

# 模拟氮沉降对云南中部亚高山华山松林土壤酶活性的影响

李晓东<sup>1</sup>, 苏连波<sup>2</sup>, 王克勤<sup>3,4</sup>, 宋娅丽<sup>3,4</sup>, 宋成功<sup>1</sup>, 胡淳<sup>5</sup>

(1.西南林业大学生态与环境学院, 云南昆明 650224; 2.云南省林业和草原科学院漾濞核桃研究院, 云南大理 671000; 3.西南林业大学水土保持学院, 云南昆明 650224; 4.国家林业和草原局云南玉溪森林生态系统国家定位观测研究站, 云南昆明 650224; 5.云南经贸外事职业学院, 云南昆明 650224)

**摘要:** [目的] 探讨亚热带华山松(*Pinus armandii*)林土壤酶活性的动态规律及其与化学性质关系, 为亚热带地区氮沉降研究提供参考。[方法] 本研究以滇中亚热带华山松林为研究对象, 设置对照[CK, 0 g/(m<sup>2</sup>·a)], 低氮[LN, 10 g/(m<sup>2</sup>·a)], 中氮[MN, 20 g/(m<sup>2</sup>·a)]和高氮[HN, 25 g/(m<sup>2</sup>·a)]4个氮梯度处理, 分析土壤酶活性对氮沉降的响应及其与土壤化学性质之间的关联性。[结果] ①氮沉降促进了蔗糖酶(16.94%~34.00%)和酸性磷酸酶(23.42%~40.09%)的活性, 抑制了脲酶(8.70%~27.18%)和过氧化氢酶(9.26%~23.36%)的活性, 且呈现出显著的时间变化( $p < 0.05$ ); 蔗糖酶和脲酶活性分别在氮沉降后第25, 27个月(2021年8月, 10月)达到最高, 酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性则在氮沉降后第33个月(2022年6月)达到最高。②土壤pH值、有机碳和全磷含量随氮沉降水平增加而降低, 土壤全氮含量则相反, 土壤硝态氮和氨态氮含量在MN提高, 而在HN降低。③土壤化学性质和酶活性均表现为0—5 cm > 5—10 cm > 10—20 cm的垂直土层分布特征; 氮沉降下不同土壤酶活性之间协同效应较高( $p < 0.05$ ); 在影响土壤酶活性的环境因子中, 土壤全氮是影响蔗糖酶活性的主要敏感因子, 土壤有机碳、全磷和氨态氮是影响脲酶和过氧化氢酶活性的主要敏感因子。[结论] 氮沉降持续增加的情况下, 加强了土壤酶之间的协同效应, 改变了森林土壤的环境因子, 促进或抑制土壤酶活性, 进而改变了土壤养分循环。

**关键词:** 氮沉降; 土壤酶; 土壤化学性质; 华山松林

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2024)05-0038-10

中图分类号: S718.55

**文献参数:** 李晓东, 苏连波, 王克勤, 等. 模拟氮沉降对云南中部亚高山华山松林土壤酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2024, 44(5): 38-47. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.20240729.002; Li Xiaodong, Su Lianbo, Wang Keqin, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in subalpine *Pinus armandii* forest in Central Yunnan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(5): 38-47.

## Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Soil Enzyme Activities in Subalpine *Pinus Armandii* Forest in Central Yunnan Province

Li Xiaodong<sup>1</sup>, Su Lianbo<sup>2</sup>, Wang Keqin<sup>3,4</sup>, Song Yali<sup>3,4\*</sup>, Song Chenggong<sup>1</sup>, Hu Chun<sup>5</sup>

(1.College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming,

Yunnan 650224, China; 2.Yangbi Walnut Research Institute, Yunnan Provincial Academy of

Forestry and Grassland Sciences, Dali, Yunnan 671000, China; 3.College of Soil and Water

Conservation, Southwest Forestry University, Kunming, Yunnan 650224, China; 4.Yunnan Yuxi Forest

Ecosystem National Station, National Forestry and Grassland Administration, Kunming, Yunnan 650224,

China; 5.Yunnan Vocational College of Economy, Trade and Foreign Affairs, Kunming, Yunnan 650224, China)

