

不同磷添加对西藏色季拉山高寒草地土壤养分及酶活性的影响

崔志攀,张西哲,张绍兵,韩艳英,吴正,仝令臣,叶彦辉*

(西藏农牧大学资源与环境学院,西藏林芝860000)

摘要:近年来大气磷输入上升使高寒草地的磷素动态与生态功能面临不确定性,但土壤理化性质与酶活性对不同磷输入水平的响应机制仍不清楚。本研究在西藏色季拉山高寒草地开展2年田间梯度施磷试验,设定4种梯度处理(0、50、75、100 kg·hm⁻²/年),用P₀、P₅₀、P₇₅、P₁₀₀表示,测定0~10 cm土层的土壤理化性质、微生物量(MBC、MBN)、碳氮循环和氧化降解相关酶(纤维素酶、淀粉酶、蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、脲酶、多酚氧化酶、过氧化物酶)并进行相关性和聚类分析。结果表明:施用酸性磷酸肥普遍降低pH值(1.6%~2.5%),土壤有机碳(SOC)无显著变化,而易氧化有机碳(ROC)在P₅₀与P₇₅分别提高77.2%与47.9%。硝态氮在3种施磷下显著升高,P₅₀增幅达1219.3%。P₁₀₀显著提高全磷(TP)与有效磷(AP)含量(TP:22.9%,AP:147.9%)。MBC与MBN在所有施磷下均显著下降(MBC:52.6%~64.9%,MBN:29.1%~49.1%)。酶活性方面:P₅₀显著提升蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶与脲酶(74.0%、21.7%、55.3%);P₇₅、P₁₀₀显著提高过氧化物酶(61.8%、55.5%);P₁₀₀使纤维素酶上升117.3%,而淀粉酶在3种处理下均升高(P₅₀处理下最大为90.0%)。相关性与聚类显示氧化酶与pH、交换性阳离子协同响应,水解酶与ROC、速效养分紧密耦合,微生物量碳氮与多数酶簇分离。P₅₀缓解磷限制并放大氮循环与水解酶活性;P₇₅呈边际效益递减;诱发酸化与微生物量碳氮下降,群落代谢偏向氧化酶分泌,存在“磷诱导碳释放”风险。综上所述,高寒草地对外源磷输入呈非线性与阈值响应,本研究为未来磷富集下高寒草地土壤的健康与管理提供了重要的科学依据。

关键词:磷添加;土壤养分;高寒草地;水解酶;氧化酶

中图分类号:S812.2;X144

文献标志码:A

Effects of different phosphorus additions on soil nutrients and enzyme activities in the alpine grassland of Sejila Mountain, Xizang

CUI Zhipan, ZHANG Xizhe, ZHANG Shaobing, HAN Yanying, WU Zheng, TONG Lingchen, YE Yanhui*

(College of Resources and Environment, Xizang Agricultural and Animal Husbandry University, Nyingchi, Xizang 860000, China)

Abstract: Rising atmospheric phosphorus inputs in recent years have brought uncertainty to the phosphorus dynamics and ecological functions of alpine grasslands, but the mechanisms by which soil physicochemical properties and enzyme activities respond to different levels of phosphorus inputs remain unclear. In this study, a two-year field gradient phosphorus application experiment was conducted in the alpine grassland of Sejila Mountain, Xizang. Four gradient treatments (0, 50, 75, 100 kg·hm⁻²/a, calcium superphosphate) were set up to determine the soil physicochemical properties, denoted by P₀, P₅₀, P₇₅, P₁₀₀, microbial biomass (MBC) in the 0~10 cm soil layer, (MBN) and enzymes related to carbon and nitrogen cycling and oxidative degradation (cellulase, amylase, sucrase, β-glucosidase, urease, and polyphenol oxidase, peroxidase) were determined in the 0~10 cm layer, and correlation and cluster analyses were performed. The results showed that phosphorus application generally decreased pH (1.6%~2.5%) with no significant change in SOC, while ROC increased by 77.2% and 47.9% at P₅₀ and P₇₅, respectively. Nitrate nitrogen was significantly increased by all three phosphorus applications, with an increase of 1219.3% at P₅₀, and TP (22.9%) and AP (147.9%) were significantly increased at P₁₀₀, while MBC and MBN were significantly decreased by all phosphorus applications (MBC: 52.6%~64.9%; MBN: 29.1%~

收稿日期:2025-10-08

基金项目:国家自然科学基金项目(31860141)

作者简介:崔志攀(1997—),男,硕士研究生,专业方向为高寒草地氮磷沉降。

*通信作者:叶彦辉(1980—),男,副教授,从事高原生态、经济林研究,e-mail:260383872@qq.com。

49.1%)。For enzyme activities: P_{50} significantly increased sucrase and β -glucosidase (74.0%, 21.7%) and urease (55.3%); P_{75} and P_{100} significantly increased peroxidase (61.8%, 55.5%); and P_{100} caused cellulase to increase by 117.3%, while amylase was elevated under all three treatments (maximum 90.0% at P_{50}). Correlation and clustering showed that oxidases responded synergistically with pH and exchangeable cations, hydrolases were tightly coupled with ROC and fast-acting nutrients, and microbial load was separated from most enzyme clusters. P_{50} alleviated P limitation and amplified nitrogen cycling and hydrolase activity; P_{75} showed diminishing marginal benefits; induced acidification and microbial population decline; community metabolism was biased towards oxidase secretion; and there was a risk of 'phosphorus-induced carbon release'. In summary, alpine grassland showed a nonlinear and threshold response to exogenous P inputs. This study provides an important scientific basis for the health and management of alpine grassland soils under phosphorus enrichment in the future.

