

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.02.006

滇中亚高山不同森林土壤酶活性对模拟 N 沉降的响应

郑兴蕊, 王克勤, 宋娅丽*, 张转敏, 张雨鉴, 潘 禹

(西南林业大学生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

摘要: [目的] 研究不同森林类型中模拟 N 沉降对土壤酶活性的影响, 旨在为 N 素对区域森林土壤酶活性及土壤活动相关研究提供理论依据。[方法] 以滇中磨盘山典型森林云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 林、高山栎 (*Quercus semecarpifolia* Smith) 林、华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 林和常绿阔叶 (Evergreen broad-leaf) 林为研究对象, 于 2018 年 1 月—2018 年 12 月设置: 对照 (CK, $0 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、低 N (LN, $5 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)、中 N (MN, $15 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 和高 N (HN, $30 \text{ g N} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) 4 种 N 处理, 测定不同施 N 水平 4 种林地 0~5、5~10 和 10~20 cm 土层蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶活性。[结果] 表明: 土壤深度对 4 种森林类型中 8 种土壤酶活性的影响均表现为 10~20 cm 土层土壤酶活性低于 5~10 cm 土层, 降幅最高达 76.8%, 常绿阔叶林与云南松林土壤过氧化氢酶和高山栎林与云南松林土壤多酚氧化酶活性则在 0~5 cm 土层受到抑制, 活性最低时仅为 5~10 cm 土层活性的 15.4%; 施 N 水平对土壤酶活性影响较为显著, LN 显著抑制了高山栎林土壤蔗糖酶与淀粉酶活性; 各 N 处理对脲酶、蛋白酶无显著影响; 除常绿阔叶林外, LN 处理显著提高了 0~10 cm 土层天门冬酰胺酶和酸性磷酸酶活性, 各 N 处理抑制了华山松林土壤过氧化氢酶活性和各林分土壤多酚氧化酶活性, 促进了高山栎林、云南松林土壤过氧化氢酶活性; 森林类型对土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶影响显著 ($P < 0.01$)。[结论] 森林类型和土壤深度是影响 N 沉降下土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性变化差异的重要因素; 土壤多酚氧化酶对施 N 水平反应敏感, 对森林类型反应较不敏感; 8 种土壤酶中, 天门冬酰胺酶对不同土壤深度、不同施 N 水平和不同森林类型三者交互作用的响应最为敏感。

关键词: 土壤酶; 模拟 N 沉降; 林分; 滇中亚高山

中图分类号: S718.5

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2021)02-0050-13

化石燃料与化学 N 肥大量施用引起的 N 沉降现象已成为不容忽视的全球变化问题之一^[1]。N 沉降的急剧增加, 直接威胁着水域生态系统和陆地生态系统的平衡^[2], 而森林生态系统作为陆地生态系统的主体, 以其复杂的组成与结构, 不可避免地受全球气候变化的影响。森林土壤作为森林生态系统的主要 C 库、N 库^[3], 约将 N 沉降中 2/3 固定在土

壤有机质中^[4]。其中, 土壤酶作为森林土壤生态系统的组成部分, 其活性高低在很大程度上反映了物质循环的快慢^[5], 并在一定程度上反映了森林土壤状况, 包括有机质的分解能力和简单物质的再合成能力^[6]。为研究 N 添加对土壤酶活性的影响, 可将其分为两大类: (1) 负责获得 C、N、P 以维持初级代谢的水解酶, 包括蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶、

收稿日期: 2020-03-27 修回日期: 2020-08-05

基金项目: 云南省教育厅研究生科学研究基金项目 (2019Y0134)、云南省高校优势特色重点学科 (生态学) 建设项目 (050005113111)、国家林草局林业科技创新平台运行项目“云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站” (2019132161) 资助

* 通讯作者: 宋娅丽, 博士, 主要研究方向: 生态系统功能, E-mail: songyali19851205@sina.com

β -葡萄糖苷酶等; (2) 负责降解复杂化合物以提供营养物质的氧化还原酶, 包括过氧化氢酶、过氧化物酶和酚氧化酶等^[7]。这些土壤酶可能对N添加有不同的反应, 而研究更多种类的土壤酶有助于我们更全面的了解N添加后土壤有机质的周转过程。

N沉降对不同森林生态系统下土壤酶活性存在促进、抑制和无影响3种影响, 主要原因在于森林中的土壤理化性质受气候、林地类型、林龄及模拟N沉降时间长短等多个因素共同作用^[8-10]。目前关于N沉降下土壤酶活性的研究, 土壤酶的种类较少, 且多集中在同一林型^[11], 如张艺等^[12]对北京市辽东栎 (*Quercus mongolica* Fisch.ex Ledeb.) 施N后, N沉降显著促进了土壤脲酶、酸性磷酸酶活性, 对土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶活性无显著差异; 李吉玫等^[13]对天山云杉林 (*Picea schrenkiana* Fisch.et Mey.) 进行模拟施N, 结果表明N沉降显著抑制了过氧化物酶和多酚氧化酶活性, 而对土壤脲酶活性有较小促进作用; Cusack等^[7]对实验森林的研究表明, N沉降可提高热带山地森林土壤多酚氧化酶和过氧化物酶活性。但不同土壤酶活性对外源N添加如何响应, 哪种酶活性对不同施N浓度的响应最为敏感仍具有不确定性。

滇中亚高山区域位于我国云贵高原、青藏高原和横断山地三大自然地理区域相结合的部位, 植被以半湿性常绿阔叶林为主^[14]。本研究选取国内外常用于研究模拟N沉降下土壤活动的8种代表性土壤酶^[11-13, 15-18], 以该地区不同森林生态系统云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 林、高山栎 (*Quercus semecarpifolia* Smith) 林、华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 林和常绿阔叶 (Evergreen broad-leaf) 林为研究对象, 分析林下不同土壤酶活性对不同N沉降的响应差异, 旨在为研究N沉降对区域森林生态系统的土壤生态学过程及维护土壤生态系统的稳定性提供理论依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

在云南省新平县磨盘山森林生态系统国家定位观测研究站 (23°46'18"~23°54'34" N, 101°16'06"~101°16'12" E) 设置试验样地。该地区属于中亚热带气候, 年降水量1 050 mm, 年平均气温15℃, 极端最高气温为33.0℃, 极端最低气温为-2.2℃。磨盘山海拔1 260.0~2 614.4 m, 以第三纪古红土发育的山地红壤、玄武岩红壤和黄棕壤为主^[19]。该

区植被类型随海拔的升高呈明显的垂直分布特征, 主要分布的森林类型为针叶林 (华山松林、云南松林)、亚热带常绿阔叶林和高山矮林 (高山栎林) 等。

1.2 试验设计

2017年10月, 在研究站内4种典型森林类型 (云南松林、华山松林、常绿阔叶林和高山栎林) 中 (表1), 设置3个20 m×20 m的样地, 在每个样地中随机设置4个3 m×3 m的小样方, 对应4种不同施N浓度, 根据林地实际情况, 将高浓度样地设置在下坡面, 以尽量减小坡面径流泥沙引起的氮素迁移对土壤酶活性的影响。样方之间距离大于1 m, 防止相互干扰。

本实验参考美国Harvard Forest模拟氮沉降和华西雨屏区模拟氮沉降等试验中的实验设置^[14-17], 结合我国西南地区, 如四川盆地西缘^[20]、昆明东郊^[21]及西双版纳^[22]等地的年N沉降量水平, 以推测该地区未来可能的N沉降趋势。本实验设定N沉降处理分4个水平: 对照 (CK, 0 g N·m⁻²·a⁻¹)、低N (LN, 5 g N·m⁻²·a⁻¹)、中N (MN, 15 g N·m⁻²·a⁻¹)、高N (HN, 30 g N·m⁻²·a⁻¹), 每个水平3个重复。将年施用量均分成12份, 从2018年1月初开始, 每月用不同浓度N对各样方进行定量模拟N沉降处理。方法为在750 mL去离子水中溶解各N浓度水平所需NH₄NO₃ (相当于全年新增降水1.0 mm), 用喷雾器在3个水平样方中来回均匀喷洒, 为减少水分增加对土壤环境与土壤酶活性的影响, 对照组同时段喷洒750 mL去离子水。

