

doi:10.11733/j.issn.1007-0435.2026.04.007

引用格式:肖伟,麻来香,段蕊,等.大狼毒主要化感物质对山地草甸土壤磷转化的影响[J].草地学报,2026,34(4):1205-1214
XIAO Wei, MA Lai-xiang, DUAN Rui, et al. Effects of Major Allelopathic Substances from *Euphorbia jolkinii* Boiss on Phosphorus Transformation in Mountain Meadow Soil[J]. Acta Agrestia Sinica, 2026, 34(4):1205-1214

大狼毒主要化感物质对山地草甸土壤磷转化的影响

肖伟[#], 麻来香[#], 段蕊, 罗钦, 肖雪, 牛琼梅, 次旺, 单贵莲*, 初晓辉*
(云南农业大学动物科学技术学院, 云南昆明 650201)

摘要:为探究滇西北山地草甸的退化指示物种大狼毒(*Euphorbia jolkinii* Boiss)的化感作用机制,本研究通过在土壤中添加不同浓度的4-硝基苯酚(4-Nitrophenol, 4-NP)和2-苯乙胺(2-Phenethylamine, 2-PEA),分析其对土壤磷转化及相关指标的影响。结果显示,两种化感物质均显著提高了土壤微生物量磷、铝结合磷、钙结合磷和中等活性有机磷含量,降低了pH值及铁结合态磷、闭蓄态磷、中等稳定性与高稳定性有机磷含量($P<0.05$),并促进细菌和放线菌繁殖。4-NP显著增强植酸酶活性而降低酸性磷酸酶活性;2-PEA则显著提高酸性磷酸酶、植酸酶和磷酸二酯酶活性,降低碱性磷酸酶活性($P<0.05$)。综上,4-NP和2-PEA的添加会直接影响土壤的理化性质,改变有机磷及无机磷各组分含量,间接实现土壤养分在其根际环境中的积累,促进其自身进一步扩张。

关键词:大狼毒;化感物质;山地草甸;土壤磷转化

中图分类号:S812.6

文献标识码:A

文章编号:1007-0435(2026)04-1205-10

Effects of Major Allelopathic Substances from *Euphorbia jolkinii* Boiss on Phosphorus Transformation in Mountain Meadow Soil

XIAO Wei[#], MA Lai-xiang[#], DUAN Rui, LUO Qin, XIAO Xue, NIU Qiong-mei, CI Wang, SHAN Gui-lian*, CHU Xiao-hui*

(College of Animal Science and Technology, Yunnan Agricultural University, Kunming, Yunnan Province 650201, China)

Abstract: To explore the allelopathic mechanism of *Euphorbia jolkinii* Boiss, a degradation indicator species of mountain meadows in northwest Yunnan, in this study we analyzed its effects on soil phosphorus transformation and related indicators by adding different concentrations of 4-Nitrophenol (4-NP) and 2-Phenethylamine (2-PEA) to the soil. The results showed that both allelochemicals significantly increased soil microbial biomass phosphorus, aluminum-bound phosphorus, calcium-bound phosphorus, and moderately reactive organic phosphorus content, decreased pH and iron-bound phosphorus, occluded phosphorus, moderately stable and highly stable organic phosphorus content ($P<0.05$), and promoted the proliferation of bacteria and actinomycetes. 4-NP significantly enhanced phytase activity and reduced acid phosphatase activity. 2-PEA significantly increased acid phosphatase, phytase, and phosphodiesterase activities, while reduced alkaline phosphatase activity ($P<0.05$). In summary, the addition of 4-NP and 2-PEA directly affects soil physicochemical properties, changes the content of organic and inorganic phosphorus components, indirectly achieves the accumulation of soil nutrients in its rhizosphere environment, and promotes its further expansion.

Key words: *Euphorbia jolkinii* Boiss; Allelochemicals; Mountain meadows; Soil phosphorus transformation

云南省天然草地面积广袤,其在草地畜牧业持续发展及生态安全建设方面发挥着重要的支撑作

用^[1]。在云南省的西北部,分布着大面积连片的山地草甸,其不仅是滇西北重要的生态屏障,也是当

收稿日期:2025-06-21;修回日期:2025-10-10

基金项目:国家自然科学基金项目(32560924);云南省农业联合专项(202501BD07001-001);云南省万人计划青年拔尖人才专项(YNWR-QNBJ-2018-031);云南省水利科技重大专项(2023BG204001)资助

作者简介:肖伟(2000-),男,藏族,云南香格里拉人,硕士研究生,主要从事草地资源利用与可持续管理研究,E-mail: 1850834932@qq.com;#麻来香(2001-),女,傈僳族,云南芒市人,硕士研究生,主要从事草地生态恢复学研究,E-mail: 368696695@qq.com;*通信作者 Author for correspondence, E-mail: shanguilian8203@126.com; 478491637@qq.com

地畜牧业发展的物质基础^[2-3]。然而,近年来过度放牧等人为干扰导致滇西北山地草甸不断退化,物种多样性降低,优良牧草数量锐减,毒害草扩张蔓延成为滇西北山地草甸退化的显著特征^[4-6]。滇西北山地草甸广泛分布的毒害草主要为大狼毒(*Euphorbia jolkinii* Boiss),该物种在滇西北山地草甸的扩张蔓延引起了群落环境、种内和种间关系、群落演替、物种分布格局等方面的改变^[7-8]。

大狼毒为大戟科大戟属多年生毒害草,广泛分布于滇西北山地草甸、山坡、灌丛等地^[9-10]。该物种的入侵扩张会对群落中其他植物产生不利影响,因此在大狼毒种群集中分布区域,草地中物种数量锐减,优良牧草产量大幅度下降,大狼毒密度及生物量显著增加并成为群落中的优势物种,草地基本失去其生产价值^[11]。有研究表明^[12-15]大狼毒根和茎叶中含有4-硝基苯酚(4-Nitrophenol, 4-NP)和2-苯乙胺(2-Phenethylamine, 2-PEA)等酚酸类、生物碱类次生代谢产物,这些物质可能会通过茎叶淋溶、残体腐解、根系分泌等途径释放到土壤环境中,进而促进土壤微生物繁殖,提升土壤养分转化功能菌群的相对丰度,并可能由此促进根际土壤养分转化,富集有效养分供其自身生长,从而实现其在入侵地的扩张蔓延。

磷是植物必需的三大营养元素之一,对植物的生长发育和代谢功能具有重要作用^[16]。滇西北山地草甸土壤中磷的有效性很低,且土壤中的磷大多以植物难以直接吸收的稳定形态存在,导致滇西北山地草甸普遍存在磷缺乏现象。在磷缺乏的山地草甸中,大狼毒凋落物的磷含量显著高于其他物种^[17],这一定程度上说明在磷缺乏环境中大狼毒比其他物种吸收了更多的磷。然而,大狼毒是通过何种途径活化并获得更多的有效磷的?大狼毒对土壤中稳定态磷的活化是否与其分泌释放的次生代