Key words: phosphorus addition; soil nutrients; alpine grassland; hydrolase; oxidase

磷是陆地植物生长的关键限制性营养元素,其可利用性的变化深刻影响着植物的生产力^[1]。作为植物细胞的主要成分,磷不仅参与了细胞膜的构建,而且对于植物的光合作用、呼吸作用、根系发育、开花结果与成熟具有重要作用,几乎参与了植物所有的生理反应过程^[2]。由于人类活动以及化石燃料的燃烧,过去 150 年来,全球陆地生态系统活性磷含量不断增加,相关研究^[3]表明,大气磷沉降从工业革命到目前增加了超过 52 倍。因此,探究磷富集下土壤养分和酶活性的变化,对于在未来气候变化背景下为管理者制定相关政策具有重要意义。

土壤中的磷主要来源于大气沉降、岩石风化,最近的研究^[4]显示:磷富集对生态系统的影响可能被严重低估。一项基于全球草地生态系统养分添加试验的整合分析显示:在磷添加处理下地上生物量平均增加 34%^[5],同时在青藏高原高寒草甸的养分添加实验中,相较于氮添加显著促进了植物地上地下生物量,表明高寒草地极有可能受到磷的限制作用,甚至超过了氮素的影响^[6]。磷肥的添加会改变土壤生态系统的养分循环,例如有机碳、土壤养分以及酶活性^[7],然而土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量变化对于磷添加的响应是不一样的,有的具有促进作用,有的具有抑制作用,有的无影响^[8-10]。过去研究^[11]表明氮添加显著提高了草地土壤铵态氮、硝态氮含量,但其有效形式受磷添加量的影响较大^[12]。在温带森林的养分添加试验中显著降低了 SOC 的含量,却显著提高了微生物碳氮比、氧化酶活性^[13]。此外也有研究^[14]指出磷添加对土壤酶具有负面影响。可见,土壤理化性质以及酶活性对磷富集的反应并不一致,且受环境条件影响较大。因此,补充高寒草地生态系统磷富集下土壤养分变化情况,以应对未来气候变化则显得十分重要。

受尘源增强与人为排放影响,青藏高原近现代大气磷输入很可能上升,2017 年色季拉山森林站点测得

降水样中总溶解磷沉降通量为 $0.68 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}/\text{年}$ ^[15],略高于全国范围值的上沿(0.63)^[16]。此外,色季拉山紧邻雅鲁藏布江大拐弯处,受南亚季风气候影响显著。因此,我们判断青藏高原的磷沉降存在增加的可能。青藏高原被誉为“地球第三极”,气温低,海拔高,高寒草地作为青藏高原主要的生态系统类型之一且普遍存在磷限制^[17],是作为研究养分添加对土壤理化性质变化的天然试验场。本研究以西藏色季拉山高寒草地土壤作为研究对象,通过 2 年野外养分添加试验,测试养分富集情况下土壤理化性质、微生物量碳氮以及酶活性变化情况,分析它们之间的关系,探究在未来气候变化背景下土壤养分变化情况及其内在联系,以期为高寒草地的健康发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概括

本试验选取位于西藏林芝县内的色季拉山西坡高寒草地($29^{\circ}38'8''\text{N}$, $94^{\circ}37'26''\text{E}$, 平均坡度 21.4°)作为试验样地,海拔 4 400 m。年平均气温在 -0.73°C ,最暖月(7 月)平均气温 9.8°C ,最冷月(1 月)平均气温 13.8°C ,年平均降水为 1 134.1 mm,属于亚高山寒温带半湿润区,年均湿度在 60%~80%,土壤以山地棕壤和酸性棕壤为主。草地主要植被为五叶双花委陵菜(*Potentilla biflora* var. *lahulensis* Th. Wolf)、白心球花报春(*Primula atrodentata* W. W. Sm.)和蓝钟花(*Cyananthus hookeri* C. B. Clarke),占样地面积 80%。

1.2 试验设计

试验样地布置于 2019 年 8 月,采取封闭管理,采用完全随机区组设计,样地内设置 3 个重复区组,共设 12 个样方($3 \text{ m} \times 3 \text{ m}$),每个样方之间设置 5 m 缓冲带,区组之间设置 10 m 缓冲带。每个处理设 3 个重复, $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 作为添加物,对其进行换算,计

算出其中磷含量,以磷含量为基准,共设 0、50、75、100 kg·hm⁻²/年 4 种磷养分添加梯度,即 P₀、P₅₀、P₇₅、P₁₀₀。于每年 8 月植物生长茂盛期进行施肥处理,选取晴朗的早晨将过磷酸钙溶于水均匀喷洒于土壤表面,水量相当于 2 mm 的自然降雨量,P₀添加等量的水,以减少因添加水量的不同而影响试验结果。

1.3 样品采集与测定

2021 年 8 月施肥前进行样品采集,清除枯落物层,使用五点取样法采集表层土壤样品(0~10 cm),将 5 个样品均匀混合,混合好的样品放入放有冰袋的保温箱,采集完以后迅速运回实验室。过 2 mm 筛去除根系和石块,将过完筛的土壤样品分为 2 份,1 份自然风干用于土壤理化性质的测定,1 份置于 -20 °C 冰箱用于酶活性的测定^[18](表 1)。

表 1 土壤理化性质和酶活性测定方法

Table 1 Methods for determination of soil physical and chemical properties and enzyme activity