**Abstract:** [Objective] The dynamic pattern of soil enzyme activities and its relationship with soil chemical properties in a subtropical *Pinus armandii* forest was investigated to provide reference for the study of nitrogen deposition in subtropical regions. [Methods] Four nitrogen gradient treatments for the control (CK) and low (LN), medium (MN), and high nitrogen (HN) at 0, 10, 20 and 25 g/(m<sup>2</sup>·a), respectively, were

收稿日期: 2024-04-30

修回日期: 2024-06-27

资助项目: 云南省农业基础研究联合专项“计划火烧影响滇中亚热带华山松凋落物呼吸的微生物学机制”(202301BD070001-059); 云南省教育厅科学研究资助项目(2022J0510); 云南省自然生态监测网络项目云南玉溪森林生态站运行项目(2024-YN-13); 云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地(2020132550); 云南省一流学科建设项目(云教发[2022]73号)

第一作者: 李晓东(1995—), 男(汉族), 贵州省遵义市人, 硕士研究生, 研究方向为土壤养分循环。Email: lixiaodong1995y@sina.com。

通信作者: 宋娅丽(1985—), 女(汉族), 山西省长治市人, 博士, 副教授, 主要从事全球变化与碳氮循环、森林生态系统功能与过程研究。Email: songyalil19851205@sina.com。

set up in the subtropical *Pinus armandii* forest of Central Yunnan to analyse the response of soil enzymes to nitrogen deposition and its correlation with soil chemical properties. [Results] ① Nitrogen deposition promoted the activities of invertase (16.94%—34.00%) and acid phosphatase (23.42%—40.09%) and inhibited the activities of urease (8.70%—27.18%) and catalase (9.26%—23.36%), with temporal variation ( $p < 0.05$ ). Invertase and urease activities were highest at 25th and 27th month after nitrogen deposition (August and October, 2021), whereas acid phosphatase and catalase activities were highest at 33th month after nitrogen deposition (June, 2022). ② Soil pH value, organic carbon, and total phosphorus content decreased with increasing nitrogen deposition; in contrary, soil nitrate and ammonia nitrogen content increased in MN and decreased in HN. ③ Soil chemical properties and enzyme activities were characterized by a vertical soil layer distribution of 0—5 cm > 5—10 cm > 10—20 cm. The synergism between different soil enzyme activities under nitrogen deposition was high ( $p < 0.05$ ), among the environmental factors affecting soil enzyme activities, soil total nitrogen was the most sensitive factor affecting invertase activity; soil organic carbon, total phosphorus, and ammoniacal nitrogen were the most sensitive factors affecting urease and catalase activities. [Conclusion] With continuously increase in nitrogen deposition, the synergism among soil enzymes was enhanced, the environmental factors affecting forest soil were changed, the soil enzyme activity was promoted or inhibited, and then the soil nutrient cycling was changed too.

**Keywords:** nitrogen deposition; soil enzymes; soil chemical properties; *Pinus armandii* forest

大气氮沉降是氮输入陆地生态系统重要途径,通过影响氮的矿化、硝化和固定等过程,改变陆地生态系统氮平衡和生产力。由于化石燃料燃烧、畜牧业发展和人口增长导致大气中的含氮化合物数量大幅增加<sup>[1-2]</sup>,据估计活性氮预计到 21 世纪中期将达到 200 Tg/a,将超出全球氮负荷 (100 Tg/a),亚热带地区可能会成为未来最严重的氮沉降区之一<sup>[3-5]</sup>,氮沉降使森林生态系统土壤的矿化速率提升,进而导致土壤酸化,改变森林植被生长及微生物活动<sup>[6]</sup>,对土壤化学性质和酶活性产生影响。