1.3 样品采集、处理与测定

于施N一年后 (2019年1月) 采集0~5、5~10和10~20 cm土壤样品, 每个样方用随机数字定位法随机取3钻后混合, 带回实验室, 过2 mm筛, 置于无菌袋中。用四分法将样品均分, 分别进行保存: 一份室温自然风干保存, 用于天门冬酰胺酶、脲酶、蔗糖酶的测定; 一份冷藏于4℃冰箱, 用于磷酸酶、过氧化氢酶、多酚氧化酶的测定; 另一份冷冻于-40℃冰箱, 用于蛋白酶、淀粉酶的测定。

土壤酶活性的测定: 实验通过自主添加基质进行土壤培养, 测定反应产物和消耗基质量来表示酶活性, 为了排除土壤本身含有的基质成分影响, 每个实验都设置无基质-纯水和无土壤两种对照, 蔗糖酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 淀粉酶活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 脲酶活

表1 4种森林类型立地特征

Table 1 Site characteristics of four forest types

森林类型 Forest type	林分特征 Forest characteristics				
	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average H/m	郁闭度 Canopy density
云南松林 <i>Pinus yunnanensis</i> forest	2 196	13	11.2	9.5	0.8
华山松林 <i>Pinus armandii</i> forest	2 151	19	11.8	10.4	0.7
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	2 229	15	9.1	9	0.9
高山栎林 <i>Quercus semicarpifolia</i> forest	2 287	15	9.9	4.2	0.9

性采用靛酚比色法测定；酸性磷酸酶活性采用磷酸苯二钠比色法测定；过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定；蛋白酶活性采用茚三酮比色法测定；天门冬酰胺酶活性采用扩散法测定；多酚氧化酶采用碘量滴定法测定^[6]。

1.4 数据处理

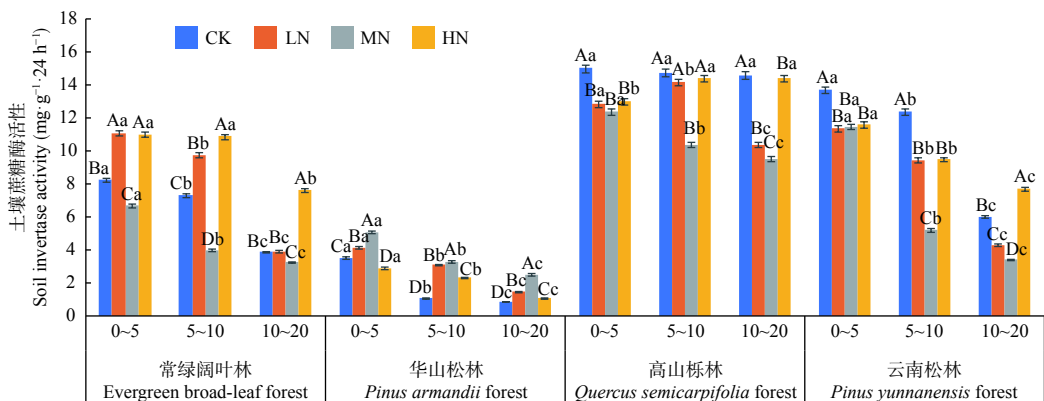
统计数据、绘制图表采用 Microsoft Office Excel 2010。数据分析采用 SPSS 23.0 中，其中，单因素方差分析法 (One-way ANOVA) 用以分析不同林分间、不同土层间及不同 N 沉降处理间土壤酶活性差异特征；多因素方差分析法 (Multivariate ANOVA) 用以分析土壤深度、施 N 水平和森林类型对土壤酶活性的影响。显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施 N 水平 4 种林地各土层土壤酶活性的变化特征

在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下，高山栎林 CK 处理下 0~5 cm 土层蔗糖酶活

性最高 ($15.035 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$)，华山松林 CK 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($0.878 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。常绿阔叶林、华山松林和云南松林下土壤蔗糖酶活性均表现为随土层深度增加逐渐降低 (图 1)，3 种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($12.04 \sim 3.91 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 5~10 cm ($9.14 \sim 2.43 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($5.37 \sim 1.48 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$)，降幅分别在 64.7%~30.5%、75.2%~50.7% 和 70.4%~33.5%，其中华山松林 0~5 cm 土层降幅最高。高山栎林中除 LN 处理下随着土层深度增加呈现先增加后降低的趋势，HN 下随着土层深度增加逐渐增加 (增幅为 10.8%)，其他土层蔗糖酶活性均表现为随土层深度增加逐渐降低。华山松林土壤蔗糖酶活性低于高山栎林 80.0%，变化范围为 $0.878 \sim 13.704 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 24 \text{ h}^{-1}$ ，且存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同施 N 浓度下，常绿阔叶林土壤蔗糖酶活性在 LN 与 HN 下显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)；华山松林表现为先促进，后在 HN 抑制，林下土壤蔗糖酶活性在 LN 与 MN 显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)；高



注：CK：对照 Control；LN：低氮 Low N；MN：中氮 Medium N；HN：高氮 High N。不同大写字母表示同一林型同一土壤层次不同 N 施 N 浓度间差异显著 ($P < 0.05$)；不同小写字母表示同一林型同一 N 施 N 浓度不同土壤层次间差异显著 ($P < 0.05$)。下同。

图1 不同施 N 水平 4 种林地各土层土壤蔗糖酶活性变化

Fig. 1 Changes of soil invertase activities in different soil layers of four forest types under different N deposition

山栎林与云南松林表现为先抑制, 后在 HN 促进, 林下土壤蔗糖酶活性在 LN、MN 处理下显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$)。其中, 高山栎林土壤蔗糖酶活性表现最高, 总体平均值为: 高山栎林 ($13.01 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 云南松林 ($8.85 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($7.31 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 华山松林 ($2.61 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。

从图 2 可以看出, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 云南松林 LN 处理下 0~5 cm 土层淀粉酶活性最高 ($1.437 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 云南松林 MN 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($0.103 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。常绿阔叶林、华山松林、云南松林、高山栎林土壤淀粉酶活性均表现为随土层深度增加逐渐降低, 降幅分别在 66.1%~22.1%、76.8%~21.7%、67.7%~21.5% 和 70.9%~21.9%, 其中华山松林 MN 处理降幅最高, 4 种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($0.91\sim 0.40 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}$ 。

24 h^{-1}) > 5~10 cm ($0.71\sim 0.33 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($0.52\sim 0.22 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同施 N 浓度中, 常绿阔叶林表现为先抑制, 后在 HN 促进, 林下土壤淀粉酶活性在 LN、MN 处理下显著低于 CK 处理 ($P < 0.05$); 华山松林也表现为先抑制, 后促进, 林下土壤淀粉酶活性在 MN 与 HN 处理下显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$); 高山栎林表现为施氮则抑制, 但随着土层深度的增加, HN 处理抑制程度降低, 林下土壤淀粉酶活性在 LN、MN 和 HN 处理下均低于 CK 处理; 云南松林表现为先促进, 后抑制, 林下土壤淀粉酶活性在 LN 处理下显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$)。其中, 云南松林表现最高, 总体平均值为: 云南松林 ($0.71 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 高山栎林 ($0.52 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 华山松林 ($0.39 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($0.32 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。