土壤养分名称	单位	测定方法
pH		pH 计测定
有机碳	g·kg ⁻¹	重铬酸钾氧化-外加加热法
全氮(TN)	g·kg ⁻¹	凯氏定氮法
全磷(TP)	g·kg ⁻¹	钼锑抗比色法
铵态氮(NH ₄ ⁺ -N)	mg·kg ⁻¹	氯化钾浸提-紫外分光光度法
硝态氮(NO ₃ ⁻ -N)	mg·kg ⁻¹	氯化钙浸提-紫外分光光度法
有效磷(AP)	mg·kg ⁻¹	碳酸氢铵浸提-钼锑抗比色法
微生物量碳(MBC)	mg·kg ⁻¹	氯仿熏蒸 K ₂ SO ₄ 提取法
微生物量氮(MBN)	mg·kg ⁻¹	氯仿熏蒸 K ₂ SO ₄ 提取法
易氧化有机碳(ROC)	mg·kg ⁻¹	紫外分光光度法
交换性钙	cmol·kg ⁻¹	1 mol·L ⁻¹ 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法(GB7865-87(2))
交换性镁	cmol·kg ⁻¹	1 mol·L ⁻¹ 乙酸铵交换-原子吸收分光光度法(GB7865-87(2))
纤维素酶	U·g ⁻¹	3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法
淀粉酶	U·g ⁻¹	3,5-二硝基水杨酸(DNS)比色法
蔗糖酶	U·g ⁻¹	3,5-二硝基水杨酸比色法
β-葡萄糖苷酶	U·g ⁻¹	标准硫代硫酸钠滴定法
脲酶	U·g ⁻¹	苯酚-次氯酸钠比色法
多酚氧化酶	U·g ⁻¹	索莱宝试剂盒(BC0110)
过氧化物酶	U·g ⁻¹	索莱宝试剂盒(BC0895)

1.4 数据统计与处理

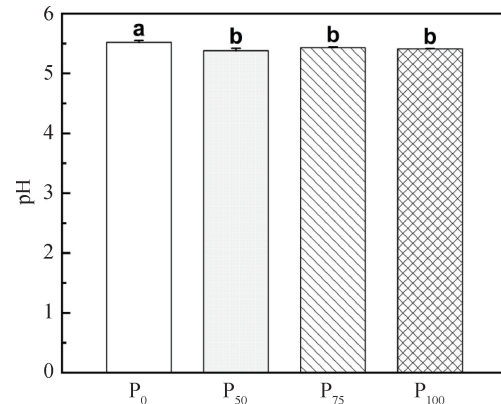
采用 Excle 2019 进行数据整理,使用单因素方差分析确定磷添加对 pH、土壤有机碳、全氮、全磷、铵态氮、硝态氮、有效磷、微生物量碳氮、易氧化有机

碳、交换性钙镁离子、纤维素酶、淀粉酶、蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、脲酶、多酚氧化酶和过氧化物酶的影响。采用最小显著极差法(LSD)多重比较确定不同处理下各指标的差异(P<0.05)。上述分析采用 SPSS 21.0 软件完成。使用 R 4.3.3 进行土壤理化性质与酶活性变化间的层级聚类分析和相关性分析。图表中的数据表达形式为平均值±标准误,结果的可视化使用 Origin 2024 和 R 4.3.3 进行。

2 结果与分析

2.1 磷添加对土壤 pH 的影响

磷添加显著影响了土壤 pH(P<0.05)。与 P₀ 相比,P₅₀、P₇₅、P₁₀₀ 处理下土壤 pH 分别降低了 2.5%、1.6% 和 2.0% (图 1),但是,3 种磷添加下 pH 并无显著性差异。



不同小写字母表示不同处理之间存在显著性差异(P<0.05)。

图 1 不同浓度磷处理下土壤 pH 的平均值

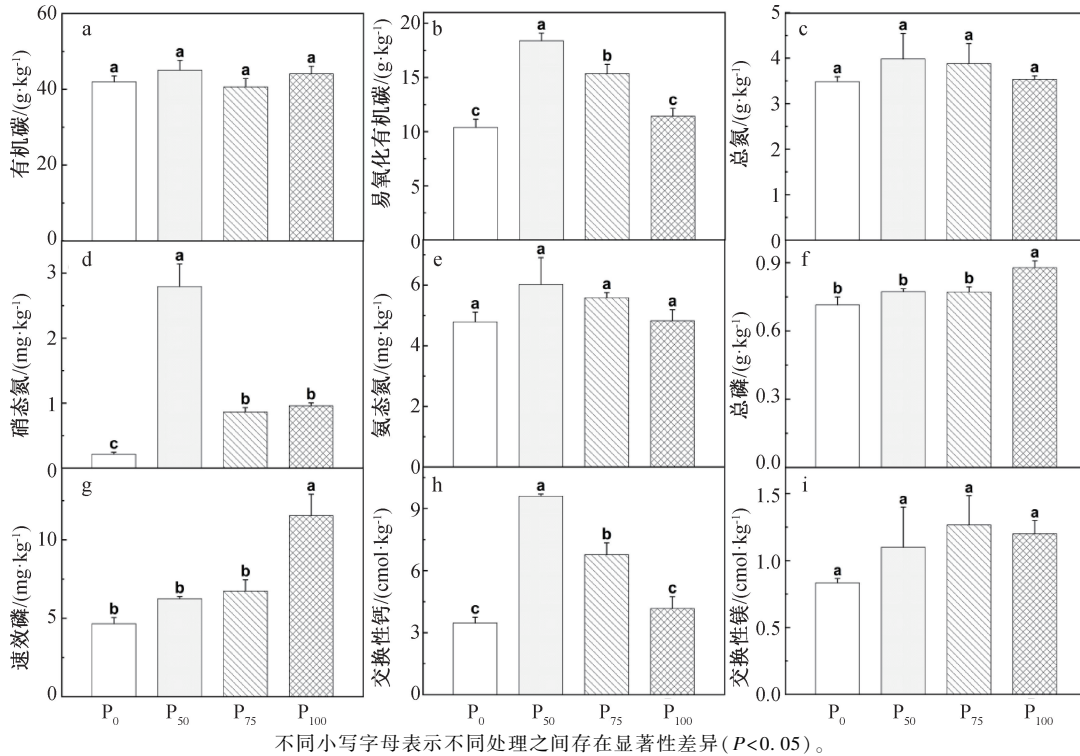
Figure 1 Mean values of soil pH under different concentrations of phosphorus treatment