谢产物有关?为探明这些科学问题,本研究基于前期研究,选取4-硝基苯酚和2-苯乙胺为添加物,采用人为添加化感物质溶液、室内控制培养土壤样品的方法,开展大狼毒主要化感物质4-硝基苯酚和2-苯乙胺对土壤磷转化的影响研究,通过研究探讨大狼毒化感物质在其种群扩张过程中的调节作用。

1 材料与方法

1.1 试验设计

依据课题组前期对滇西北山地草甸大狼毒入侵程度梯度(未入侵、轻度入侵、严重入侵)的划分^[18],结合对大狼毒次生代谢物和根系分泌物的检测^[19],以及不同物质的化感生测结果^[12-13,20],确定了两种具有代表性的主要化感物质(4-硝基苯酚和2-苯乙胺)及其与大狼毒入侵程度相符的浓度,并将从市场购买的4-NP和2-PEA按“轻微化感作用浓度”和“强烈化感作用浓度”^[12]配置成溶液(表1)。

将从滇西北香格里拉市小中甸镇拖木南小组国家级草原固定监测点采集的大狼毒入侵样地未入侵斑块新鲜土壤过2mm筛,参照高雪峰等^[21]的方法,将过筛土壤装入组培瓶(每瓶100g),按表1试验设计在每瓶土壤中加入10mL相应浓度的化感物质溶液或蒸馏水(对照,CK),每个处理设置3次重复。为模拟自然环境中大狼毒化感物质的持续释放,在培养第15,30,45和60天时,分别再次补充10mL相同浓度溶液。培养条件设定为黑暗环境下25℃恒温培养75d,既可抑制光照对物质降解的干扰,又能保证土壤微生物活性,培养时间则依据土壤养分转化过程所需周期和前期实验经验确定^[12]。培养结束后取样,测定不同处理土壤各组分磷含量及磷转化关键酶活性。

表1 大狼毒主要化感物质及产生化感作用的浓度阈值

Table 1 Major allelopathic substances of *E. jolkinii* Boiss and concentration thresholds for allelopathic effects

化感物质种类 Allelochemical species	来源 Source	轻微作用浓度及编号 Mild effect concentration and number	强烈作用浓度及编号 Intense effect concentration and number
4-硝基苯酚 4-Nitrophenol, 4-NP	上海源叶生物科技 有限公司 Shanghai YuanYe Biotechnology Co., Ltd.	10 mg·L ⁻¹ ; 4-NP ₁₀	50 mg·L ⁻¹ ; 4-NP ₅₀
2-苯乙胺 2-Phenethylamine, 2-PEA		100 μL·L ⁻¹ ; 2-PEA ₁₀₀	800 μL·L ⁻¹ ; 2-PEA ₈₀₀

1.2 指标的测定

参照《土壤农化分析》^[22]测定土壤理化性质。各指标测定方法为:土壤全磷(Total phosphorus, TP)和速效磷(Available phosphorus, AP)含量采用钼锑抗比色法测定;土壤微生物量磷(Microbial bio-

mass phosphorus, MBP)含量采用氯仿熏蒸浸提法测定;无机磷(Inorganic phosphorus)分级方法采用顾益初-蒋柏藩法;有机磷(Organophosphorus)分级方法采用Bowman等^[23]根据土壤有机磷与酸碱浓度差异的水解量而提出的有机磷分级方法。

使用北京盒子生工科技有限公司所生产的土壤酸性磷酸酶(Soil-Acid phosphatase, S-ACP)、碱性磷酸酶(Soil-Alkaline phosphatase, S-ALP)、植酸酶(Soil-Phytase, S-Phytase)、磷酸二酯酶(Phosphodiesterase, PDEs)试剂盒测定土壤磷转化相关酶活性。具体测定过程按照试剂盒说明书进行。

参照《土壤微生物研究原理与方法》^[24]测定土壤微生物菌群数量,具体为:在无菌条件下称取5 g新鲜土样,加45 mL灭菌水制成悬浊液,然后取适当稀释度(稀释 10^{-2} ~ 10^{-4} 倍)的土样悬浊液涂布于培养基上(细菌采用牛肉膏蛋白胨培养基,真菌采用改良马丁琼脂培养基,放线菌采用改良高氏1号培养基,有机磷细菌采用有机磷细菌培养基,无机磷细菌采用无机磷细菌培养基)。培养基由山东拓普生物工程有限公司提供,置于恒温培养箱中,调节温度至25℃培养微生物,细菌培养1~2 d,真菌和放线菌培养3~4 d,有机磷细菌和无机磷细菌培养4~5 d,采用平板计数法统计并计算中各菌群的数量。

1.3 数据分析

用Microsoft Excel 2016软件整理数据,用SPSS 27.0统计软件进行数据分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)进行多个处理的组间差异显著性分析(Duncan)。数据采用平均值±标准误表示, $P<0.05$ 代表差异显著。采用Origin 2022软件作图。

2 结果与分析

2.1 大狼毒化感物质对山地草甸土壤磷转化的影响

2.1.1 对土壤pH值的影响 与CK相比,4-NP₁₀, 4-NP₅₀, 2-PEA₁₀₀和2-PEA₈₀₀添加显著降低了土壤的pH值($P<0.05$),化感物质溶液浓度越高,降低幅度越大(图1)。

2.1.2 对土壤TP含量的影响 4-NP添加降低了山地草甸土壤TP含量,但4-NP₁₀处理与CK相比无显著差异,4-NP₅₀处理下土壤TP含量显著降低($P<0.05$)。2-PEA处理土壤TP含量分别下降3.12%和3.24%,但与CK相比无显著差异(图2)。

2.1.3 对土壤AP含量的影响 与CK相比,4-NP₁₀和2-PEA₁₀₀添加对土壤AP含量无显著影响。4-NP₅₀和2-PEA₈₀₀添加显著增加了土壤AP含量($P<0.05$),增加比例分别为13.09%和17.48%(图3)。

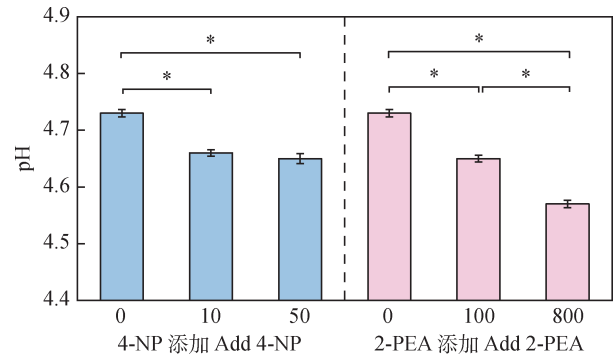


图1 大狼毒化感物质添加对土壤pH值的影响

Fig. 1 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil pH value

注:“*”表示不同浓度添加处理间在0.05水平上差异显著($P<0.05$),下同

Note: “*” denotes significant difference between different concentration addition treatments at 0.05 level ($P<0.05$), the same as below