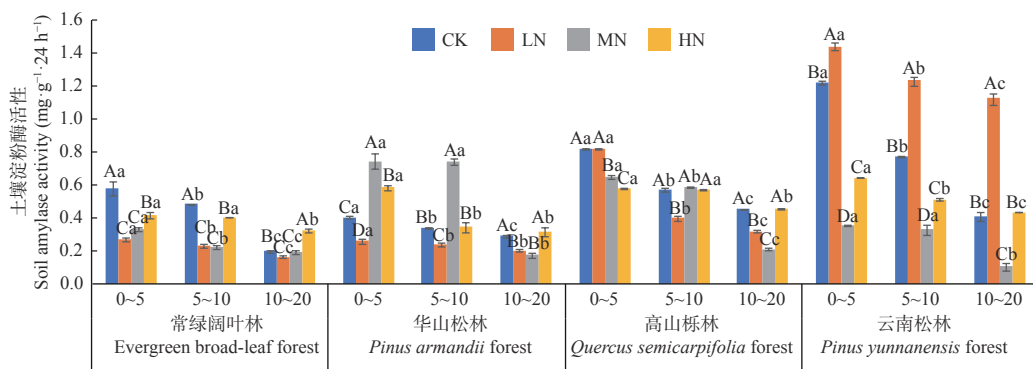


图 2 不同施 N 水平 4 种林地各土层土壤淀粉酶活性变化

Fig. 2 Changes of soil amylase activities in different soil layers of four forest types under different N deposition

图 3 表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 华山松林 LN 处理下 0~5 cm 土层脲酶活性最高 ($0.777 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 高山栎林 CK 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($0.251 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。4 种林分不同土层间脲酶活性差异不显著 ($P > 0.05$), 但各土层平均值表现为随土层深度增加逐渐降低, 不同土层平均值为 0~5 cm ($0.62\sim 0.50 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 5~10 cm ($0.61\sim 0.45 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($0.58\sim 0.37 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。在不同施 N 浓度中, 除高山栎林外, 3 种林分土壤脲酶活性均表现为先增加后降低, 但常绿阔叶林土壤脲酶活性在各处理下差异均不显著 ($P > 0.05$), 华山松林则在 LN 处理下显著高于

CK 处理 ($P < 0.05$), 高山栎林与云南松林在 LN、MN 和 HN 处理下均显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 增幅分别在 36.9%~86.7% 和 40.7%~62.2%。其中, 华山松林表现最高, 总体平均值为: 华山松林 ($0.60 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($0.51 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 高山栎林 ($0.49 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 云南松林 ($0.44 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 华山松林土壤脲酶活性高于云南松林 36.4%。

图 4 表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 华山松林 LN 处理下 0~5 cm 土层天门冬酰胺酶活性最高 ($0.434 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 常绿阔叶林 CK 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($0.007 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。4 种林分下土壤天门冬酰

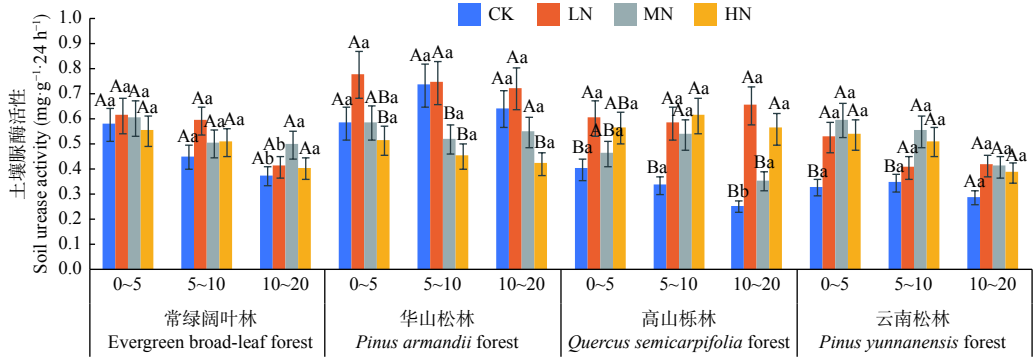


图3 不同施N水平4种林地各土层土壤脲酶活性变化

Fig. 3 Changes of soil urease activities in different soil layers of four forest types under different N deposition

脲酶活性均表现为随土层深度增加逐渐降低, 降幅分别在 98.1%~48.3%、88.6%~30.7%、83.4%~37.3% 和 83.6%~55.8%, 其中常绿阔叶林 CK 处理降幅最高, 4 种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($0.36\sim 0.19\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 5~10 cm ($0.17\sim 0.06\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($0.09\sim 0.05\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), 且存在显著差异 ($P < 0.05$), 其变化范围为 $0.007\sim 0.434\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$ 。在不同施 N 浓度中, 常绿阔叶林和华山松林土壤天门冬酰胺酶活性

随着施 N 水平的增加均表现为先增加, 后减少, 高山栎林和云南松林则表现为先增加, 后减少, 再增加。4 种林分在 LN 处理促进, 其中华山松林在 0~5 cm 土层对比 CK 处理增幅最大, 为 75.8%。常绿阔叶林表现最高, 总体平均值为: 常绿阔叶林 ($0.20\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 高山栎林 ($0.16\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 华山松林 ($0.14\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 云南松林 ($0.10\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), 常绿阔叶林土壤天门冬酰胺酶活性高于云南松林 50.0%。

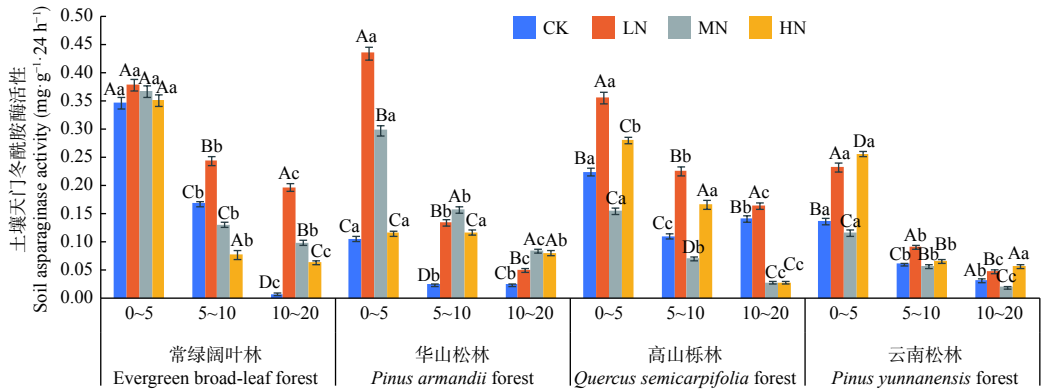


图4 不同施N水平4种林地各土层土壤天门冬酰胺酶活性变化

Fig. 4 Changes of asparaginase activity in different soil layers of four forest types under different N deposition

图5表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 常绿阔叶林 CK 处理下 0~5 cm 土层酸性磷酸酶活性最高 ($2.879\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), 高山栎林 LN 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($1.372\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$)。酸性磷酸酶活性在 4 种林分中均表现为随土层深度增加逐渐降低, 降幅分别在 34.0%~5.6%、35.0%~13.6%、41.0%~10.9% 和 40.2%~11.1%, 其中高山栎林 LN 处理降幅最高, 4 种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($2.47\sim 2.14\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 5~10 cm ($2.23\sim 1.74\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($1.92\sim 1.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), 其变化范围为 $1.372\sim 2.879\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$, 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同施 N 浓度中, 4 种林分土壤酸性磷酸酶活性在各处理下存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中常绿阔叶林在 HN 处理下受到抑制, 降幅在 15.1%~5.1%; 华山松在 HN 处理下受到促进, 增幅在 1.9%~22.1%; 高山栎林与云南松林 LN 处理在 10~20 cm 土壤酸性磷酸酶受到抑制, 降幅为 17.2% 和 11.8%, 在其他土层则表现为促进作用, 增幅为 20.0%~20.7% 和 6.7%~9.3%。

24 h^{-1}) > 10~20 cm ($1.92\sim 1.54\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$), 其变化范围为 $1.372\sim 2.879\text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24\text{ h}^{-1}$, 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同施 N 浓度中, 4 种林分土壤酸性磷酸酶活性在各处理下存在显著差异 ($P < 0.05$)。其中常绿阔叶林在 HN 处理下受到抑制, 降幅在 15.1%~5.1%; 华山松在 HN 处理下受到促进, 增幅在 1.9%~22.1%; 高山栎林与云南松林 LN 处理在 10~20 cm 土壤酸性磷酸酶受到抑制, 降幅为 17.2% 和 11.8%, 在其他土层则表现为促进作用, 增幅为 20.0%~20.7% 和 6.7%~9.3%。