2.2 磷添加对土壤养分的影响

同 P₀ 相比,不同磷添加下并没有对 SOC 的含量产生显著性影响(P<0.05)。P₅₀ 和 P₁₀₀ 处理下 SOC 分别增加了 7.4% 和 5.1%。P₇₅ 处理 SOC 降低了 3.1% (图 2a)。P₅₀、P₇₅ 添加下均显著提高了 ROC 的含量(P<0.05),P₅₀、P₇₅ 添加下 ROC 分别提升了 77.2% 和 47.9% (图 2b)。磷添加下对土壤 TN、NO₃⁻-N 和 NH₄⁺-N 发生了不同变化(图 2c—e),同 P₀ 相比,其中对于土壤 TN 和 NH₄⁺-N 含量略有提升但并没有达到显著性变化(P<0.05)。而同 P₀ 相比 3 种梯度的磷添加下均显著提高了土壤 NO₃⁻-N 的含量,分别提高了 1219.3%、307.1%、352.0%。P₁₀₀ 处理下显著提升了土壤 TP (图 2f) 和 AP (图 2g) 的含量(P<0.05),提升幅度分别为 22.9%、147.9%,同 P₀ 相比,P₇₅、P₁₀₀ 添加下均显著

提升了土壤中交换性钙(图 2h)的含量($P < 0.05$), P_{50} 增加幅度最大达到 176.9%, P_{75} 提升了 95.2%。

与 P_0 相比(图 2i), 交换性钙含量虽有升高, 但均未发生显著变化。



不同小写字母表示不同处理之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图 2 不同浓度磷处理下土壤养分含量的平均值

Figure 2 Mean values of soil nutrient content under different concentrations of phosphorus treatments

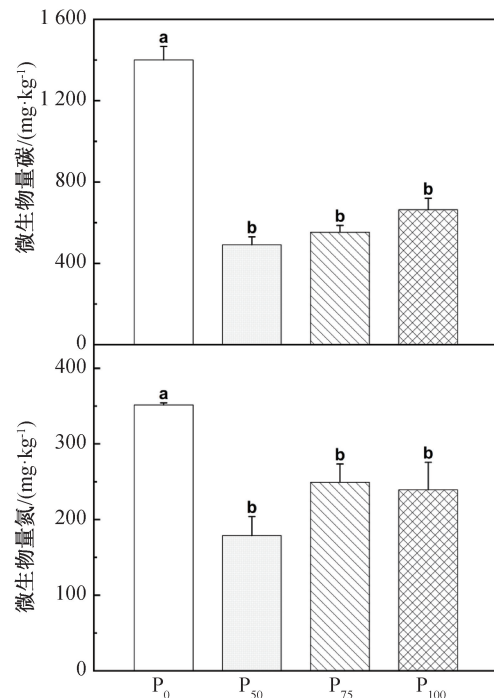
2.3 磷添加土壤微生物量碳氮的影响

不同施肥处理下(图 3)均显著降低了微生物量碳、氮的含量($P < 0.05$)。与 P_0 相比, P_{50} 添加下土壤微生物量碳、氮降低幅度最大, 分别为 64.9% 和 49.1%, 在 P_{75} 和 P_{100} 的添加下, MBC 分别降低了 60.5% 和 52.6%, MBN 分别降低了 29.1% 和 32.0%。