土壤酶是土壤生态系统中能量流动和物质循环的生物活化剂,在土壤养分转化中扮演着重要的角色,能够反映土壤环境的变化,其中土壤水解酶(蔗糖酶、脲酶和酸性磷酸酶等)和氧化酶(过氧化氢酶和多酚氧化酶等)分别参与土壤有机物质的分解和腐殖化过程<sup>[7]</sup>。国内外关于氮沉降对森林生态系统土壤酶活性的影响已开展了一系列研究。如氮沉降可以维持产生水解酶的生物量促进水解酶活性,通过减少食物网的碳流量而抑制氧化酶活性<sup>[8-9]</sup>。也有研究认为氮沉降降低了土壤酶水解、氧化过程的速率以及微生物种类,抑制了水解酶活性,而促进了氧化酶活性<sup>[10-11]</sup>或无影响<sup>[12]</sup>,研究结果并不一致。氮沉降除直接对碳、氮、磷过程相关土壤酶活性产生影响外,还通过提高和降低土壤硝态氮( $\text{NO}_3^-$ -N)和氨态氮( $\text{NH}_4^+$ -N)等土壤化学性质的硝化和淋失,改变土壤微生物群落结构、功能,影响微生物对有机质和凋落物的分解过程<sup>[13-14]</sup>,影响土壤酶的分泌,进而改变土壤碳储存。氮沉降对土壤酶的影响是一个十分复杂的生态过程,其内在机制还需进一步探究。在当前大气

氮沉降量增加的背景下,研究氮沉降对土壤酶的影响,有助于更精确评估在全球氮沉降量增加及气候变暖条件下森林生态系统的土壤环境变化和养分循环情况。

滇中亚高山气候条件独特,由南亚热带过渡到北亚热带区,植被以亚热带常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林、针叶林和高山矮林为主,生物资源十分丰富。华山松林作为该区域主要造林树种,碳储量已达 259.9 t/hm<sup>2</sup><sup>[15]</sup>,具有显著的水土保持及水源涵养功能。因此,本研究以华山松(*Pinus armandii*)林为研究对象,选取土壤水解酶(蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶)和氧化酶(过氧化氢酶),通过原位氮沉降试验,分析土壤化学性质和酶活性对模拟氮沉降的动态响应特征,探究氮沉降下土壤化学性质和酶活性的关系,揭示其响应机制,旨在预测该地区在氮沉降持续增加的情况下森林土壤的养分动态提供参考。

## 1 研究区概况与研究方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南省玉溪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)。属于低纬度高海拔地区,具有典型的山地气候特点,海拔为 1 260.0~2 614.4 m,高差大,气候垂直变化明显,属于亚热带高原性气候。全年日照 2 380 h,最低气温 -2.2 °C,最高气温 33.0 °C,年平均气温 15 °C。干、湿季分明(干季:11 月至次年 4 月;湿季:5—10 月),干季空气较干燥,降水量少,湿季空气湿度大,降水量高,年降水量为 1 050 mm。该区域土壤以山地红壤和黄棕壤为主,土层厚度以中厚

土层为主,部分区域为薄土层。植被类型丰富,分布有楠木(*Phoebe chinensis*)、山漆树(*Rhus delavayi*)、梭罗树(*Reevesia pubescens*)、龙胆草(*Gentiana scabra*)、野山茶(*Elsholtzia bodinieri*)、树蕨(*Arthrop-teris palisotii*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等 98 科 137 属 324 种,森林类型为亚热带常绿阔叶林、亚热带中山针阔混交林(滇油杉林)、针叶林(云南松林、华山松林)和高山矮林(高山栎林)等。

## 1.2 研究方法

### 1.2.1 样地布设 试验样地设于云南省玉溪森林生

态系统国家定位观测研究站华山松林(纯人工林),林下植被有杨梅(*Myrica rubra*)、菝葜(*Smilax china*)、粗叶悬钩子(*Rubus alceifolius*)、紫茎泽兰(*Ageratina adenophora*)、沿阶草(*Ophiopogon bodinieri*)等。根据典型性和代表性原则,以林分各层较为丰富和林相较整齐区域随机选取 3 个 20 m×20 m 的样地,样地基本情况见表 1,在每个标准样地中随机布设 4 个 3 m×3 m 的小样方(用于不同水平的氮沉降处理,各 3 个重复),以减少各个样方之间的互相影响,样方间距离>10 m。

表 1 观测样地基本情况

Table 1 Basic information of observation sample sites

| 样地编号 | 海拔/m  | 坡度/(°) | 坡向 | 林龄/a | 平均胸径/cm | 平均树高/m | 密度/(株·hm <sup>-2</sup> ) | 郁闭度  | 坡位   | 土壤类型 |
|------|-------|--------|----|------|---------|--------|--------------------------|------|------|------|
| 1    | 2 119 | 18     | NE | 26   | 12.3    | 11.0   | 3 582                    | 0.60 | 中坡山地 | 山地红壤 |
| 2    | 2 178 | 20     | NE | 25   | 11.0    | 10.4   | 3 390                    | 0.65 | 中坡山地 | 山地红壤 |
| 3    | 2 156 | 19     | NE | 26   | 12.1    | 10.0   | 3 436                    | 0.73 | 中坡山地 | 山地红壤 |