常绿阔叶林表现最高, 总体平均值为: 常绿阔叶林 ($2.21 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 华山松林 ($2.04 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 高山栎林 ($1.96 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 云南松林 (1.81

$\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 常绿阔叶林土壤酸性磷酸酶活性高于云南松林 22.1%。

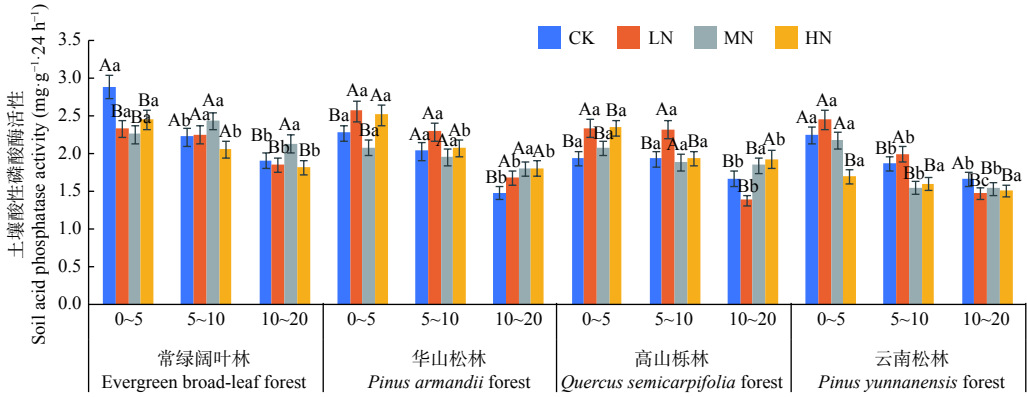


图5 不同施 N 水平 4 种林地各土层土壤酸性磷酸酶活性变化

Fig. 5 Changes of soil acid phosphatase activity in different soil layers of four forest types under different N deposition

图 6 表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 高山栎林 LN 处理下 0~5 cm 土层蛋白酶活性最高 ($1.297 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 云南松林 MN 处理下 10~20 cm 土层活性最低 ($0.625 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$)。除 HN 处理下的华山松林和 高山栎林外, 其他土层蛋白酶活性均表现为随土层深度增加逐渐降低, 降幅分别在 33.8%~22.8%、17.4%~13.4%、41.5%~3.2%、和 27.3%~4.9%, 其中高山栎林 MN 处理降幅最大, 4 种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($1.21\sim 0.85 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 5~10 cm ($1.14\sim 0.80 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 10~20 cm ($1.02\sim 0.73 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 其变化范围为 0.625~

$1.297 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$, 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。在不同施 N 浓度中, 常绿阔叶林土壤蛋白酶活性表现为先增加后降低的趋势, 在 LN 与 MN 处理下高于 CK 处理, 增幅在 8.4%~30.2%。高山栎林在 LN 处理下表现为促进作用, 增幅在 9.5%~23.8%。华山松林与云南松林在各处理下差异不显著。其中, 高山栎林表现最高, 总体平均值为: 高山栎林 ($1.12 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 常绿阔叶林 ($0.91 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 华山松林 ($0.83 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$) > 云南松林 ($0.80 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 24 \text{ h}^{-1}$), 高山栎林土壤蛋白酶活性高于云南松林 34.9%。

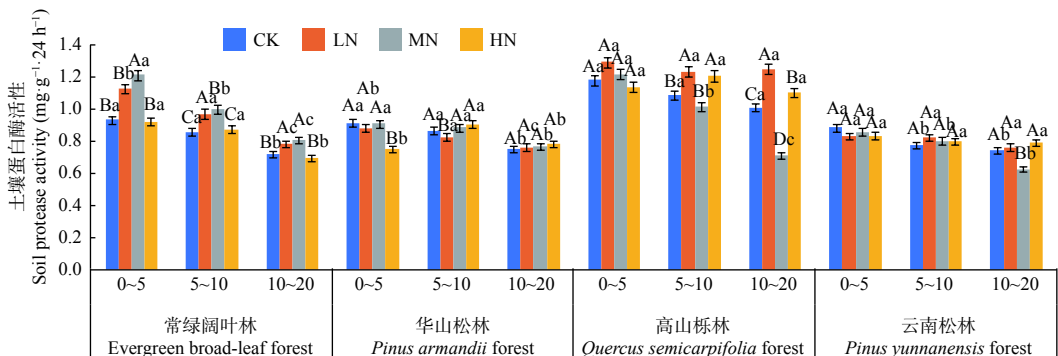


图6 不同施 N 水平 4 种林地各土层蛋白酶活性变化

Fig. 6 Changes of protease activities in different soil layers of four forest types under different N deposition

图 7 表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 华山林 LN 处理下 0~5 cm 土层过氧化氢酶活性最高 ($0.973 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 20 \text{ min}^{-1}$),

云南松林 LN 处理下 0~5 cm 土层活性最低 ($0.209 \text{ mg}\cdot\text{g}^{-1}\cdot 20 \text{ min}^{-1}$)。常绿阔叶林与云南松林土壤过氧化氢酶活性表现为 5~10 cm 土层显著高于 0~

5 cm 土层 ($P < 0.05$), 不同土层平均值为 5~10 cm ($0.48 \sim 0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 0~5 cm ($0.44 \sim 0.33 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 10~20 cm ($0.41 \sim 0.29 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)。华山松林与高山栎林土壤过氧化氢酶活性则表现为随土层深度增加逐渐降低, 降幅分别在 55.6%~14.4% 和 28.1%~14.4%, 两种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($0.47 \sim 0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 5~10 cm ($0.32 \sim 0.30 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 10~20 cm ($0.28 \sim 0.27 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$), 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。4 种林分土壤过氧化氢酶活性变化范围为 $0.209 \sim 0.673 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$ 。在不同施 N 浓度中,

常绿阔叶林与华山松林土壤过氧化氢酶活性随着施 N 水平的增加先增加后减小。高山栎林在 HN 处理下显著高于 CK 处理 ($P < 0.05$), 增幅为 3.9%、16.9%、21.1%。云南松林在 HN 处理下显著高于 CK 处理, 增幅为 30.1%、57.9%、9.1% ($P < 0.05$)。其中, 常绿阔叶林表现最高, 总体平均值为: 常绿阔叶林 ($0.45 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 云南松林 ($0.36 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 华山松林 ($0.34 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 高山栎林 ($0.32 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$), 常绿阔叶林土壤过氧化氢酶活性高于高山栎林 40.6%。

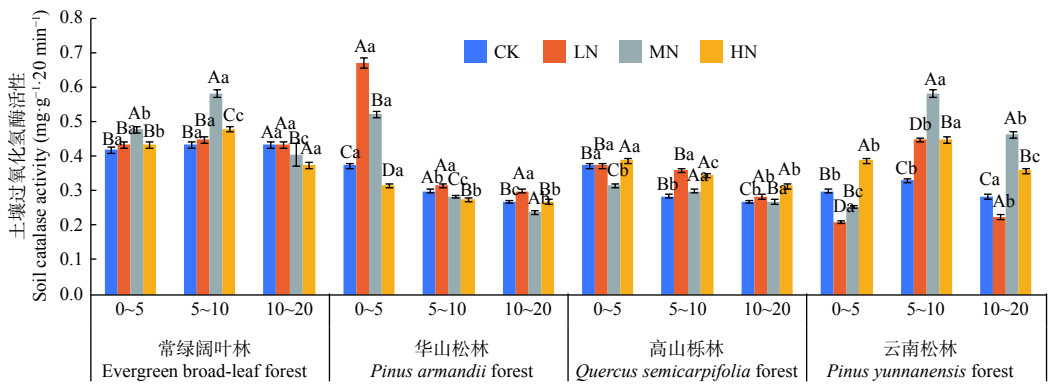


图 7 不同施 N 水平 4 种林地各土层过氧化氢酶活性变化

Fig. 7 Changes of catalase activity in different soil layers of four forest types under different N deposition