2.4 磷添加土壤酶活性的影响

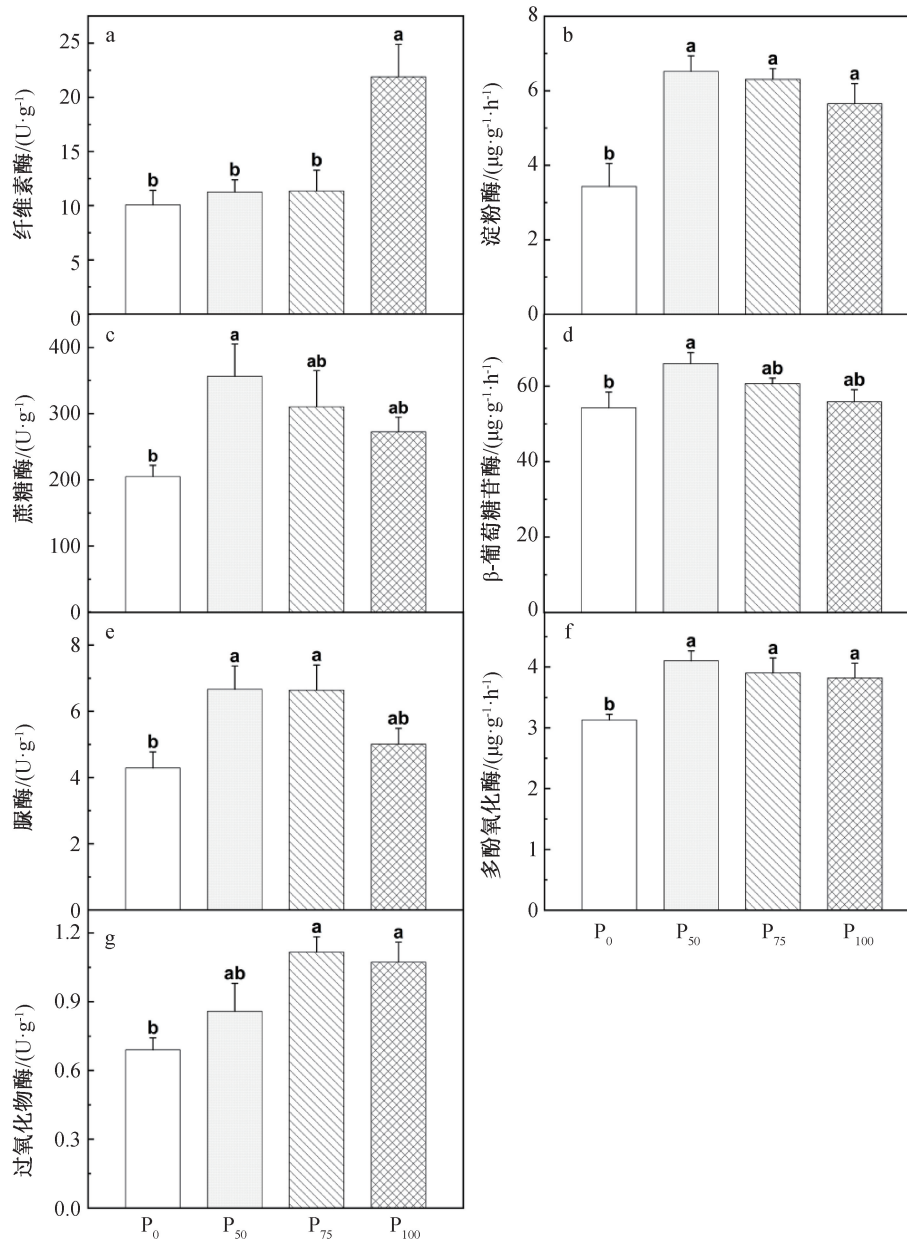
前 4 种酶分别表示 4 种碳循环相关的土壤酶。与 P_0 相比, 纤维素酶(图 4a)只有在 P_{100} 处理下显著提升($P < 0.05$), 提升幅度为 117.3%。与 P_0 相比, 3 种处理均显著提升了淀粉酶(图 4b)的活性($P < 0.05$), P_{50} 提升幅度最大, 达到了 90.0%, P_{75} 、 P_{100} 分别提升了 83.8% 和 64.9%。蔗糖酶(图 4c)和葡萄糖苷酶(图 4d)都只有在 P_{50} 处理下的活性显著提升($P < 0.05$), 分别增加了 74.0% 和 21.7%。脲酶(图 4e)的活性在 P_{50} 、 P_{75} 处理下显著增加($P < 0.05$), 分别增加了 55.3% 和 54.6%。与 P_0 相比, 3 种处理都显著提高了多酚氧化酶(图 4f)的活性($P < 0.05$), P_{50} 增加的最多, 增加了 31.1%, P_{75} 、 P_{100} 分别增加了 24.8% 和 22.2%。对于过氧化物酶(图 4g)的活性, 只有在 P_{75} 和 P_{100} 的添加下同对照相比显著增加($P < 0.05$), P_{75} 处理下土壤酶活性最高, 增加

了 61.8%, P_{100} 处理下增加了 55.5%。



不同小写字母表示不同处理之间存在显著性差异($P < 0.05$)。

图 3 不同浓度磷处理下土壤微生物量碳氮的平均值
Figure 3 Mean values of soil microbial carbon and nitrogen under different t concentrations of phosphorus treatments



不同小写字母表示不同处理之间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

图 4 不同浓度磷处理下土壤酶活性的平均值

Figure 4 Mean values of soil enzyme activities under different concentrations of phosphorus treatments