1.2.2 氮沉降处理 依据中国目前氮沉降年增加量[0.05 g/(m<sup>2</sup>·a)]<sup>[16]</sup>和本研究区湿氮沉降量[3.84 g/(m<sup>2</sup>·a)],结合中国到 2000 年平均氮沉降量[2.11~6.35 g/(m<sup>2</sup>·a)]<sup>[17]</sup>、华西南屏区氮沉降量[9.50 g/(m<sup>2</sup>·a)]<sup>[18]</sup>以及西南地区干沉降量[0.60~5.46 g/(m<sup>2</sup>·a)]<sup>[19]</sup>,同时参照中国已开展的氮沉降试验,如重庆三峡保护区<sup>[20]</sup>、川西亚高山森林区<sup>[12]</sup>和黔南喀斯特生态保护林区<sup>[21]</sup>等地区的氮沉降量水平。本试验以 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 为氮源分别设置了 4 个氮沉降水平:对照[CK,0 g/(m<sup>2</sup>·a)],低氮[LN,10 g/(m<sup>2</sup>·a)],中氮[MN,20 g/(m<sup>2</sup>·a)]和高氮[HN,25 g/(m<sup>2</sup>·a)],每个水平设置 3 个重复。施氮方法具体为:将各氮水平所需 CO(NH<sub>2</sub>)<sub>2</sub> 溶解至 1 L 去离子水中,用喷雾器在 3 个水平样方上方 50 cm 高来回均匀喷洒,对照组同时段喷洒 1 L 去离子水。于 2021 年 7 月至 2022 年 8 月中旬每两个月按上述操作施氮(因疫情影响,2022 年 2 月未施氮),共计 6 次。

1.2.3 样品采集和指标测定 于 2021 年 8 月至 2022 年 9 月中旬每两个月采集一次土壤样品(因疫情影响,2022 年 3 月未采集土壤样品),分为 0—5,

5—10,10—20 cm 共 3 个土层,共计 6 次。每个样方用土钻以随机数字定位法随机取 5 钻后混合,并剔除土样中的石砾、根系等杂物,置于无菌袋中,带回实验室,其中一部分鲜土保存(4℃)用于测定土壤硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)和铵态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N),另一部分自然风干后过 2,0.25 mm 筛用于测定土壤化学性质和酶活性。

土壤 pH 值采用电极电位法(1:2.5 土水比)测定、土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定、土壤全氮(TN)采用半微量凯氏定氮法(LY/T1228—1999)测定、土壤全磷(TP)采用硫酸—过氧化氢消煮钼锑抗比色法(LY/T1228—1999)测定、土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 采用紫外分光光度法测定、土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 采用氯化钾浸提连续流动分析(SEAL Analytical AA3)测定<sup>[22]</sup>。

土壤蔗糖酶(Inv)活性采用 3,5—二硝基水杨酸比色法、土壤脲酶(Ure)活性采用靛酚蓝比色法、土壤酸性磷酸酶(ACP)活性采用磷酸苯二钠比色法、土壤过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法<sup>[23-24]</sup>。具体测定所用的基质、培养条件和测定产物详见表 2。

表 2 土壤酶活性测定的基质、培养条件和测定产物

Table 2 Substrates, incubation conditions and assay products for soil enzyme activity assays

| 名称    | 基质    | 培养温度/℃ | 培养时间   | 测定产物  |
|-------|-------|--------|--------|---|
| 蔗糖酶   | 蔗糖    | 37     | 24 h   | 葡萄糖/(mg·g <sup>-1</sup> ·24 h <sup>-1</sup> )                           |
| 脲酶    | 尿素    | 37     | 24 h   | NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> /(mg·g <sup>-1</sup> ·24 h <sup>-1</sup> ) |
| 酸性磷酸酶 | 磷酸苯二钠 | 37     | 24 h   | 苯酚/(mg·g <sup>-1</sup> ·24 h <sup>-1</sup> )                            |
| 过氧化氢酶 | 过氧化氢  | 25     | 20 min | 高锰酸钾/(mg·g <sup>-1</sup> ·20 min <sup>-1</sup> )                        |