图 8 表明, 在土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用下, 云南松林 CK 处理下 0~5 cm 土层多酚氧化酶活性最高 ($1.969 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$), 高山栎林 MN 处理下 0~5 cm 土层活性最低 ($0.156 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$)。常绿阔叶林与华山松林土壤多酚氧化酶活性表现为随土层深度增加逐渐降低, 降

幅分别在 73.3%~52.6% 和 50.0%~11.1%, 两种林分不同土层平均值为 0~5 cm ($1.49 \sim 1.23 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 5~10 cm ($1.02 \sim 0.87 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$) $>$ 10~20 cm ($0.73 \sim 0.59 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1} \cdot 20 \text{ min}^{-1}$), 且存在显著差异 ($P < 0.05$)。高山栎林与云南松林则大部分表现为 5~10 cm $>$ 0~5 cm $>$ 10~20 cm, 10~

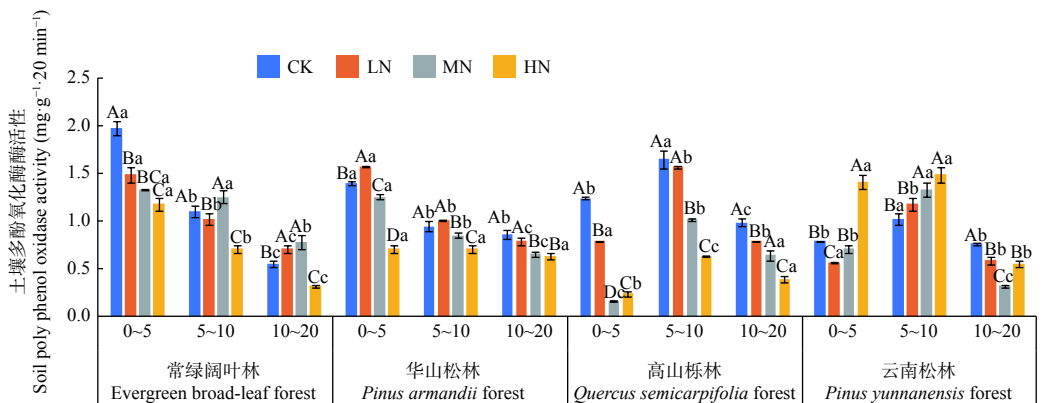


图 8 不同施 N 水平 4 种林地各土层多酚氧化酶活性变化

Fig. 8 Changes of polyphenol oxidase activities in different soil layers of four Forest types under different N deposition

20 cm 土层为 5~10 cm 的 23.6%~74.4%, 0~5 cm 土层为 5~10 cm 的 15.4%~94.7%。4 种林分土壤多酚氧化酶变化范围为 0.156~1.969 mg·g⁻¹·20 min⁻¹。在不同施 N 浓度中, 常绿阔叶林土壤多酚氧化酶活性在 HN 处理下显著抑制 (P < 0.05), 降幅为 42.7%~35.7%; 华山松林与高山栎林在 LN、MN 和 HN 处理下基本表现为抑制, 降幅在 49.4%~9.1%; 云南松林在 HN 处理下高于 CK 处理, 增幅在 80.0%~27.7%。其中, 常绿阔叶林表现最高, 总体平均值为: 常绿阔叶林 (1.03 mg·g⁻¹·20 min⁻¹) > 华山松林 (0.94 mg·g⁻¹·20 min⁻¹) > 云南松林 (0.89 mg·g⁻¹·20 min⁻¹) > 高山栎林 (0.84 mg·g⁻¹·20 min⁻¹), 常绿阔叶林土壤过氧化氢酶活性高于高山栎林 22.6%。

2.2 不同土壤深度、不同施 N 水平和不同森林类型对土壤酶活性的影响

多因素方差分析表明 (表 2): 除施 N 水平对酸性磷酸酶以及土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用对脲酶无显著影响外 (P > 0.05), 土壤深度、施 N 水平、森林类型和三者交互作用对土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶均具有极显著影响 (P < 0.01)。其中, 蔗糖酶、淀粉酶、蛋白酶和过氧化氢酶表现为: 森林类型的影响最大, 土壤深度次之, 施 N 水平和三者交互作用最小; 脲酶表现为: 森林类型影响最大, 施 N 水平次之, 土壤深度和三者交互作

用最小; 天门冬酰胺酶和酸性磷酸酶表现为: 土壤深度影响最大, 森林类型次之, 施 N 水平和三者交互作用最小; 多酚氧化酶表现为: 土壤深度的影响最大, 施 N 水平次之, 森林类型和三者交互作用最小。

土壤深度对土壤酶活性的影响力为: 天门冬酰胺酶>蔗糖酶>淀粉酶>多酚氧化酶>过氧化氢酶>蛋白酶>酸性磷酸酶>脲酶; 施 N 水平对土壤酶活性的影响力为: 蔗糖酶>天门冬酰胺酶>淀粉酶>多酚氧化酶>过氧化氢酶>蛋白酶>脲酶>酸性磷酸酶; 森林类型对土壤酶活性的影响力为: 蔗糖酶>淀粉酶>天门冬酰胺酶>过氧化氢酶>蛋白酶>多酚氧化酶>酸性磷酸酶>脲酶。三者交互作用对土壤酶活性的影响力为: 天门冬酰胺酶>过氧化氢酶>淀粉酶>蔗糖酶>多酚氧化酶>蛋白酶>酸性磷酸酶>脲酶。

3 讨论

3.1 土壤酶活性对不同土壤深度的响应特征

本研究中, 土层深度对 8 种土壤酶活性均表现为极显著影响。其中 4 种林分下土壤淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶活性影响均表现为: 随着土层加深而逐渐降低, N 沉降并未改变土壤酶活性的垂直分布格局。这与陈影^[23]对枫杨-桑树混交林 (*Pterocarya stenoptera* C. DC.-*Morus alba* Linn.)、柳树纯林 (*Salix babylonica* L.)、女贞纯林 (*Ligustrum lucidum* Ait.) 和栎树纯林

表 2 不同土壤深度、不同施 N 水平和不同森林类型对土壤酶活性的多因素方差分析

Table 2 Multivariate ANOVA of soil enzyme activity by different soil depth, different N treatments and different forest types

处理 treatments	自由度 degree of freedom	蔗糖酶 Invertase		淀粉酶 Amylase		脲酶 Urease		天门冬酰胺酶 Asparaginase		酸性磷酸酶 Acid phosphatase		蛋白酶 Proteases		过氧化氢酶 Catalase		多酚氧化酶 Polyphenol oxidase	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P		
土壤深度 Depth of soil	2	2 900.547	0	1 272.361	0	10.599	0	4 348.792	0	113.033	0	203.603	0	299.095	0	475.996	0
施N水平 N treatments	3	703.187	0	270.02	0	12.27	0	632.786	0	2.29	0.083	19.672	0	76.454	0	146.08	0
森林类型 Forest type	3	11 497.743	0	1 335.865	0	15.7	0	655.714	0	29.176	0	407.082	0	464.355	0	40.5	0
土壤深度×施N水平× 森林类型 Depth of soil× N treatments × Forest type	18	40.183	0	52.138	0	0.955	0.517	99.326	0	2.519	0.002	4.49	0	62.002	0	21.548	0