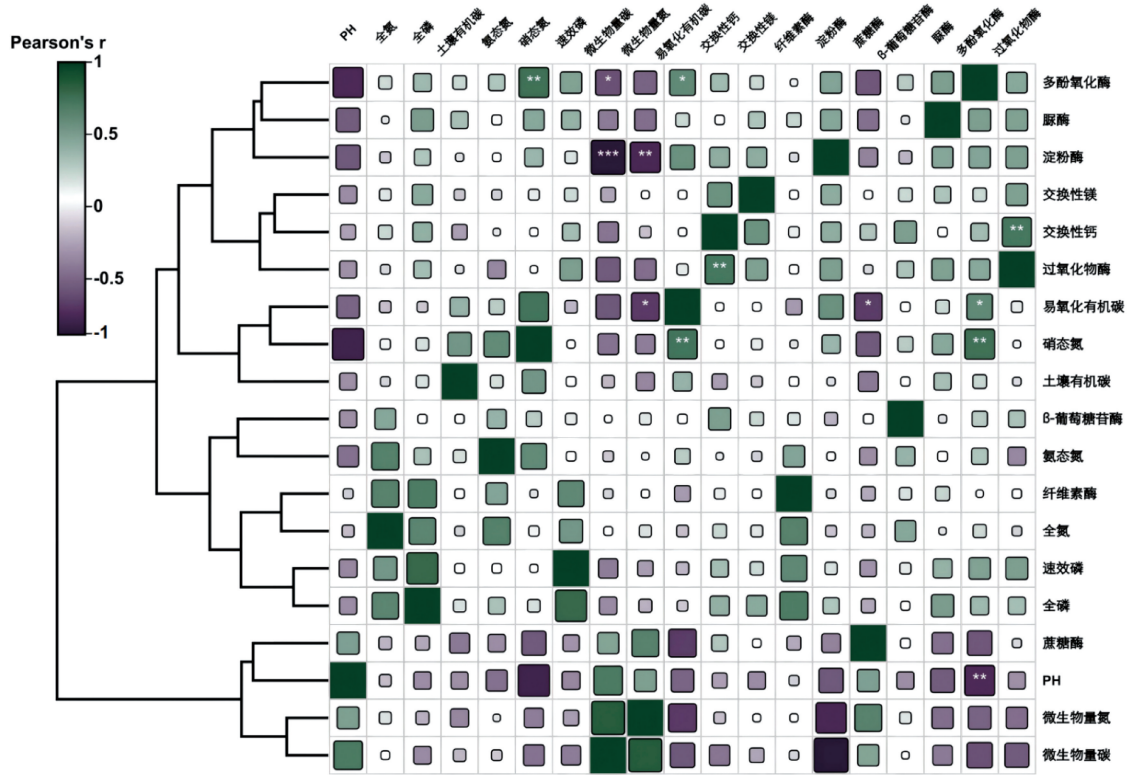
2.5 土壤理化性质和酶活的相关性分析及层级聚类分析

相关性分析表明(图 5), pH 仅与多酚氧化酶显著负相关 ($P < 0.01$), 但与其他指标的相关性均未达到显著性变化。硝态氮和易氧化有机碳、多酚氧化酶呈显著正相关关系 ($P < 0.01$)。易氧化有机碳和微生物量氮、蔗糖酶呈显著性负相关, 和多酚氧化酶呈显著正相关 ($P < 0.05$)。过氧化物酶和交换性钙两者呈显著正相关 ($P < 0.05$), 淀粉酶和微生物量碳氮都呈显著性负相关 ($P < 0.01$)。多酚氧化酶和硝态氮、易氧化有机碳呈显著正相关, 与微生物量碳呈

显著负相关。除以上相关内容外, 土壤养分和酶活性之间或者内部均为显著相关关系。从左侧树状图看, 可以识别出 4 个主要的功能簇。氧化酶簇: 多酚氧化酶和过氧化物酶聚在一起说明它们在各处理下的变化趋势高度一致。此外它们与 pH、交换性阳离子较近, 显示出了这些理化因子和氧化酶有协同响应关系, 表达了氧化酶主要受土壤酸度和离子环境调控。水解酶簇: 这一簇靠近 SOC 和 ROC, 表明水解酶活性与有机碳库, 尤其是活性碳组分密切相关。显示出水解酶主要受底物可利用性调控。养分、有机碳簇: SOC、ROC、速效养分聚的较近显示了

它们在生态功能上相互耦合。这些变量与水解酶簇联系紧密,强调有机碳和养分供应对分解活性的支撑作用。微生物量碳氮簇:微生物量碳氮聚在一起,

但与多数酶活性簇距离较远,显示出了微生物量碳氮的变化规律与酶活性模式不完全一致,可能反映了“生物量积累-功能输出”的差异。



* $P < 0.05$; 0.001 < ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$ 。

图 5 不同浓度磷处理下土壤理化性质间的层级聚类及皮尔逊相关性分析

Figure 5 Hierarchical clustering and Pearson's correlation analysis between soil physicochemical properties under different concentrations of phosphorus treatments

3 讨论

3.1 低磷添加对土壤养分和酶活性的影响

在 P_{50} 处理下,本研究发现土壤速效养分和酶活性均表现出显著提升,尤其是硝态氮($NO_3^- - N$)含量较对照激增 1 219.3%,这一增幅远超中磷和高磷处理。与此同时,ROC 含量增加 77.2%,交换性 Ca^{2+} 提升 176.9%,蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和脲酶的活性分别上升 74.0%、21.7% 和 55.3%。这些结果表明低水平磷输入不仅缓解了土壤磷素限制,而且刺激了氮循环的活化,促进了氮的转化与积累^[19]。类似现象在青藏高原其他试验中也有所观察^[20]。有文献^[21]指出,低剂量磷能增强硝化作用,从而导致土壤中 $NO_3^- - N$ 显著增加。而在温带农田系统中,磷添加更多表现为促进有机磷矿化,对无机氮的激增作用并不突出^[22]。磷添加改变了氮供给与转化的速率平衡,在短期或低温条件下,氮的生成(矿化或硝化)可能暂时快于植物吸收,从而在土壤中

表现为 NO_3^- 累积^[12],由此产生的 $NO_3^- - N$ 激增既有助于短期内提高氮素可利用性,也可能导致养分过剩氮素淋失和潜在的温室气体排放风险。这说明高寒草地与低纬度农田在养分循环模式上存在差异,其独特的低温环境和养分贫瘠条件使得土壤对外源磷的反应更加敏感。因此,低磷添加虽能促进养分周转,但其负面效应也不容忽视。

3.2 中磷添加对土壤养分和酶活性的影响

在 P_{75} 处理下,土壤养分和酶活性整体仍呈现正向响应。ROC 增加 47.9%,交换性 Ca^{2+} 提升 95.2%,脲酶和过氧化物酶活性分别提升 54.6% 和 61.8%,均达到最高水平。然而,与低磷相比,碳循环相关的蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶的提升效应明显减弱,不再呈现持续上升的趋势。这种现象表明,中等剂量的磷输入虽然仍能改善土壤养分有效性,但其促进作用出现“边际效益递减”,系统已接近响应阈值^[23]。这种结果与文献^[24]的多年野外观测一致,他们发现磷添加在 $50 \sim 75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}/\text{年}$ 范围内能

显著提高土壤养分与酶活,但超过这一范围效应趋于平缓。相比之下,温带草地的磷添加往往呈现持续单调促进效应^[25],这说明高寒草地对养分输入存在更加明显的阈值特征。其差异可能源于两方面原因:中磷水平虽有效缓解了磷限制,但同时导致微生物的 C:P 平衡失调,使碳成为新的限制因子,从而抑制了水解酶的进一步合成^[26]。磷添加可能改变了植物功能群竞争格局,间接影响了微生物群落结构,削弱了其分泌部分酶类的能力^[27]。因此,中磷处理的关键差异点在于“边际效益递减”。它揭示了高寒草地土壤对磷输入的“最优区间”,即适量磷添加能最大程度提升养分活性和酶反应,但超过这一水平后系统的资源利用效率不再持续增加。这一结果对草地管理具有重要启示:在高寒生态系统中,施磷应控制在中低水平,以避免突破临界点导致资源利用效率下降。