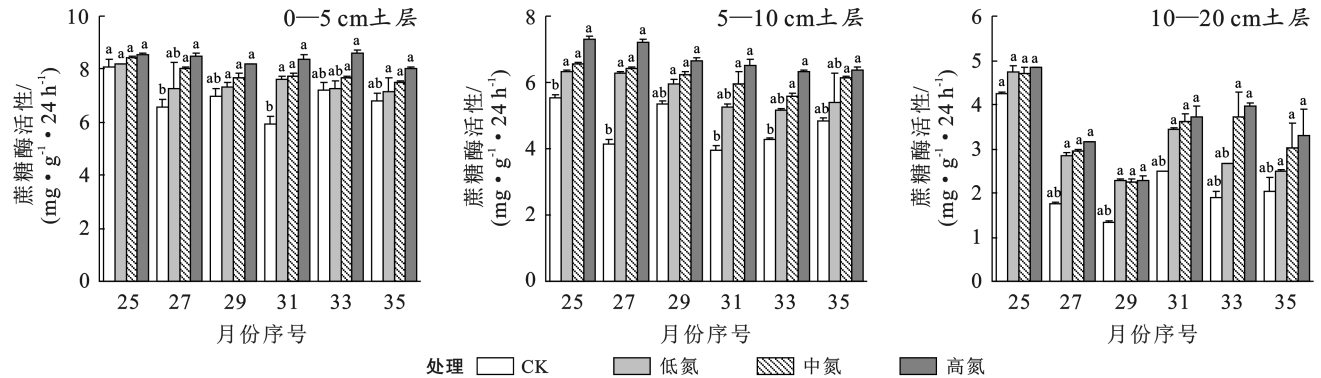
1.2.4 数据统计与分析 数据整理和图表绘制采用 Excel 2019 和 Origin 2021, 数据分析采用 SPSS 27。采用单因素方差分析法(one-way ANOVA)和最小显著差异法(LSD)分析土壤酶活性和土壤化学性质在同一土层不同氮沉降水平的差异性( $\alpha=0.05$ ), 采用重复测量方差分析法(repeated measures ANOVA)分析土层深度、氮沉降时间与氮沉降水平对土壤酶活性的影响; 采用 Pearson 法分析土壤酶活性之间的相关关系; 采用联川生物云平台(<https://www.omicstudio.cn/>)绘制土壤酶活性和土壤化学性质之间相关性网络拓补图。

## 2 结果与分析

### 2.1 氮沉降对土壤酶活性的影响

持续不同氮沉降水平下 4 种土壤酶活性的变化较大(图 1—4)。土壤蔗糖酶和酸性磷酸酶活性

在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层的多个氮沉降时间中随氮沉降水平增加逐渐提高, 分别在 [1.76~8.53 mg/(g·24 h)] 和 [1.69~3.95 mg/(g·24 h)] 范围内波动。各氮沉降水平下土壤蔗糖酶活性相较于 CK, 增幅分别为 16.94%, 24.75% 和 34.00%, 其中在 HN 处理的促进作用最大( $p<0.05$ ); 土壤酸性磷酸酶活性相较于 CK, 降幅依次减小, 分别为 16.63%, 13.61% 和 6.83%。土壤脲酶和过氧化氢酶活性在 0—5, 5—10, 10—20 cm 土层的多个氮沉降时间中随氮沉降水平增加逐渐降低, 分别在 [0.13~1.16 mg/(g·24 h)] 和 [0.46~2.28 mg/(g·20 min)] 范围内波动, 各氮沉降水平处理下土壤脲酶和过氧化氢酶活性相较于 CK, 降幅分别为 8.70%, 18.12%, 27.18% 和 9.26%, 15.11%, 23.36%。在各氮沉降水平处理中, 土壤脲酶和过氧化氢酶活性均在 HN 处理的抑制作用最大( $p<0.05$ )。



注:图中横坐标表示氮沉降后第 25(2021 年 8 月), 27(2021 年 10 月), 29(2021 年 12 月), 31(2022 年 4 月), 33(2022 年 6 月)和 35(2022 年 8 月)个月各次测定值;不同小写字母表示同一土层相同时间不同氮沉降水平下差异显著( $p<0.05$ ), 下同。