"P > 0.05"表示无显著影响;"0.05 > P > 0.01"表示显著影响;"P < 0.01"表示极显著影响。

(*Koelreuteria paniculata* Laxm.) 4种温带树种下土壤蔗糖酶、过氧化氢酶、蛋白酶活性研究,以及江玉梅^[24]对江西马尾松纯林(*Pinus massoniana* Lamb.)、马尾松-枫香-木荷混交林(*Pinus massoniana* Lamb.-*Liquidambar formosana* Hance-*Schima superba* Gardn.)、木荷纯林(*Schima superba* Gardn.)和枫香纯林(*Liquidambar formosana* Hance) 4种人工林林分下土壤天门冬酰胺酶活性的垂直性变化研究结果一致。这可能是由于随着土层加深,土壤物理性质发生变化,微生物含量降低,进而导致土壤酶活性降低;同时土壤全N含量的表聚性,使表层土壤含氮有机物转化速率增加,从而使土壤酶活性进一步增强^[25]。

不同林分下土壤脲酶活性垂直分布差异不显著,但总体上仍表现为随土层深度增加而降低。李佳等^[26]和刘星^[27]分别对罗甸县米槁(*Cinnamomum migao* H. W. Li)及油松天然林(*Pinus tabuliformis* Carriere)模拟N沉降下土壤酶的研究同样表明,不同土层之间脲酶活性差异不显著($P > 0.05$)。有研究表明,当森林土壤N含量较高时,外源N抑制土壤脲酶活性;反之,则促进土壤脲酶活性,在本研究中,土壤脲酶活性未受到N处理的显著影响,推测施N前后土壤N浓度均处于平均范围内,今后研究可考虑适当增加施N浓度,以研究N沉降增加对土壤脲酶活性的影响。而HN处理下华山松林和高山栎林土壤蛋白酶活性、各施N处理下常绿阔叶林和云南松林土壤过氧化氢酶活性、各施N处理下高山栎林与云南松林土壤多酚氧化酶活性则多表现出0~5 cm、5~10 cm和10~20 cm土层先降低后升高的现象,这可能是由于过量的N施入土壤表层使土壤发生负反馈机制^[28],从而抑制了土壤蛋白酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶的活性,但其抑制机理还有待进一步研究。

3.2 土壤酶活性对不同施N水平的响应特征

本研究对8种酶的研究中,蔗糖酶、天门冬酰胺酶与淀粉酶对施N水平的响应最显著。土壤蔗糖酶活性与土壤有机质、氮、磷含量,微生物数量及土壤呼吸强度有关^[6],土壤淀粉酶则是碳素循环中的一种重要的酶。其中,LN处理显著增加了常绿阔叶林土壤蔗糖酶活性和云南松林土壤淀粉酶活性($P < 0.01$),这与肖永翔等^[29]对四川雅安常绿阔叶林土壤蔗糖酶活性变化的研究结果一致,原因可能是相对较低的N沉降促进了林下植被的生

长,进而向土壤中提供了更多的C;MN与HN处理对土壤蔗糖酶与淀粉酶活性多表现为抑制作用,如HN处理抑制了高山栎林、云南松林土壤蔗糖酶与土壤淀粉酶活性,但未达到显著性($P > 0.05$),可能是高浓度的N抑制了植物根系活性,使土壤pH降低,土壤硝化作用增强,土壤有效C降低^[30],从而抑制了土壤蔗糖酶与淀粉酶活性,而土壤蔗糖酶活性的降低,减少了土壤植物与微生物营养源,进一步影响了土壤生物学活性强度。此外,不同森林类型的植株对碳的吸收和利用能力不同^[31],也可能是造成土壤蔗糖酶与淀粉酶活性随着N浓度的增加出现不同的变化趋势的原因。土壤天门冬酰胺酶在氮代谢中起着重要作用,能够反映土壤中含氮有机化合物的转化能力。4种N处理对4种林分土壤天门冬酰胺酶活性均造成了显著影响,其中,LN处理显著提高了4种林分表层土壤的天门冬酰胺酶活性。可能是表层土壤很大程度上受土壤有机质和微生物含量的影响^[26],而LN处理下N的输入提高了土壤N含量,促进酶活性,但土层的增加使土壤通透性下降,微生物量降低,抑制了土壤天门冬酰胺酶活性。

本研究对8种酶的研究中,脲酶、酸性磷酸酶与蛋白酶对施N水平的响应最低。土壤脲酶在土壤中较为活跃,其活性与土壤中尿素、有机质含量和微生物含量有关。脲酶能将土壤中的尿素水解为 NH_3 和 CO_2 ,为植物直接提供N素营养,是促进土壤N循环的重要组成部分,可以反应土壤的供氮能力^[32]。本研究中不同林分下土壤脲酶活性在各施N处理间差异不显著。李瑞瑞等^[33]对墨西哥柏(*Cupressus lusitanica* Miller)模拟N沉降下土壤酶的研究同样表明,不同N沉降处理之间脲酶活性差异不显著($P > 0.05$)。这可能是由于土壤脲酶对环境条件的抗性,即脲酶具有较强稳定性。有研究表明土壤脲酶的保护容量是相对恒定的值^[6],外界因子对脲酶保护容量的改变具有时效性,最终都会恢复到初始状态^[34],使不同处理间土壤脲酶活性差异较小。

土壤酸性磷酸酶与土壤碳、氮、磷含量有关,是评价土壤磷素生物转化方向与强度的指标。LN处理促进了华山松林、高山栎林和云南松林土壤酸性磷酸酶活性,HN则抑制了常绿阔叶林与云南松林土壤酶活性。可能是由于亚热带森林中有效N富集,使LN处理的N增加量直接作用于土

壤酶,促进酶活性^[35],而高N下抑制则可能是因为高N盐的毒害作用,使土壤微生物群落功能受到影响^[36]。土壤蛋白酶能够水解蛋白质肽链,促进土壤微生物氮素代谢,可促进土壤N循环,是土壤中氮矿化过程的限速酶^[37]。本研究中N沉降对土壤蛋白酶活性影响并不显著,随着N浓度的增加,酶活性峰值出现在LN、MN下,这与于济通^[38]等的研究结果,土壤蛋白酶活性随着N沉降量的增加逐渐增强相一致。而HN下抑制则可能是因为土壤N含量超出N饱和点,酶活性受到过量N沉降的抑制作用;也可能是因为高氮盐的毒害作用,使土壤微生物群落功能受到影响,降低了酶活性^[39]。

土壤过氧化氢酶有利于防止过氧化氢对生物体的毒害作用,其活性与土壤有机质含量、微生物数量有关^[40]。Frey等^[38]与本研究中常绿阔叶林研究结果类似,N沉降对土壤过氧化氢酶活性影响不显著。本研究中,LN处理促进了华山松林、高山栎林下土壤过氧化氢酶活性,MN处理促进了常绿阔叶林、云南松林下土壤酶活性。从不同研究中可以发现,施N浓度不同会对土壤过氧化物酶活性造成促进^[41]或抑制^[27,42]作用,原因可能是N沉降虽然在一定程度上对微生物活性产生了影响,但由于不同森林类型下土壤环境、土壤生物及森林类型的差异性,使微生物活性的变化方向具有不确定性,进而使土壤过氧化氢酶活性变化不同^[43]。土壤多酚氧化酶属于木质素分解酶,其活性与凋落物分解密切相关。本研究中,N沉降对常绿阔叶林、华山松林和高山栎林下土壤酶活性有显著抑制作用,并且随着N浓度的升高,抑制作用逐渐增强。这与孙宇等^[44]对湿性常绿阔叶次生林的研究结果一致。原因可能是N沉降下微生物中有关木质素分解基因的表达和丰度的相关基因下降^[45],而N水平的逐级增加,抑制了土壤多酚氧化酶的生产作用,使木质素在土壤中大量堆积,引起进一步的抑制作用^[46]。

3.3 土壤酶活性对不同森林类型的响应特征

本研究结果表明森林类型对土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶过氧化氢酶和多酚氧化酶活性均表现为极显著影响,且为蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、蛋白酶和过氧化氢酶影响最大的因素,原因可能是不同森林类型下土壤通透性和微生物种类与数量等差异,造成4种林分对N沉降的转化程度各不同,施N前后土壤N含量出现差异,进而极大程度上影响了不同土壤酶活