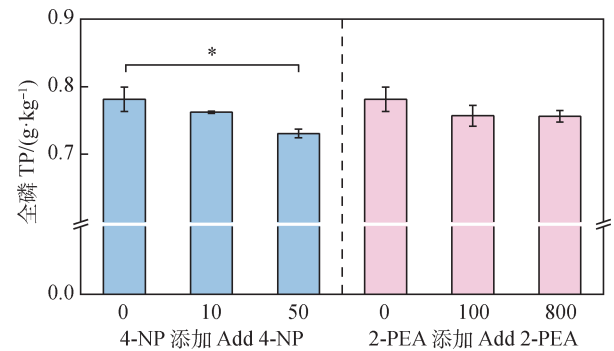


图2 大狼毒化感物质添加对土壤TP含量的影响

Fig. 2 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil TP content

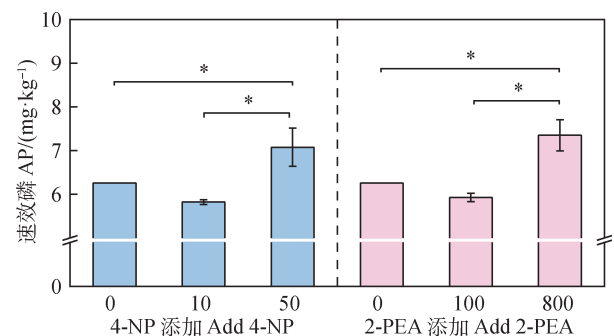


图3 大狼毒化感物质添加对土壤AP含量的影响

Fig. 3 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil AP content

2.1.4 对土壤MBP含量的影响 与CK相比, 4-NP₁₀处理对土壤MBP含量无显著影响, 4-NP₅₀处理显著增加了土壤MBP含量($P<0.05$), 增加比例为38.74%。2-PEA添加显著增加了土壤MBP含量($P<0.05$), 2-PEA₁₀₀, 2-PEA₈₀₀处理下土壤MBP含量分别增加了95.36%和71.41%(图4)。

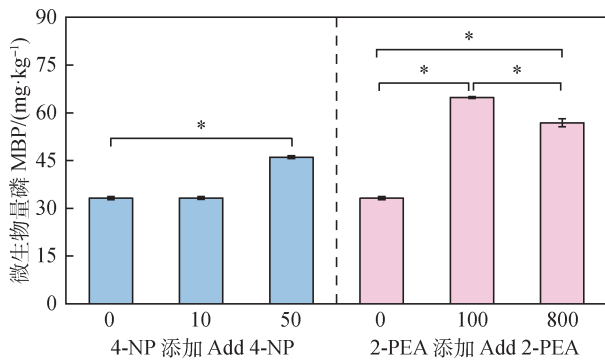


图4 大狼毒化感物质添加对土壤MBP含量的影响

Fig. 4 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil MBP content

2.1.5 对土壤无机磷组分含量的影响 与CK相

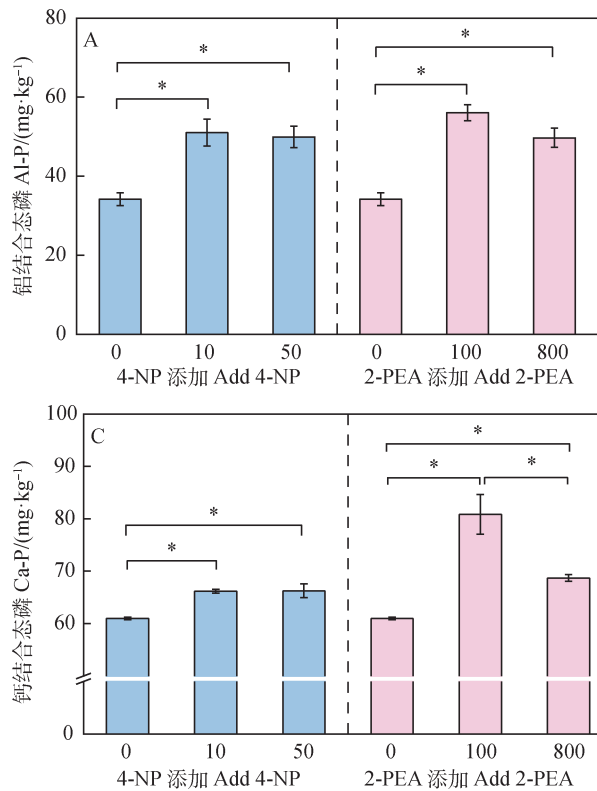
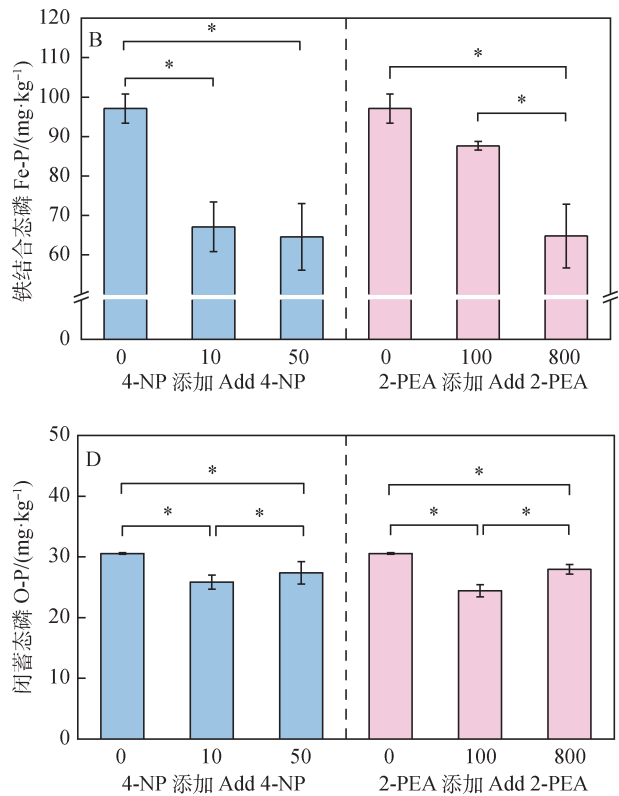


图5 大狼毒化感物质添加对土壤无机磷组分含量的影响

Fig. 5 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on the content of soil inorganic phosphorus fractions

2.1.6 对土壤有机磷组分含量的影响 与CK相比, 4-NP₁₀处理对土壤活性有机磷(Labile organic phosphorus, LOP)、中等活性有机磷(Medium labile organic phosphorus, MLOP)、高稳性有机磷(Highly stable organic phosphorus, HSOP)含量无显著影响, 显著降低土壤中稳性有机磷(Medium stabilizing organic phosphorus, MSOP)含量($P < 0.05$)。4-NP₅₀处理对土壤LOP含量无显著影响, 显著降低了MSOP和HSOP含量, 增加了MLOP含量($P < 0.05$)。2-PEA₁₀₀添加对土壤LOP含量无显著影响, 但显著增

