]. 中国农业科技导报,2023,25(3):178-187
NIE T T, DONG Y Q, YANG H L, et al. Effects of enclosure on plant and soil stoichiometric characteristics in an artemisia desert [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2023, 25(3):178-187
- [17] 阿斯太肯·居力海提,孙宗玖,于冰洁,等. 封育对蒿类荒漠草地土壤微生物碳源利用特征的影响[J]. 草业学报,2025,34(1):29-40
ASITAIKEN·J, SUN Z J, YU B J, et al. Effects of enclosure on soil microbial carbon source utilization characteristics of sage-brush desert grassland [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2025, 34(1):29-40
- [18] 郑伟. 伊犁绢蒿的生态学特性及利用和保护研究进展[J]. 草原与草坪,2013,33(1):68-75,83
ZHENG W. Research progress on utilization and conservation and of *Seriphidium transiliense* [J]. Grassland and Turf, 2013, 33(1):68-75,83
- [19] 王东江. 围栏封育当年对退化伊犁绢蒿荒漠草地群落特征的影响[D]. 乌鲁木齐:新疆农业大学,2009:8

- WANG D J. Effects of enclosure year on community characteristics of degraded *Seriphidium sericeum* desert grassland in Yili [D]. Urumqi: Xinjiang Agricultural University, 2009: 8
- [20] 刘慧敏,董乙强,安沙舟,等. 伊犁绢蒿荒漠群落特征及植物多样性对短期封育的响应[J]. 新疆农业科学, 2018, 55(7): 1319-1325
- LIU H M, DONG Y Q, AN S Z, et al. Response of community characteristics and plant diversity of *Seriphidium transilense* desert to short-term fencing [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2018, 55(7): 1319-1325
- [21] 周磊,孙宗玖,阿斯太肯·居力海提,等. 伊犁绢蒿叶片凋落物分解动态及其碳氮磷生态化学计量特征[J]. 中国草地学报, 2025, 47(3): 1-9
- ZHOU L, SUN Z J, ASITAIKEN·Julihaiti, et al. Decomposition dynamics of leaf litter and ecological stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in *seriphidium transilense* [J]. Chinese Journal of Grassland, 2025, 47(3): 1-9
- [22] 范燕敏,朱进忠,武红旗,等. 伊犁绢蒿荒漠退化草地土壤微生物和酶活性的研究[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(6): 1288-1293
- FAN Y M, ZHU J Z, WU H Q, et al. Study on soil microorganisms and enzyme activities of the degraded *Seriphidium transilense* desert grassland [J]. Xinjiang Agricultural Sciences, 2009, 46(6): 1288-1293
- [23] 吴悦,董乙强,周时杰,等. 封育对伊犁绢蒿荒漠土壤酶活性及其化学计量特征的影响[J]. 草业科学, 2024, 33(7): 25-40
- WU Y, DONG Y Q, ZHOU S J, et al. Effects of grazing exclusion on soil enzyme activity and stoichiometric characteristics of *Seriphidium transilense* desert [J]. Pratacultural Science, 2024, 33(7): 25-40
- [24] 侯钰荣,安沙舟,张永娟. 刈割强度对伊犁绢蒿叶功能性状及构件的影响[J]. 草地学报, 2010, 18(3): 333-338
- HOU Y R, AN S Z, ZHANG Y J. Influence on leaf function traits and modules of mowing intensity in *seriphidium transilense* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2010, 18(3): 333-338
- [25] 俞月凤,何铁光,曾成城,等. 喀斯特区不同退化程度植被群落植物-凋落物-土壤-微生物生态化学计量特征[J]. 生态学报, 2022, 42(3): 935-946
- YU Y F, HE T G, ZENG C C, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry in plants, litter, soil, and microbes in degraded vegetation communities in a karst area of southwest China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(3): 935-946
- [26] HILL B H, ELONEN C M, SEIFERT L R, et al. Microbial enzyme stoichiometry and nutrient limitation in US streams and rivers [J]. Ecological Indicators, 2012, 18: 540-551
- [27] 李秋梅,黎胜杰,王欣丽,等. 改变碳输入对沂蒙山区典型次生林土壤微生物碳源代谢功能的影响[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 4110-4119
- LI Q M, LI S J, WANG X L, et al. Influences of changing carbon inputs on soil microbial carbon metabolism in natural secondary forests in Yimeng mountainous area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 4110-4119