性的变化。其中土壤天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性在常绿阔叶林中表现最高,可能原因是常绿阔叶林中植物种类较多,包括米槠(*Castanopsis carlesii* (Hemsl.) Hayata.)、光叶柯(*Lithocarpus mairei* (Schottky) Rehder)、毛蕊红山茶(*Camellia mairei* (Lévl.) Melch.)等,凋落物积累较为丰富,相比其他树种土壤碳储量较高^[47],能够促进土壤微生物活性。脲酶在华山松林中活性最高,原因可能是脲酶能为植物直接供N,而华山松林为人工林,土壤通透性较高,且处于中幼龄林阶段(20年生),生长较快需要合成大量干物质,对N、P的需求相对较高^[48]。

3.4 土壤酶活性对不同土壤深度、不同施N水平和不同森林类型交互作用的响应特征

由森林类型、土壤深度和施N水平对土壤酶活性的多因素方差分析结果可知:森林类型和土壤深度是影响N沉降下土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶和过氧化氢酶活性变化差异的重要因素。土壤多酚氧化酶对施N水平反应敏感,对森林类型反应较不敏感,这将有利于对比研究不同区域对N沉降的响应特征。天门冬酰胺酶对不同土壤深度的响应最为敏感,蔗糖酶对不同施N水平和不同森林类型的响应最为敏感;天门冬酰胺酶对不同土壤深度、不同施N水平和不同森林类型三者交互作用的响应最为敏感。

天门冬酰胺酶来源于植物根系,能酶促天门冬酰胺生成天门冬氨酸和氨,和氮循环密切相关,也是土壤中最活跃的水解酶类之一^[49]。本研究中土壤天门冬酰胺酶的垂直差异表现出极显著水平,而LN处理显著提高了4种林分各土层土壤天门冬酰胺酶活性,原因可能是细根作为林木根系中最活跃的部分,其分布主要集中于土壤表层,并随着土壤深度增加逐渐减小^[50],使土壤天门冬酰胺酶活性随土壤深度的增加而逐渐降低,穆兰^[51]对茶园生态系统的研究也证明了这一观点;而土壤C库中的活性C库能够直接影响水解酶活性,外源N的输入通过影响微生物活性与数量,从而改变了土壤C储量^[52],使天门冬酰胺酶对N沉降的敏感性较高,但具体的作用机理还有待进一步研究。

4 结论

(1) 土壤酶活性的垂直分布存在明显规律,

8 种土壤酶活性均表现为 5~10 cm 土层土壤酶活性大于 10~20 cm 土层, 降幅最高达 76.8%, 常绿阔叶林与云南松林土壤过氧化氢酶和高山栎林与云南松林土壤多酚氧化酶活性均在 0~5 cm 土层受到抑制, 活性最低时仅为 5~10 cm 土层活性的 15.4%。

(2) 施 N 条件下不同林分土壤酶活性变化存在差异: LN 显著抑制了高山栎土壤蔗糖酶与淀粉酶活性; 脲酶、蛋白酶在各 N 处理下差异不显著; 除常绿阔叶林土壤酸性磷酸酶外 LN 处理均显著提高了天门冬酰胺酶和酸性磷酸在 0~10 cm 土层土壤酶活性; N 沉降抑制了华山松林土壤过氧化氢酶活性, 促进了高山栎林、云南松林土壤过氧化氢活性; 对土壤多酚氧化酶则表现为抑制。

(3) 土壤蔗糖酶、淀粉酶、脲酶、天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、蛋白酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶在不同林分中表现出明显差异性 ($P < 0.01$); 其中土壤天门冬酰胺酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶和多酚氧化酶活性在常绿阔叶林中表现最高, 蔗糖酶和蛋白酶在高山栎林中表现最高, 淀粉酶在云南松林中表现最高, 脲酶在华山松林中表现最高。

(4) 8 种土壤酶中, 蔗糖酶分别对不同施 N 水平和不同森林类型的响应最为敏感, 天门冬酰胺酶分别对不同土壤深度及不同土壤深度、施 N 水平和森林类型三者交互作用的响应最为敏感。

参考文献:

- [1] Bartels F S, Gendreau-Berthiaume B, Macdonald S E. The impact of atmospheric acid deposition on tree growth and forest understory vegetation in the Athabasca Oil Sands Region[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 696: 1338-77.
- [2] 鲁显楷, 莫江明, 张 炜, 等. 模拟大气 N 沉降对中国森林生态系统影响的研究进展[J]. *热带亚热带植物学报*, 2019, 27 (5): 500-522.
- [3] Melillo J M, Stuedler P A, Aber J D, *et al.* Soil warming and carbon cycle feedbacks to the climate system[J]. *Science*, 2002, 298(5601): 2173-2176.
- [4] 雷丽群, 卢立华, 农 友, 等. 不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2017, 30 (6): 954-960.
- [5] 王理德, 王方琳, 郭春秀, 等. 土壤酶学研究进展[J]. *土壤*, 2016, 48 (1): 12-21.
- [6] 关松荫. 土壤酶及其研究方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 14-339.
- [7] Cusack D F, Silver W L, Torn M S, *et al.* Changes in microbial community characteristics and soil organic matter with nitrogen additions in two tropical forests[J]. *Ecology*, 2011, 92(3): 621-632.
- [8] 余汉基, 薛 立. 森林土壤酶活性对 N 沉降的响应[J]. *世界林业研究*, 2018, 31 (1): 7-12.
- [9] 刘博奇, 牟长城, 邢亚娟, 等. 模拟氮沉降对云冷杉红松林土壤呼吸的影响[J]. *林业科学研究*, 2012, 25 (6): 767-772.
- [10] 李雪娟, 乔 璐, 唐宗英, 等. 模拟 N 沉降对高黎贡山自然公园片区中山湿性常绿阔叶林土壤呼吸速率的影响[J]. *绿色科技*, 2018, (2): 9-10.
- [11] 张雪丽. 模拟 N 沉降对桂花林土壤理化性质和酶活性的影响[D]. 南京, 南京林业大学, 2018.
- [12] 张 艺, 王春梅, 许 可, 等. 模拟 N 沉降对温带森林土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37 (6): 1956-1965.
- [13] 李吉攻, 张毓涛. 模拟 N 沉降对天山云杉林土壤酶活性的季节性影响[J]. *西南林业大学学报: 自然科学*, 2019, 39 (4): 1-8.
- [14] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤. 滇中亚高山森林乔木层各器官生态化学计量特征[J]. *生态学杂志*, 2019, 38 (6): 1669-1678.
- [15] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 等. 模拟 N 沉降增加条件下土壤团聚体对酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35 (5): 1422-1433.
- [16] 雒守华. 模拟 N 沉降对华西雨屏区光皮桦林凋落物分解、土壤酶活性和土壤呼吸的影响[D]. 雅安, 四川农业大学, 2010.
- [17] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. *Forest Ecology and Management*, 1998, 101(1-3): 1-7.
- [18] Aber J, McDowell W, Nadelhoffer K, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems Hypotheses revisited[J]. *Bioscience*, 1998, 48(11): 921-934.
- [19] 张雨鉴, 王克勤, 宋娅丽, 等. 滇中亚高山 5 种林型土壤碳氮磷生态化学计量特征[J]. *生态环境学报*, 2019, 28 (1): 73-82.
- [20] 梁亚宇, 李丽君, 刘 平, 等. 大气 N 沉降监测方法及中国不同地理分区 N 沉降研究进展[J]. *山西农业科学*, 2018, 46 (10): 1751-1755.
- [21] 黄铄淇, 胡慧蓉, 韩钊龙, 等. 昆明东郊大气氮湿沉降的测定与分析[J]. *四川农业大学学报*, 2014, 32 (4): 418-425.
- [22] 余汉基, 蔡金桓, 薛 立, 等. 模拟外源性氮磷对马占相思凋落叶分解及土壤生化特性的影响[J]. *林业科学研究*, 2018, 31 (2): 107-113.
- [23] 陈 影. 苏北沿海不同林分土壤 N 素矿化及酶活性研究[D]. 南京, 南京林业大学, 2017.
- [24] 江玉梅, 陈成龙, 徐志红, 等. 退化红壤区人工林土壤的可溶性有机物、微生物生物量和酶活性[J]. *应用生态学报*, 2010, 21 (9): 2273-2278.
- [25] 王建宇, 胡海清, 邢亚娟, 等. 大兴安岭兴安落叶松林树木生物量对氮沉降的响应[J]. *林业科学研究*, 2018, 31 (3): 88-94.
- [26] 李 佳. 模拟 N 沉降对米槁(*Cinnamomum migao*)凋落叶养分释放及土壤肥力的影响[D]. 贵阳, 贵州大学, 2019.
- [27] 刘 星, 汪金松, 赵秀海. 模拟 N 沉降对太岳山油松林土壤酶活性的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35 (14): 4613-4624.
- [28] 何亚婷, 齐玉春, 董云社, 等. 外源氮输入对草地土壤微生物特性影响的研究进展[J]. *地球科学进展*, 2010, 25 (8): 877-885.
- [29] 肖永翔. 华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物和酶活性对模拟 N 沉降的响应[D]. 雅安, 四川农业大学, 2016.