比, 4-NP₁₀, 4-NP₅₀, 2-PEA₁₀₀, 2-PEA₈₀₀添加显著增加了土壤铝结合态磷(Aluminum-bound phosphorus, Al-P)和钙结合态磷(Calcium-bound phosphorus, Ca-P)含量, 显著降低了铁结合态磷(Ferrum-bound phosphorus, Fe-P)和闭蓄态磷(Occluded phosphorus, O-P)含量($P < 0.05$)。具体为: 与CK相比, 4-NP₁₀, 4-NP₅₀, 2-PEA₁₀₀, 2-PEA₈₀₀处理土壤Al-P含量分别增加了49.26%, 46.09%, 64.03%和45.44%, Ca-P含量分别增加了8.56%, 8.69%, 32.59%和12.71%, Fe-P含量分别下降了30.88%, 33.52%, 9.74%和21.72%, O-P含量分别下降了15.40%, 10.39%, 20.15%和8.60%(图5)。



加了MLOP含量, 降低了MSOP和HSOP含量($P < 0.05$)。2-PEA₈₀₀添加显著增加了土壤LOP和MLOP含量, 降低了MSOP和HSOP含量($P < 0.05$)(图6)。

2.2 大狼毒化感物质对山地草甸土壤磷转化关键酶活性的影响

2.2.1 对土壤酸性磷酸酶活性的影响 与CK相比, 化感物质4-NP₁₀, 2-PEA₁₀₀处理对山地草甸土壤酸性磷酸酶活性无显著影响, 4-NP₅₀处理下土壤酸性磷酸酶活性显著下降了6.79%($P < 0.05$), 而

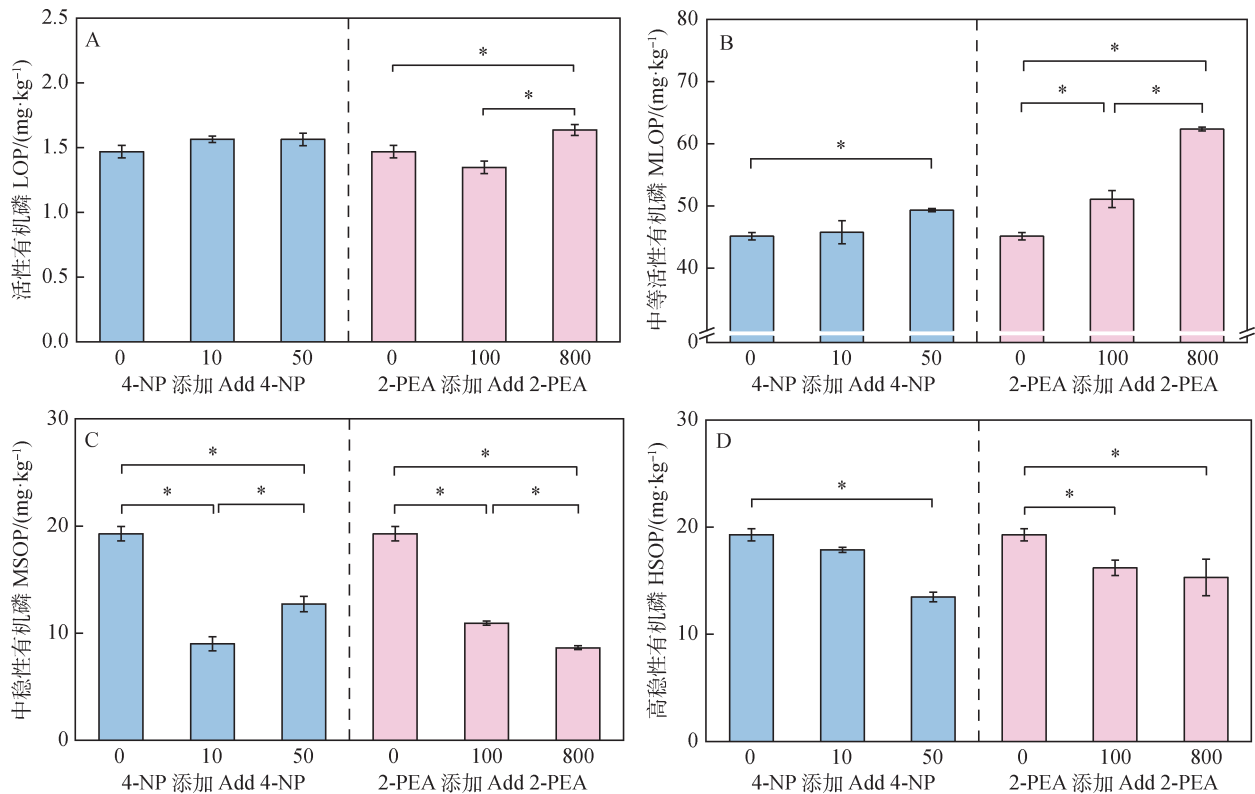


图6 大狼毒化感物质添加对土壤有机磷组分含量的影响

Fig. 6 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on the content of soil organic phosphorus fractions

2-PEA₈₀₀的添加则使山地草甸土壤酸性磷酸酶活性显著提高了2.65% ($P<0.05$) (图7)。

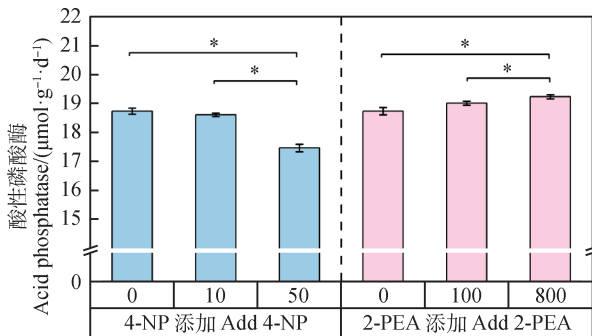


图7 大狼毒化感物质添加对土壤酸性磷酸酶活性的影响

Fig. 7 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil acid phosphatase activity

2.2.2 对土壤碱性磷酸酶活性的影响 与CK相比,4-NP₁₀处理显著提高了山地草甸土壤碱性磷酸酶活性 ($P<0.05$),4-NP₅₀显著降低了土壤碱性磷酸酶活性 ($P<0.05$),降低比例为7.16%;2-PEA₁₀₀,2-PEA₈₀₀处理均显著降低了土壤碱性磷酸酶活性 ($P<0.05$),降低比例分别为3.02%,6.66% (图8)。

2.2.3 对土壤植酸酶活性的影响 与CK相比,化感物质4-NP和2-PEA的添加显著提高了山地草甸

土壤植酸酶活性 ($P<0.05$)。4-NP₁₀,4-NP₅₀处理下土壤植酸酶活性分别提高了4.04%和13.58%;2-PEA₁₀₀,2-PEA₈₀₀处理下土壤植酸酶活性分别提高了12.76%和8.62% (图9)。

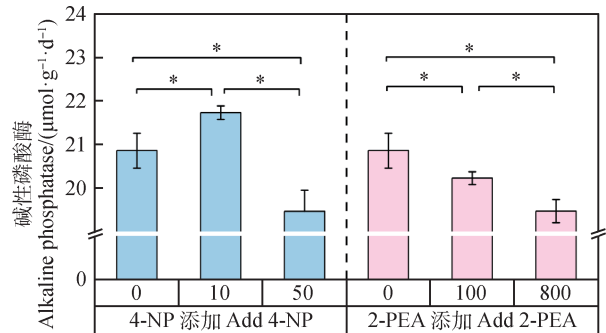


图8 大狼毒化感物质添加对土壤碱性磷酸酶活性的影响

Fig. 8 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil alkaline phosphatase activity