3.3 高磷添加对土壤养分和酶活性的影响

在 P_{100} 下,土壤养分表现出与低、中磷处理显著不同的模式。虽然 TP 和 AP 分别提升 22.9% 和 147.9%,但 SOC 含量未发生显著变化,微生物量碳和氮却大幅下降,分别减少 52.6% 和 32.0%。与此同时,纤维素酶、多酚氧化酶和过氧化物酶活性显著增强,而蔗糖酶和 β -葡萄糖苷酶等水解酶活性反而下降。这说明过量磷输入使微生物群落发生了代谢策略转变,即由积累生物量转向加强氧化酶分泌,以分解难降解有机质^[26]。有全球 meta 分析指出,高磷输入往往导致微生物量下降,并改变酶活性模式。进一步强调,人类引起的磷富集效应可能被低估,过量磷会破坏土壤生态平衡并诱导碳释放^[28]。本研究中 P_{100} 处理降低了 pH,并伴随交换性 Ca^{2+} 上升,进一步加剧了微生物受抑制程度。即在磷限制解除后,微生物将代谢重心转向碳获取,从而加速难降解有机质分解^[25]。因此,这一过程不仅导致土壤微生物库的削弱,也通过氧化酶的增强触发“磷诱导碳释放”,增加了土壤碳损失的风险^[29]。这一发现表明,在高寒草地中,过量磷输入可能削弱生态系统的碳汇功能,并带来潜在的气候反馈效应。

3.4 磷添加梯度下的土壤养分和酶活性变化

综上所述,本研究揭示了磷添加在高寒草地土壤中呈现出明显的梯度效应:低磷添加(P_{50})主要通过缓解磷限制和激活硝化过程,显著提升了速效养分和水解酶活性,表现为对氮循环的放大效应;中磷添加(P_{75})在提升氮循环酶和氧化酶活性的同时,对

部分水解酶的促进作用趋缓,呈现出边际效益递减,说明系统进入响应阈值区间;而高磷添加(P_{100})则引发土壤酸化和微生物量下降,促使群落代谢策略由积累生物量转向增强氧化酶分泌,从而触发“磷诱导碳释放”机制。总的来说,在磷添加下,我们识别出两条并行但指向不同功能的通道:底物牵引的水解轴与酸度牵引的氧化轴。尽管微生物量碳氮含量下降,酶谱发生从水解到氧化的重排,但并非简单的代谢衰退。由此形成“ P_{50} 最优、 P_{75} 边际递减、 P_{100} 策略转向并伴随结构性碳动员风险”的阶梯式响应,这一由促进到阈值再到负效应的规律,不仅体现了高寒草地对外源磷输入的高度敏感性,也揭示了生态系统功能对养分增加的非线性响应。高寒草地的这种非线性响应凸显了环境条件(低温、养分贫瘠、植被组成)在调控养分循环中的关键作用^[30],提示将磷输入控制在阈值以下以维持功能稳定与碳库安全。但试验仍存在一些问题,如低磷下硝态氮的剧增、土壤有机碳组分的变化仍需进一步通过硝化联级反应和生物标志物技术进行更深入的研究,这也为我们下一步工作指明了方向。总的来说,该研究凸显了区域生态系统对外源养分输入的高度敏感性。这种差异性不仅反映了寒冷、养分贫瘠和特殊植被构成等环境条件对养分循环的调控作用,也提示过量的磷沉降可能削弱高寒草地的碳汇功能。因此,在全球变化背景下,应高度重视磷沉降增加可能对高寒草地碳—氮—磷耦合关系的扰动,合理控制磷输入水平,以避免突破生态系统的最佳阈值而引发碳库不稳定和潜在气候反馈效应。

4 结论

本研究在西藏色季拉山高寒草地开展 2 年原位梯度养分添加实验,通过对土壤理化性质—微生物量—土壤酶三者关系的作用分析,揭示了高寒草地对外源磷输入的非线性—阈值响应轨迹。具体表现为低磷显著激活氮循环与底物水解,表明适度磷输入可缓解土壤养分限制并放大氮转化与水解酶驱动的活性碳供给。中磷总体上表现出了边际递减效应,显示土壤生态系统进入了响应阈值区间,即适度收益与潜在代偿并存。高磷则指向微生物代谢策略转向难降解有机质的分解,增加有机碳损失的风险。综上,本研究强调:在全球变化背景下,应重视青藏高原地区大气磷沉降增加及人为施肥带来的潜在风险。保持 $75 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}/\text{年}$ 以下的磷输入水平对于维持高寒草地土壤养分平衡、避免碳损失以及稳

定生态系统功能至关重要。本研究为理解高寒草地土壤碳—氮—磷耦合关系提供了实证依据,并为未来草地养分管理与碳汇功能保护提供了科学参考。

致谢 感谢叶彦辉、韩艳英教授在论文选题、文章修改及数据方面给予的支持,同时感谢西藏农牧大学研究生处设置的研究生教育创新计划项目(YJS2024-31)的支持。

参考文献(References)