- [28] 艾灵,吴福忠,樊雪波,等. 米楮和杉木人工林土壤酶活性和酶化学计量特征对凋落物输入的短期响应[J]. 应用生态学报, 2024, 35(3): 631-638
- AI L, WU F Z, FAN X B, et al. Short-term responses of soil enzyme activities and stoichiometry to litter input in *Castanopsis carlesii* and *Cunninghamia lanceolata* plantations [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(3): 631-638
- [29] 吴怡,董炜华,李晓强,等. 土壤酶活性对土壤环境变化的响应研究进展[J]. 南方农业, 2023, 17(15): 42-46, 52
- WU Y, DONG W H, LI X Q, et al. Research progress on the response of soil enzyme activity to changes in soil environment [J]. South China Agriculture, 2023, 17(15): 42-46, 52
- [30] 吴旺旺,张丽丽,林达,等. 氮沉降对凋落叶分解前期土壤酶活性的影响[J]. 森林与环境学报, 2017, 37(2): 174-180
- WU W W, ZHANG L L, LIN D, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activity during early stage of leaf litter decomposition [J]. Journal of Forest and Environment, 2017, 37(2): 174-180
- [31] 王国才,尹世华,耿芳,等. 云南省琼英山茶园根际与非根际土壤养分与胞外酶活性特征分析[J/OL]. 分子植物育种, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230327.1752.016.html>, 2023-03-28/2025-06-24
- WANG G C, YIN S H, GENG F, et al. Analysis of soil nutrients and extracellular enzyme activities of rhizosphere and bulk soils at tea plantation in Qiongying mountain, Fengqing county, Yunnan province [J/OL]. Molecular Plant Breeding, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230327.1752.016.html>, 2023-03-28/2025-06-24
- [32] 刘宁,刘佩雯,何浩勇,等. 凋落物对喀斯特櫟木土壤微生物生物量和土壤酶活性的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2025, 43(1): 161-173
- LIU N, LIU P W, HE H Y, et al. Effects of litter on soil microbial biomass and soil enzyme activities of *Loropetalum chinense* community in karst area [J]. Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition), 2025, 43(1): 161-173
- [33] 葛晓敏,吴麟,唐罗忠. 森林凋落物分解与酶的相互关系研究进展[J]. 世界林业研究, 2013, 26(1): 43-47
- GE X M, WU L, TANG L Z. Review on research progress of relationships between enzyme and litter decomposition [J]. World Forestry Research, 2013, 26(1): 43-47
- [34] HERMAN J, MOORHEAD D, BERG B. The relationship between rates of lignin and cellulose decay in aboveground forest litter [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(10): 2620-2626
- [35] ZUO Y P, LI J P, ZENG H, et al. Vertical pattern and its driving factors in soil extracellular enzyme activity and stoichiometry along mountain grassland belts [J]. Biogeochemistry, 2018, 141(1): 23-39
- [36] 刘佩雯,覃云斌,莫慧婷,等. 凋落物及根系输入变化对喀斯特地区櫟木土壤养分和胞外酶的影响[J]. 广西师范大学学报(自然科学版), 2023, 41(6): 179-191
- LIU P W, QIN Y B, MO H T, et al. Effects of litter and root

- input and removal on soil nutrient, enzyme activity, and stoichiometry in karst of *Loropetalum chinense* [J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 41(6): 179-191
- [37] 万忠梅, 吴景贵. 土壤酶活性影响因子研究进展[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2005, 33(6): 87-92
WAN Z M, WU J G. Study progress on factors affecting soil enzyme activity [J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2005, 33(6): 87-92
- [38] 王晶晶, 黄刚, 吕坤, 等. 热带-亚热带森林不同植被类型的土壤酶活性及化学计量特征[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(2): 423-431
WANG J J, HUANG G, LYU K, et al. Soil enzyme activity and stoichiometry of different vegetation types in tropical and subtropical forests [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2023, 29(2): 423-431
- [39] SINSABAUGH R L, HILL B H, FOLLSTAD SHAH J J. Ecoenzymatic stoichiometry of microbial organic nutrient acquisition in soil and sediment [J]. *Nature*, 2009, 462(7274): 795-798