2.2.4 对土壤磷酸二酯酶活性的影响 与CK相比,4-NP₁₀,4-NP₅₀处理对土壤磷酸二酯酶活性无显著影响 (图A)。2-PEA₁₀₀处理对土壤磷酸二酯酶活性无显著影响,2-PEA₈₀₀处理显著提高了山地草甸土壤磷酸二酯酶活性 ($P<0.05$),提高比例为22.44% (图10)。

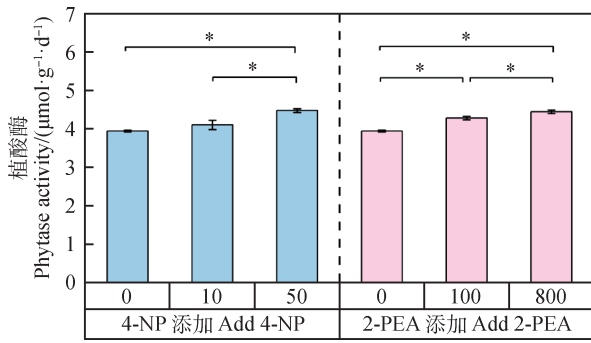


图9 大狼毒化感物质添加对土壤植酸酶活性的影响

Fig. 9 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil phytase activity

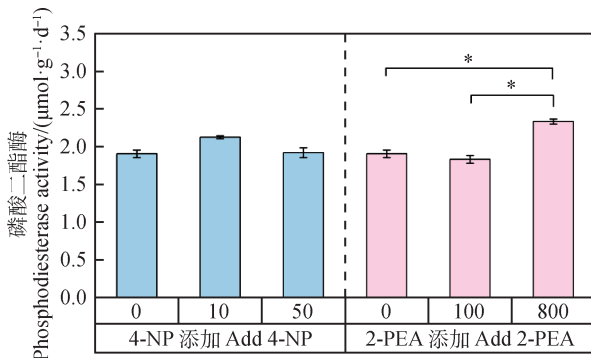


图10 大狼毒化感物质添加对土壤磷酸二酯酶活性的影响

Fig. 10 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil phosphodiesterase activity

2.3 大狼毒化感物质添加对山地草甸土壤磷转化微生物数量的影响

2.3.1 对土壤细菌数量的影响 化感物质4-NP和2-PEA的添加显著增加了山地草甸土壤细菌数量($P < 0.05$),增加幅度与化感物质浓度呈正相关。与CK相比,4-NP₁₀,4-NP₅₀,2-PEA₁₀₀,2-PEA₈₀₀处理土壤的细菌数量分别提高48.72%,69.23%,85.90%,124.36%。表明化感物质4-NP,2-PEA的添加促进了土壤细菌群落的增殖(图11)。

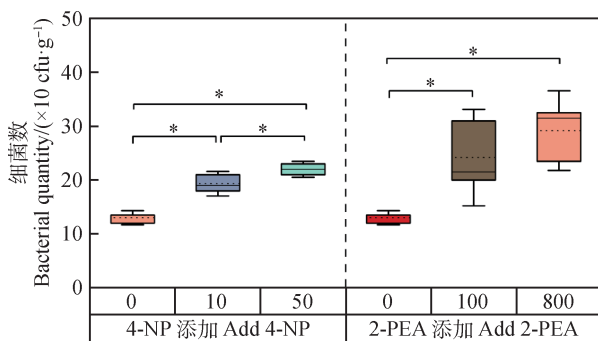


图11 大狼毒化感物质添加对土壤细菌数量的影响

Fig. 11 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil bacterial quantity

2.3.2 对土壤真菌数量的影响 化感物质4-NP,2-PEA的添加对山地草甸土壤真菌数量无显著影响,仅4-NP₅₀处理土壤真菌数量有一定的增加,其他3个处理土壤真菌数量下降,但所有处理真菌数量与CK相比差异均不显著(图12)。

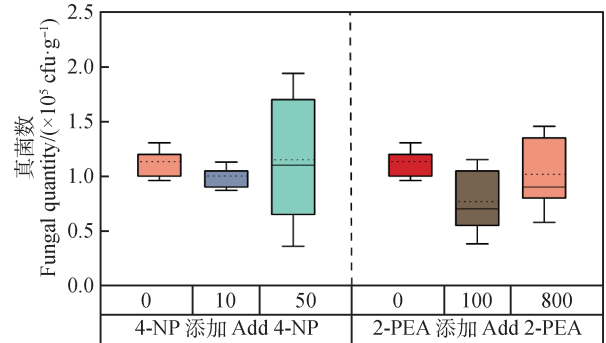


图12 大狼毒化感物质添加对土壤真菌数量的影响

Fig. 12 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil fungi quantity

2.3.3 对土壤放线菌数量的影响 与CK相比,4-NP₅₀,2-PEA₁₀₀处理土壤放线菌数量无显著变化,4-NP₁₀,2-PEA₈₀₀处理显著增加了山地草甸土壤放线菌数量($P < 0.05$),2个处理土壤放线菌数量分别增加了77.78%,100.00%(图13)。

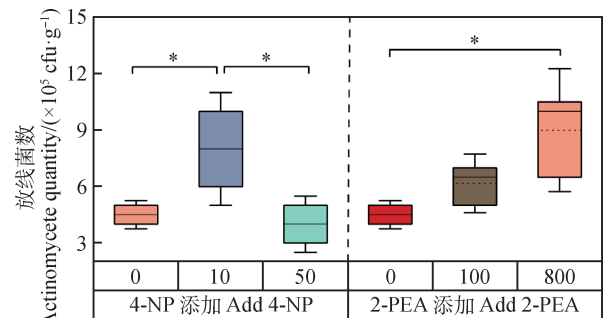


图13 大狼毒化感物质添加对土壤放线菌数量的影响

Fig. 13 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil actinomycete quantity

2.3.4 对土壤无机磷细菌数量的影响 与CK相比,4-NP添加对山地草甸土壤无机磷细菌数量无显著影响。2-PEA的添加显著增加了土壤无机磷细菌数量($P < 0.05$),增加幅度与化感物质浓度呈正相关。2-PEA₁₀₀和2-PEA₈₀₀处理土壤的无机磷细菌数量分别提高50.68%,78.08%(图14)。

2.3.5 对土壤有机磷细菌数量的影响 与CK相比,4-NP添加对山地草甸土壤有机磷细菌数量无显著影响,2-PEA添加显著增加了山地草甸土壤有机磷细菌数量($P < 0.05$),增加幅度与化感物质浓度