图 1 氮沉降下不同土层蔗糖酶活性的变化特征

Fig.1 Characteristics of invertase activity in different soil layers under nitrogen deposition

同一氮沉降水平处理水平, 不同土层深度的蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性表现为随土层深度增加逐渐降低( $p<0.05$ )。0—5 cm 土层土壤蔗糖酶活性相较于 5—10 cm 和 10—20 cm 土层高出 31.53%~149.06%; 对于土壤脲酶活性, 则高出

19.17%~53.23%; 酸性磷酸酶活性高出 23.25%~35.07%; 过氧化氢酶活性高出 10.37%~27.45% (图 1—4), 其中土壤蔗糖酶在不同土层之间的差异最大, 土壤过氧化氢酶在不同土层之间差异最小。而土壤脲酶和酸性磷酸酶在不同土层之间差异不大。

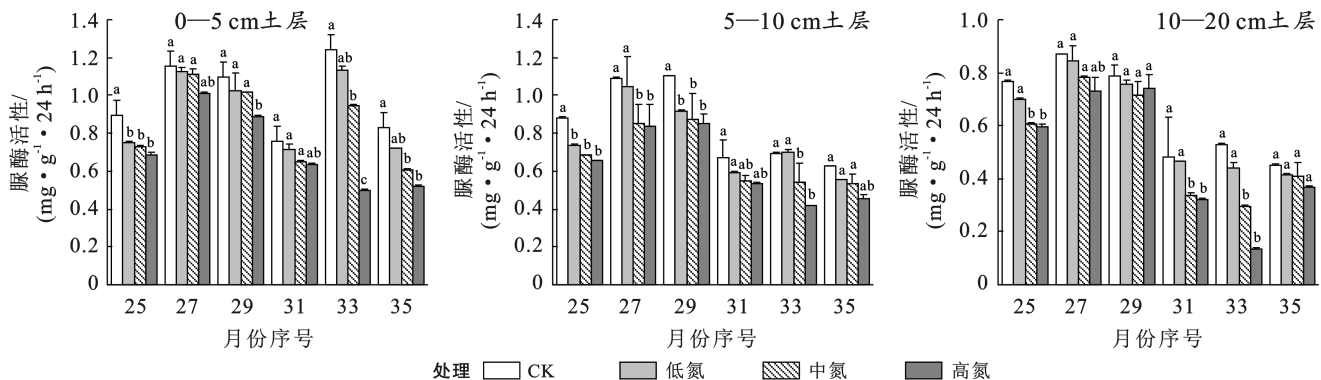


图 2 氮沉降下不同土层脲酶活性的变化特征

Fig.2 Characteristics of urease activity in different soil layers under nitrogen deposition

土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性均呈现了显著的时间差异( $p < 0.05$ )。基本呈现为雨季高,干季低(图 1—4)。氮沉降后,土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性的时间分异规律没有发生显著变化,土壤蔗糖酶和脲酶活性最高值分别出现在氮沉降后第 25 个月(2021 年 8 月)和 27 个月(2021 年 10 月),分别为 $[6.45 \text{ mg}/(\text{g} \cdot 24 \text{ h})]$ 和

$[0.96 \text{ mg}/(\text{g} \cdot 24 \text{ h})]$ ,比其他时期分别高出 18.96%~23.91%,6.38%~76.78%;土壤酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性最高值出现时间一致,分别出现在氮沉降后第 33 个月(2022 年 6 月),分别为 $[2.76 \text{ mg}/(\text{g} \cdot 24 \text{ h})]$ 和 $[1.91 \text{ mg}/(\text{g} \cdot 20 \text{ min})]$ ,比其他时期分别高出 2.86%~33.30%,14.73%~88.10%。土壤过氧化氢酶活性在不同氮沉降时间之间波动最大。