- [40] 李思媛, 孙宗玖, 于冰洁, 等. 封育对伊犁绢蒿荒漠草地土壤碳氮磷、酶活性及其化学计量特征的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(7): 25-40
LI S Y, SUN Z J, YU B J, et al. Effect of grazing exclusion on soil carbon, nitrogen, and phosphorus contents and enzyme activity and stoichiometry in *Seriphidium transiliense* desert grasslands [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(7): 25-40
- [41] 焦泽彬, 李羿桥, 陈子豪, 等. 川西亚高山不同森林类型土壤酶活性对短期凋落物输入量变化的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2021, 27(3): 608-616
JIAO Z B, LI Y Q, CHEN Z H, et al. Response of soil enzyme activities to short-term litter input indifferent types of forest in subalpine western Sichuan [J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2021, 27(3): 608-616
- [42] BAI X J, DIPPOLD M A, AN S S, et al. Extracellular enzyme activity and stoichiometry: the effect of soil microbial element limitation during leaf litter decomposition [J]. *Ecological Indicators*, 2021, 121: 107200
- [43] 朱湾湾, 王攀, 许艺馨, 等. 降水量变化与氮添加下荒漠草原土壤酶活性及其影响因素[J]. *植物生态学报*, 2021, 45(3): 309-320
ZHU W W, WANG P, XU X Y, et al. Soil enzyme activities and their influencing factors in a desert steppe of northwestern China under changing precipitation regimes and nitrogen addition [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2021, 45(3): 309-320
- [44] 孙宗玖, 李琦, 李培英, 等. 封育年限对伊犁绢蒿荒漠土壤微生物及酶活性的影响[J]. *水土保持通报*, 2018, 38(3): 14-18
SUN Z J, LI Q, LI P Y, et al. Effects of grazing enclosure years on soil microorganism and enzyme activities in *Seriphidium transiliense* desert [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2018, 38(3): 14-18
- [45] 宁一泓, 赵慧英, 王海燕, 等. 基于结构方程的旺业甸自然保护区土壤脲酶活性影响因子研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2025, 39(1): 150-159
NING Y H, ZHAO H Y, WANG H Y, et al. A structural equation-based probe to the factors influencing soil urease activity in Wangyedian Nature Reserve [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2025, 39(1): 150-159
- [46] 巢林, 欧梦菲, 魏昕昕, 等. 南亚热带不同林龄杉木人工林土壤酶活性及酶化学计量特征[J]. *环境科学*, 2025, 46(11): 7033-7042
CHAO L, OU M F, WEI X X, et al. Effect of stand age on soil extracellular enzyme activity and stoichiometry in chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in southern subtropical-China [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(11): 7033-7042
- [47] 栾历历, 刘恩媛, 顾新, 等. 凋落物处理和氮添加对松栎混交林土壤生态酶化学计量的影响[J]. *生态学报*, 2020, 40(24): 9220-9233
LUAN L L, LIU E Y, GU X, et al. Effects of litter manipulation and nitrogen addition on soil ecoenzymatic stoichiometry in a mixed pine and oak forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(24): 9220-9233
- [48] 卿婷, 艾灵, 吴福忠, 等. 凋落物输入下土壤酶活性及其化学计量的季节性变化[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2025, 20(1): 126-135
QING T, AI L, WU F Z, et al. Seasonal changes of soil enzymatic activities and stoichiometry under litter input [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2025, 20(1): 126-135
- [49] 李强, 漆昊, 何国兴, 等. 东祁连山高寒草甸土壤酶活性及其化学计量特征对海拔和坡向的响应[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(4): 357-364
LI Q, QI H, HE G X, et al. Response of soil enzymes activities and their stoichiometric characteristics to altitude and aspect of alpine meadow in eastern Qilian Mountains [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(4): 357-364

(责任编辑 刘婷婷)