呈正相关。2-PEA₁₀₀, 2-PEA₈₀₀处理土壤有机磷细菌数量分别提高66.67%和100.00%(图15)。

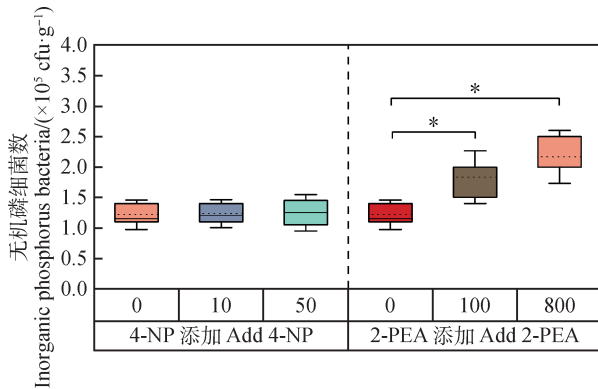


图14 大狼毒化感物质添加对土壤无机磷细菌数量的影响

Fig. 14 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil inorganic phosphorus bacteria quantity

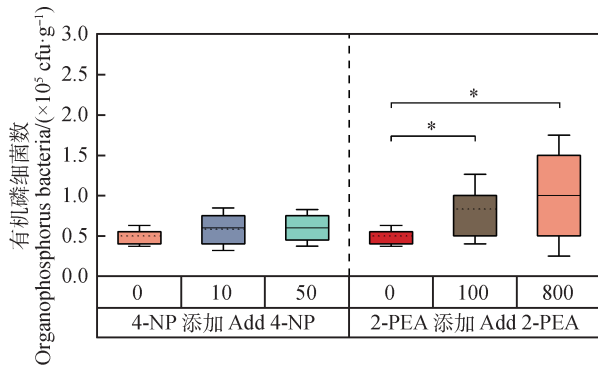


图15 大狼毒化感物质添加对土壤有机磷细菌数量的影响

Fig. 15 Effects of *E. jolkinii* Boiss allelopathic substances addition on soil organophosphorus bacterial quantity

3 讨论

多项研究表明^[25-27]植物分泌的化感物质会引起土壤的物理、化学特性发生改变。本研究结果显示,大狼毒化感物质4-NP和2-PEA添加显著改变了土壤TP, AP, MBP, Al-P, Fe-P, Ca-P, O-P, MLOP, MSOP, HSOP含量和pH值。可以看出,经过75 d的连续添加培养,山地草甸的土壤理化性质已发生显著变化,尤其以MBP、无机磷组分含量和pH值变化最为显著。其中,4-NP₁₀, 4-NP₅₀, 2-PEA₁₀₀和2-PEA₈₀₀处理均显著降低了土壤的pH值,这与Uddin等^[28]、张西凤等^[29]研究发现洋蓟(*Cynara cardunculus*)、小飞蓬(*Conyza canadensis*)入侵会导致根际土壤pH值下降的结果类似。本研究4-NP和2-PEA添加土壤pH值显著下降的原因是:4-NP呈弱酸性且性质稳定,导致土壤pH值下降^[30];2-PEA在土壤中容易发生连续的氨解反应,使土壤中氢离

子相对增加,进一步加剧土壤酸化^[31]。

在化感物质对土壤磷素转化的研究中,已有研究表明植物根系分泌的化感物质——有机酸的添加对土壤磷的活化具有显著效果,它可以活化土壤中难以利用的磷素,这种效果主要通过酸溶解作用、络合作用和竞争吸附等机制实现^[32]。本研究结果显示,4-NP和2-PEA添加增加了山地草甸土壤MBP, Al-P, Ca-P, MLOP含量,降低了Fe-P, O-P, MSOP, HSOP含量,分析原因可能是4-NP和2-PEA具有一定的络合能力,添加后使土壤pH值下降,4-NP和2-PEA与土壤中的铝、钙等金属离子形成可溶性络合物,从而促进这些金属离子从难溶性磷化合物中解离出来,使Al-P, Ca-P含量增加。4-NP和2-PEA添加导致Fe-P含量降低的原因可能是它们与土壤中的铁离子形成难溶性的络合物,使原本与Fe³⁺结合的Fe-P中的磷被固定在这些络合物中,因此Fe-P含量降低。另一方面,4-NP和2-PEA的添加会影响土壤微生物的活性和群落结构,促进微生物的生长,这些微生物能够通过其代谢产物进一步促进磷的转化和释放,增加MLOP的含量。此外,4-NP和2-PEA的添加可能促进了有机磷的转化过程,使得原本处于较高稳定性形态的有机磷MSOP, HSOP转化为活性较低或更易被植物利用的形态,从而增加了MLOP含量,降低了MSOP, HSOP的含量^[33]。MBP含量显著增加的主要原因是4-NP和2-PEA能够为土壤微生物提供碳源和能量,同时刺激微生物对其分解和利用,从而促进MBP在土壤中的积累^[34]。

植物分泌的化感物质会通过多种机制改变土壤酶的活性,间接对土壤的养分产生影响。大狼毒通过根系释放化感物质入侵天然草地,改变土壤理化性质和酶活性,进而影响土壤有机质分解、养分转化和循环^[35]。本研究中,4-NP添加显著提高了山地草甸土壤植酸酶活性,降低了酸性磷酸酶活性;2-PEA添加显著提高了山地草甸土壤酸性磷酸酶、植酸酶、磷酸二酯酶活性,降低了碱性磷酸酶的活性,表明4-NP和2-PEA能够影响土壤磷转化相关酶的活性,但这种影响可能因化感物质的种类不同而有所差异。

毒杂草能够通过分泌化感物质来有选择性地改变土壤中微生物群落的结构,从而影响土壤养分的积累和转化过程^[36]。本研究结果显示,添加4-NP和2-PEA显著提高了土壤中细菌和放线菌的

数量,但对真菌数量的影响较小。这一结果与刘苹等^[37]的研究结果基本相反,后者发现外源添加3种不同酚酸会降低各生育期花生根际土壤细菌和放线菌的数量,增加真菌的数量。分析原因可能是:细菌、放线菌和真菌在生理代谢方面存在差异,细菌和放线菌的代谢速率通常较快,对环境变化的响应也较快,4-NP和2-PEA的添加为其提供了充足的碳源和氮源,促进其代谢活动和生长繁殖^[38];而真菌的代谢速率相对较慢且较为敏感,在碳、氮源充足的情况下,化感物质反而限制了真菌的生长和繁殖。有研究^[39]通过液体摇床发酵试验发现添加生物炭可以促进有机酸的分泌,为微生物提供了更多的碳源和结构复杂的微环境,进而提高溶磷细菌的溶磷效率。宋振等^[40]研究表明入侵植物黄顶菊显著增加了根际土壤中有机磷细菌、无机磷细菌的数量。本研究中,2-PEA添加显著增加了土壤无机磷细菌和有机磷细菌的数量,说明大狼毒化感物质2-PEA能够有效促进其繁殖进而增强土壤的转化形成反馈作用。