- [30] 佟德利,徐仁扣. 三种氮肥对红壤硝化作用及酸化过程影响的研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(04): 853-859.
- [31] 张帆,廖迎春,刘佳婷,等. 长期N沉降对杉木人工林土壤碳、N含量及细根分布的影响[J]. 南昌工程学院学报, 2019, 38(3): 54-57+64.
- [32] 刘彩霞,焦如珍,董玉红,等. 杉木林土壤微生物区系对短期模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2015, 28(2): 271-276.
- [33] 李瑞瑞,卢艺,王益明,等. N沉降对墨西哥柏人工林土壤碳N磷化学计量特征及酶活性的影响[J]. 生态学杂志, 2019, 38(2): 384-393.
- [34] Zantua M I, Bremner J M. Production and persistence of urease activity in soils[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1976, 8(5): 369-374.
- [35] 周晓兵,张元明,陶冶,等. 古尔班通古特沙漠土壤酶活性和微生物量N对模拟N沉降的响应[J]. 生态学报, 2011, 31(12): 3340-3349.
- [36] 陈立新,李刚,李少博,等. 退化草牧场防护林土壤腐殖质碳组分特征及酶活性[J]. 林业科学研究, 2017, 30(3): 494-502.
- [37] Enrique A G, Bruno C, Christopher A, et al. Effects of nitrogen availability on microbial activities, densities and functional diversities involved in the degradation of a Mediterranean evergreen oak litter (*Quercus ilex* L.)[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(7): 1654-1661.
- [38] 于济通,陶佳慧,马小凡,等. 冻融作用下模拟N沉降对土壤酶活性与土壤无机N含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2015, 34(3): 518-523.
- [39] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, et al. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests[J]. Forest Ecology and Management, 2004, 196(1): 159-171.
- [40] Hobbie S E. Interactions between litter lignin and soil nitrogen availability during leaf litter decomposition in a Hawaiian montane forest[J]. Ecosystems, 2000, 3(5): 484-494.
- [41] 徐雷. 氮沉降对杉木人工林土壤理化性质和酶活性的影响[D]. 福州,福建农林大学,2007.
- [42] 宋学贵,胡庭兴,鲜骏仁,等. 川南天然常绿阔叶林土壤酶活性特征及其对模拟N沉降的响应[J]. 生态学报, 2009, 29(3): 1234-1240.
- [43] Kim H, Kang H. The impacts of excessive nitrogen additions on enzyme activities and nutrient leaching in two contrasting forest soils[J]. Journal of Microbiology, 2011, 49(3): 369-375.
- [44] 孙宇,彭天驰,李顺,等. 模拟N沉降对湿性常绿阔叶次生林土壤碳N组分和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2): 235-243+250.
- [45] 赵超,彭赛,阮宏华,等. N沉降对土壤微生物影响的研究进展[J]. 南京林业大学学报:自然科学版, 2015, 39(3): 149-155.
- [46] 铁烈华,张仕斌,熊粹岑,等. 华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中木质素降解对模拟氮、硫沉降的响应[J]. 林业科学研究, 2019, 32(2): 25-31.
- [47] 侯芳,王克勤,宋娅丽,等. 滇中亚高山典型森林生态系统碳储量及其分配特征[J]. 生态环境学报, 2018, 27(10): 1825-1835.
- [48] 刘文飞,樊后保. 杉木人工林凋落物C、N、P归还量对N沉降的响应[J]. 林业科学, 2011, 47(3): 89-95.
- [49] 黄淑萍. 刺槐幼苗根际微环境对大气CO₂浓度升高和土壤Cd、Pb污染耦合的响应机制[D]. 西安,长安大学,2017.
- [50] 廖群. 泉州湾湿地土壤水解酶特征及其与土壤有效氮磷的关系[D]. 镇江,江苏大学,2009.
- [51] 穆兰. 茶园土壤可溶性有机氮及其主要影响因素研究[D]. 福州,福建农林大学,2011.
- [52] 王晶苑,张心昱,温学发,等. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.

Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Enzyme Activity in Subalpine Forests in Central Yunnan, China

ZHENG Xing-ruì, WANG Ke-qin, SONG Ya-li, ZHANG Zhuan-min, ZHANG Yu-jian, PAN Yu

(College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China)

Abstract: [Objective] To study the effects of simulated N deposition on soil enzyme activity in different forest types. [Method] *Pinus yunnanensis* forest, *Quercus semecarpifolia* forest, *Pinus armandii* forest and evergreen broadleaved forest were used as the research objects in the typical forests at Mopan mountain, central Yunnan. From January to December, 2018, four N treatments including CK ($0 \text{ g N m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), low N (LN, $5 \text{ g N m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), medium N (MN, $15 \text{ g N m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) and high N (HN, $30 \text{ g N m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$) were set to determine the activities of invertase, amylase, urease, asparaginase, acid phosphatase, protease, catalase and polyphenol oxidase in different soil layers (0~5 cm, 5~10 cm and 10~20 cm) of the four forest areas at different N levels. [Result] The results showed that the effect of soil depth on the activity of the eight soil enzyme in these forests was lower in 10~20 cm soil than in 5~10 cm soil, with a maximum decrease of 76.8%. The activities of catalase in evergreen broadleaved forest and *P. yunnanensis* forest and polyphenol oxidase in *Q. semecarpifolia* forest and *P. yunnanensis* forest were inhibited in 0~5 cm soil layer, and the lowest activity was only 15.4% of that in the soil layer of 5~10 cm. The N level had a significant effect on soil enzyme activity. LN significantly inhibited the activity of invertase and amylase in *Q. semecarpifolia* forest. N treatment had no significant effect on urease and protease activity. LN treatment significantly increased the activity of asparaginase and acid phosphatase in soil layer 0~10 cm except evergreen broadleaved forest. The N treatment inhibited the soil catalase activity in *P. armandii* forest and the soil polyphenol oxidase activity in each forest, and promoted the soil catalase activity in *Q. semecarpifolia* forest and *P. yunnanensis* forest. Forest type had significant effects on soil invertase, amylase, urease, asparaginase, acid phosphatase, protease, catalase and polyphenol oxidase ($P < 0.01$). [Conclusion] Forest type and soil depth are important factors affecting the differentiation of soil invertase, amylase, urease, asparaginase, acid phosphatase, protease and catalase activity under N sedimentation. Soil polyphenol oxidase activity is sensitive to N sedimentation but not to forest type. Among the eight soil enzymes, asparaginase is the most sensitive to the interaction among soil depths, N application level and forest type.

Keywords: soil enzyme; simulated nitrogen deposition; stand; subalpine of middle Yunnan province

(责任编辑: 崔 贝)