- [1] ČAPEK P, MANZONI S, KAŠTOVSKÁ E, et al. A plant-microbe interaction framework explaining nutrient effects on primary production[J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2018, 2(10): 1588-1596.
- [2] BÜNEMANN E K, OBERSON A, FROSSARD E. Phosphorus in action: biological processes in soil phosphorus cycling[M]. Berlin, Heidelberg: Springer, 2011.
- [3] MAHOWALD N, JICKELLS T D, BAKER A R, et al. Global distribution of atmospheric phosphorus sources, concentrations, and deposition rates, and anthropogenic impacts[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2008, 22(4): 2008GB003240.
- [4] LIEBERMAN H P, VON S C, KALLENBACH C M. Soil Phosphorus dynamics are an overlooked but dominant control on mineral-associated organic matter[J]. *Global Change Biology*, 2025, 31(7): e70307.
- [5] SOONS M B, HEFTING M M, DORLAND E, et al. Nitrogen effects on plant species richness in herbaceous communities are more widespread and stronger than those of phosphorus[J]. *Biological Conservation*, 2017, 212: 390-397.
- [6] 杨晓霞,任飞,周华坤,等. 青藏高原高寒草甸植物群落生物量对氮磷添加的响应[J]. *植物生态学报*, 2014, 38(2): 159-166.
- YANG X X, RAN F, ZHOU H K, et al. Responses of plant community biomass to nitrogen and phosphorus additions in an alpine meadow on the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Journal of Plant Ecology*, 2014, 38(2): 159-166.
- [7] KUNITO T, MORO H, MISE K, et al. Ecoenzymatic stoichiometry as a temporally integrated indicator of nutrient availability in soils[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2024, 70(4): 246-269.
- [8] CLAUSING S, LIKULUNGA L, JANZ D, et al. Impact of nitrogen and phosphorus addition on resident soil and root microbiomes in beech forests[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2021, 57(8): 1031-1052.
- [9] ZHANG J, SAYER E J, ZHOU J, et al. Long-term fertilization modifies the mineralization of soil organic matter in response to added substrate[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 798: 149341.
- [10] SUN Y, WANG C, CHEN X, et al. Phosphorus additions imbalance terrestrial ecosystem C: N: P stoichiometry[J]. *Global Change Biology*, 2022, 28(24): 7353-7365.
- [11] 盛基峰,李焱,于美佳,等. 氮磷添加对高寒草地土壤养分和相关酶活性的影响[J]. *生态环境学报*, 2022, 31(12): 2302-2309.
- SEHNG J F, LI Y, YU M J, et al. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil nutrients and activity of related enzymes in alpine grassland[J]. *Journal of Ecology and Environment*, 2022, 31(12): 2302-2309.
- [12] WANG R, BICHARANLOO B, HOU E, et al. Phosphorus supply increases nitrogen transformation rates and retention in soil: a global meta-analysis[J]. *Earth's Future*, 2022, 10(3): e2021EF002479.
- [13] RUI L, JIGUANG F, BIAO Z. Effects of nitrogen and phosphorus addition on soil carbon and nitrogen mineralization in temperate forest and subtropical forest[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, 58(4): 730-738.
- [14] LI Y, CHENG Y, WANG F, et al. Phosphate fertilizer effects on microbial resource limitations in wheat crop-land: evidence from coenzymatic stoichiometry[J]. *Agronomy*, 2025, 15(3): 731.
- [15] WANG W, LIU X, XU J, et al. Imbalanced nitrogen and phosphorus deposition in the urban and forest environments in southeast Tibet[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(4): 774-782.
- [16] ZHU J, WANG Q, HE N, et al. Imbalanced atmospheric nitrogen and phosphorus depositions in China: implications for nutrient limitation[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2016, 121(6): 1605-1616.
- [17] LIU H, MI Z, LIN L, et al. Shifting plant species composition in response to climate change stabilizes grassland primary production[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, 115(16): 4051-4056.
- [18] 史瑞和,鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京:农业出版社, 1996.
- [19] YUE P, ZHANG J, ZHU G, et al. Impact of nitrogen and phosphorus additions on soil gross nitrogen transformations in a temperate desert steppe[J]. *European Journal of Soil Science*, 2023, 74(5): e13416.
- [20] WU J, WANG H, LI G. Phosphate addition intensifies the increase in N₂O emission under nitrogen deposition in wet meadows of the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Frontiers in Microbiology*, 2024, 15: 1472792.
- [21] NING J, ARAI Y, SHEN J, et al. Effects of phosphorus

- on the nitrification process in a fertile soil amended with urea[J]. *Agriculture*,2021,11(6):523.
- [22] LU X, MAHDI A K, HAN X Z, et al. Long-term application of fertilizer and manures affects P fractions in Mollisol[J]. *Scientific Reports*,2020,10:14793.
- [23] LANGHANS C, BEUSEN A, MOGOLLÓN J, et al. Phosphorus for sustainable development goal target of doubling smallholder productivity[J]. *Nature Sustainability*,2022,5(1):57-63.
- [24] ZHANG X, YE Y, TAO J, et al. Responses of alpine grassland plant communities on Sejila Mountain in the Qinghai-Tibet Plateau to phosphorus addition[J]. *Frontiers in Environmental Science*,2025,13:1601695.
- [25] ZHANG H, LIU X, LONG J, et al. Phosphorus addition stimulates overall carbon acquisition enzymes but suppresses overall phosphorus acquisition enzymes: a global meta-analysis[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*,2024,375:109219.
- [26] ZHAO S, ZHANG S. Long-term phosphorus addition alters soil enzyme kinetics with limited impact on their temperature sensitivity in an alpine meadow[J]. *Science of The Total Environment*,2024,957:177569.
- [27] LIU D, SONG X, LIU Y, et al. Effects of phosphorus application on soil phosphorus forms and phoD-harboring microbial communities in an alpine grassland on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Frontiers in Ecology and Evolution*,2023,11:1131408.
- [28] CHEN W, ZHOU H, WU Y, et al. Direct and indirect influences of long-term fertilization on microbial carbon and nitrogen cycles in an alpine grassland[J]. *Soil Biology and Biochemistry*,2020,149:107922.
- [29] ZHANG Q, LI J, ZHANG S, et al. Differentiate responses of soil nutrient levels and enzymatic activities to freeze-thawing cycles in different layers of moss-dominated biocrusts in a temperate desert[J]. *Frontiers in Plant Science*,2023,14:1137754.
- [30] CAO W, CHEN Y, JIANG L, et al. Ecoenzymatic stoichiometry reveals that increasing altitude exacerbates soil microbial phosphorus limitation in alpine grassland ecosystems in Xinjiang[J]. *Environmental Research*,2025,275:121320.

(责任编辑:唐慧 郭芸婕)