尽管本研究系统揭示了大狼毒主要化感物质4-NP和2-PEA对山地草甸土壤磷转化的直接影响,但仍存在一定局限性。本研究采用单一物质添加的方式,旨在明确其对土壤磷转化过程的直接作用机制,然而在自然环境中,大狼毒通常通过根系分泌、茎叶淋溶、残体分解等多种途径同时释放多种化感物质,这些物质之间可能产生协同、拮抗或叠加效应,共同调控土壤磷的转化过程。例如酚酸类物质导致的土壤pH值下降,可能会改变2-PEA(生物碱类)的离子形态与生物活性,从而共同增强对某些磷酸酶(如酸性磷酸酶)的激活或抑制能力,其强度可能远超单一物质的作用^[27]。此外,一种物质可能先改变微生物群落结构,为另一种物质的作用创造更有利的微环境,从而协同调控磷的转化效率^[12]。因此,单一物质处理虽有助于厘清其独立作用,但未能全面反映多物质共存条件下的复合生态效应。未来研究应考虑设置复合添加处理,进一步揭示多物质交互作用对土壤磷循环及微生物功能的综合影响,从而更贴近自然入侵过程中的真实生态过程。

4 结论

4-NP添加增加了山地草甸土壤SOC,MBP,Al-P和Ca-P含量,降低了酸性磷酸酶活性,提高了植酸酶活性。2-PEA添加增加了土壤MBP,Al-P,

Ca-P,LOP和MLOP含量,促进了无机磷细菌和有机磷细菌繁殖,提高了酸性磷酸酶、植酸酶和磷酸二酯酶活性,降低了碱性磷酸酶活性;4-NP和2-PEA添加均降低了土壤pH值及Fe-P和O-P含量,促进了细菌和放线菌繁殖。

参考文献

- [1] 尹海燕,初晓辉,单贵莲,等. 不同大狼毒覆盖度退化亚高山草甸群落结构及物种多样性研究[J]. 云南农业大学学报(自然科学),2019,34(3):473-478
YIN H Y, CHU X H, SHAN G L, et al. Study on the Community structure and species diversity of degraded subalpine meadow with different coverages of *Euphorbia jolkini* [J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2019, 34(3): 473-478
- [2] GUO L Z, LI J H, HE W, et al. High nutrient uptake efficiency and high water use efficiency facilitate the spread of *Stellera chamaejasme* L. in degraded grasslands [J]. BMC Ecology, 2019, 19(1): 50
- [3] 王猛,袁福锦,吴文荣,等. 封育对滇西北亚高山草甸群落及土壤的影响[J]. 草原与草坪,2017,37(2):69-74
WANG M, YUAN F J, WU W R, et al. Primary study on effects of enclosing on community and soil of degraded subalpine meadow in northwestern Yunnan Province [J]. Grassland and Turf, 2017, 37(2): 69-74
- [4] FENG A Q, LI Y Z, GAO J B, et al. The determinants of streamflow variability and variation in Three-River Source of China: climate change or ecological restoration? [J]. Environmental Earth Sciences, 2017, 76(20): 696
- [5] 李嘉懿,初晓辉,尹海燕,等. 大狼毒型亚高山草甸植被演替对围封的响应[J]. 中国草地学报,2021,43(6):10-16
LI J Y, CHU X H, YIN H Y, et al. Response of vegetation succession to enclosure in *Euphorbia jolkini* subalpine meadow [J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(6): 10-16
- [6] 席赠濮,杜凡,汪健. 香格里拉县亚高山退化草甸植物群落学研究[J]. 西南林业大学学报,2013,33(2):75-80
XI Z P, DU F, WANG J. A phytosociological study on subalpine degraded meadow in shangri-La county [J]. Journal of Southwest Forestry University, 2013, 33(2): 75-80
- [7] 朱丽珍,田英,王俊,等. 植物化感作用及其在草地农业生态系统中的应用[J]. 土壤与作物,2021,10(1):1-17
ZHU L Z, TIAN Y, WANG J, et al. Plant allelopathy and its application in grassland agroecosystem [J]. Soils and Crops, 2021, 10(1): 1-17
- [8] 平晓燕,王铁梅. 植物化感作用的生态学意义及在草地生态系统中的研究进展[J]. 草业学报,2018,27(8):175-184
PING X Y, WANG T M. Ecological significance of plant allelopathy and progress in allelopathy research in grassland ecosystems [J]. Acta Prataculturae Sinica, 2018, 27(8): 175-184
- [9] 单贵莲,尹海燕,刘洋,等. 大狼毒种群扩散增殖对滇西北亚

- 高山草甸土壤养分及微生物特性的影响[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021, 36(3): 494-499
- SHAN G L, YIN H Y, LIU Y, et al. Effect of *Euphorbia jolkini* boiss proliferation on the soil nutrients and microbial characteristics of subalpine meadow in northwest Yunnan[J]. Journal of Yunnan Agricultural University (Natural Science), 2021, 36(3): 494-499
- [10] 李彦飞, 初晓辉, 李嘉懿, 等. 大狼毒对紫花苜蓿种子萌发及幼苗生长的化感效应研究[J]. 草地学报, 2022, 30(2): 394-402
- LI Y F, CHU X H, LI J Y, et al. Allelopathic effects of *Euphorbia jolkini* on seed germination and seedling growth of alfalfa[J]. Acta Agrestia Sinica, 2022, 30(2): 394-402
- [11] ZHAO Y H, MEMMOTT J, VAUGHAN I P, et al. The impact of a native dominant plant, *Euphorbia jolkini*, on plant-flower visitor networks and pollen deposition on stigmas of co-flowering species in subalpine meadows of Shangri-La, SW China[J]. Journal of Ecology, 2021, 109(5): 2107-2120
- [12] 段蕊, 罗钦, 肖雪, 等. 大狼毒主要化感物质对山地草甸土壤微生物多样性的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(1): 10-20
- DUAN R, LUO Q, XIAO X, et al. Effects of main allelopathic substances of *Euphorbia jolkini* on species diversity of soil microorganisms in montane meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(1): 10-20
- [13] 罗钦, 马祖艳, 牛琼梅, 等. 大狼毒不同部位浸提液对多年生黑麦草幼苗生长的化感效应及生理机制[J]. 草地学报, 2023, 31(10): 3212-3219
- LUO Q, MA Z Y, NIU Q M, et al. Allelopathic effect and physiological mechanism of extracts from different parts of *Euphorbia jolkini* on growth of *Loium perenne* seedlings[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(10): 3212-3219
- [14] 牛琼梅, 单贵莲, 罗钦, 等. 毒害草入侵扩散对滇西北高山草甸土壤微生物多样性的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(7): 1996-2004
- NIU Q M, SHAN G L, LUO Q, et al. Effect of invasion and diffusion of poisonous weeds on soil microbial diversity in subalpine meadow in northwest Yunnan[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(7): 1996-2004
- [15] 王继才, 罗钦, 初晓辉, 等. 大狼毒主要化感物质对亚高山草甸土壤氮转化的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(4): 1137-1144
- WANG J C, LUO Q, CHU X H, et al. Effects of main allelochemicals from *Euphorbia jolkini* boiss on soil nitrogen transformation of subalpine meadow[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(4): 1137-1144
- [16] 储成才, 王毅, 王二涛. 植物氮磷钾养分高效利用研究现状与展望[J]. 中国科学: 生命科学, 2021, 51(10): 1415-1423
- CHU C C, WANG Y, WANG E T. Improving the utilization efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium: current situation and future perspectives[J]. Scientia Sinica Vitae, 2021, 51(10): 1415-1423
- [17] 牛琼梅. 滇西北毒害草入侵亚高山草甸植被-凋落物-土壤性状协同变化研究[D]. 昆明: 云南农业大学, 2024: 20-22
- NIU Q M. Study on the synergistic change of vegetation-litter-soil characters in subalpine meadow invaded by poisonous grass in northwest Yunnan[D]. Kunming: Yunnan Agricultural University, 2024: 20-22
- [18] 杨欣, 肖雪, 牛琼梅, 等. 大狼毒入侵对香格里拉山地草甸土壤微生物特征的影响[J]. 草地学报, 2025, 33(3): 778-788
- YANG X, XIAO X, NIU Q M, et al. Effects of *Euphorbia jolkini* invasion on soil microbial characteristics in Shangri-La mountain meadows[J]. Acta Agrestia Sinica, 2025, 33(3): 778-788
- [19] XIAO X, MA Z Y, ZHOU K, et al. Elucidating the underlying allelopathy effects of *Euphorbia jolkini* on *Arundinella hookeri* using metabolomics profiling[J]. Plants, 2025, 14(1): 123
- [20] 段蕊, 罗钦, 肖雪, 等. 大狼毒次生代谢物分析及主要物质化感效应研究[J]. 草地学报, 2024, 32(8): 2599-2606
- DUAN R, LUO Q, XIAO X, et al. Analysis and study of secondary metabolites and allelopathic effects of main substances of *Euphorbia jolkini* [J]. Acta Agrestia Sinica, 2024, 32(8): 2599-2606
- [21] 高雪峰, 韩国栋. 短花针茅根系分泌物对荒漠草原土壤细菌群落及土壤养分的影响[J]. 中国草地学报, 2021, 43(6): 76-84
- GAO X F, HAN G D. Effects of *Stipa breviflora* root exudates on soil bacterial community and soil nutrients in desert steppe[J]. Chinese Journal of Grassland, 2021, 43(6): 76-84
- [22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25-76
- BAO S D. Soil Agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25-76
- [23] BOWMAN R A, COLE C V. An exploratory method for fractionation of organic phosphorus from grassland soils[J]. Soil Science, 1978, 125(2): 95-101
- [24] 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: 31-50
- LIN X G. Principles and methods of soil microbiology research [M]. Beijing: Higher Education Press, 2010: 31-50
- [25] LI X J, XIA Z C, KONG C H, et al. Mobility and microbial activity of allelochemicals in soil [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2013, 61(21): 5072-5079
- [26] 徐香茹, 董郁, 付为国. 酚酸类化感物质对根际土壤养分供应能力的影响[J]. 生态与农村环境学报, 2024, 40(10): 1358-1365
- XU X R, DONG Y, FU W G. Effect of phenolic acid allelochemicals on nutrient supply capacity of rhizosphere soil [J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(10): 1358-1365
- [27] REVILLINI D, DAVID A S, REYES A L, et al. Allelopathy-selected microbiomes mitigate chemical inhibition of plant performance[J]. New Phytologist, 2023, 240(5): 2007-2019
- [28] UDDIN M N, ASAEDA T, SHAMPA S H, et al. Allelopathy and its coevolutionary implications between native and non-native neighbors of invasive *Cynara cardunculus* L [J]. Ecology and Evolution, 2020, 10(14): 7463-7475
- [29] 张西凤, 崔东, 刘海军, 等. 小飞蓬入侵对伊犁河谷草原土壤

- 养分及活性有机碳组分的影响[J]. 环境化学, 2020, 39(7): 1894-1903
- ZHANG X F, CUI D, LIU H J, et al. Effects of *Conyza canadensis* invasion on soil nutrients and active organic carbon components in Yili River Valley grassland[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(7): 1894-1903
- [30] 鲁崇贤, 杜洪光. 有机化学[M]. 2版. 北京: 科学出版社, 2009: 481-525
- LU C X, DU H G. Organic chemistry[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2009: 481-525
- [31] 王永壮, 陈欣, 史奕, 等. 低分子量有机酸对土壤磷活化及其机制研究进展[J]. 生态学杂志, 2018, 37(7): 2189-2198
- WANG Y Z, CHEN X, SHI Y, et al. Review on the effects of low-molecular-weight organic acids on soil phosphorus activation and mechanisms[J]. Chinese Journal of Ecology, 2018, 37(7): 2189-2198
- [32] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 长期不同供磷水平下南方黄泥田生产力及磷组分特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2020, 28(7): 960-968
- WANG F, LI Q H, LIN C, et al. Yellow-mud paddy soil productivity and phosphorus fractions under long-term different phosphorus supply levels in Southern China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2020, 28(7): 960-968
- [33] 李军, 袁亮, 赵秉强, 等. 磷肥中腐植酸添加比例对玉米产量、磷素吸收及土壤速效磷含量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(3): 641-648
- LI J, YUAN L, ZHAO B Q, et al. Effect of adding humic acid to phosphorous fertilizer on maize yield and phosphorus uptake and soil available phosphorus content [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2017, 23(3): 641-648
- [34] CHENG J N, JIN H, ZHANG J L, et al. Effects of allelochemicals, soil enzyme activities, and environmental factors on rhizosphere soil microbial community of *Stellera chamaejasme* L. along a growth-coverage gradient [J]. Microorganisms, 2022, 10(1): 158
- [35] NUNEZ-MIR G C, MCCARY M A. Invasive plants and their root traits are linked to the homogenization of soil microbial communities across the United States [J]. PNAS, 2024, 121(44): e2418632121
- [36] ZHAO M X, YANG Y F, ZHANG H, et al. Asymmetric succession in soil microbial communities enhances the competitive advantage of invasive alien plants [J]. Microbiome, 2024, 12(1): 265
- [37] 刘苹, 赵海军, 李庆凯, 等. 三种酚酸类化感物质对花生根际土壤微生物及产量的影响[J]. 中国油料作物学报, 2018, 40(1): 101-109
- LIU P, ZHAO H J, LI Q K, et al. Effects of three phenolic acid allelochemicals on rhizosphere soil microbes and pod yield of peanut (*Arachis hypogaea* L.) [J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2018, 40(1): 101-109
- [38] EL ZAHAR HAICHAR F, SANTAELLA C, HEULIN T, et al. Root exudates mediated interactions belowground [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2014, 77: 69-80
- [39] DE OLIVEIRA MENDES G, ZAFRA D L, VASSILEV N B, et al. Biochar enhances *Aspergillus niger* rock phosphate solubilization by increasing organic acid production and alleviating fluoride toxicity [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2014, 80(10): 3081-3085
- [40] 宋振, 纪巧凤, 付卫东, 等. 黄顶菊入侵对土壤中主要功能细菌的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27(8): 2636-2644
- SONG Z, JI Q F, FU W D, et al. Effects of *Flaveria bidentis* invasion on the diversity of functional bacteria in rhizosphere soil [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2016, 27(8): 2636-2644

(责任编辑 闵芝智)