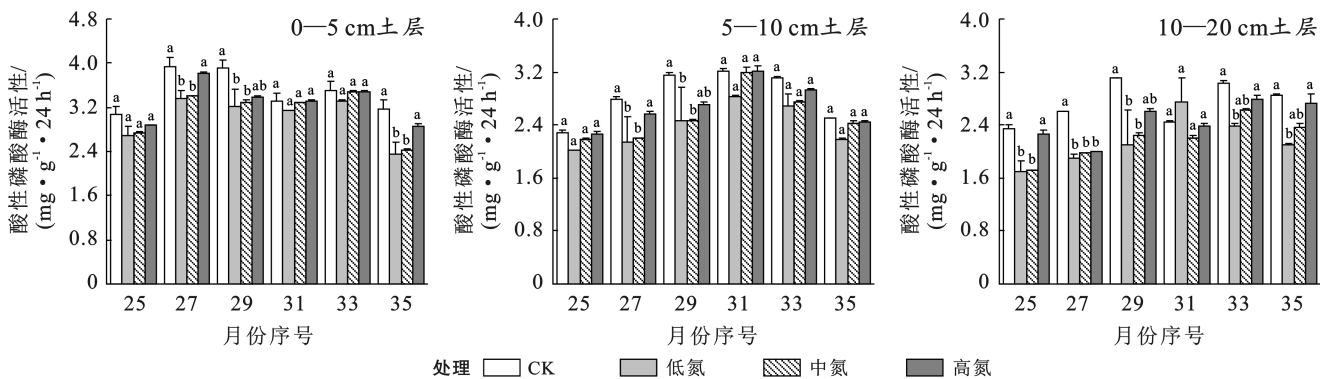


图 3 氮沉降下不同土层酸性磷酸酶活性的变化特征

Fig.3 Characteristics of acid phosphatase activity in different soil layers under nitrogen deposition

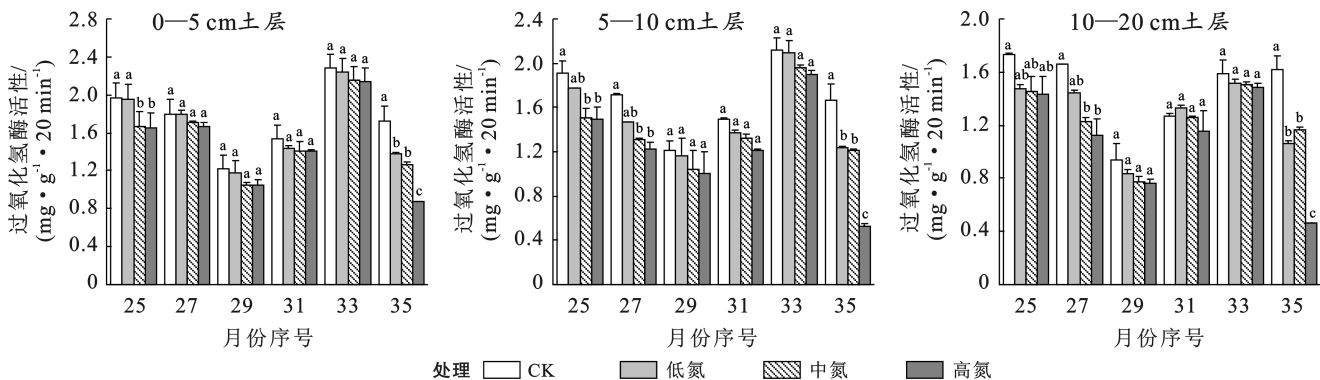


图 4 氮沉降下不同土层过氧化氢酶活性的变化特征

Fig.4 Characteristics of catalase activity in different soil layers under nitrogen deposition

由表 3 可以看出,氮沉降水平、氮沉降时间和土层深度对土壤蔗糖酶、脲酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶活性影响显著( $p < 0.05$ ),其中,氮沉降水平和氮沉降时间是过氧化氢酶活性的最大影响因素( $p < 0.05$ ),土层深度是蔗糖酶活性的最大影响因素

( $p < 0.05$ )。土层深度与氮沉降时间的交互作用对蔗糖酶、酸性磷酸酶和过氧化氢酶的活性影响显著( $p < 0.05$ ),而对土壤脲酶影响不显著( $p > 0.05$ )。而其余二者和三者交互作用对土壤酶活性无显著影响( $p > 0.05$ )。

表 3 氮沉降水平、氮沉降时间和土层深度及其交互作用对土壤酶活性影响的重复测量方差分析

Table 3 Repeated measures ANOVA for effects of nitrogen deposition level, nitrogen deposition time and soil depth and their interaction on soil enzyme activity

| 因素                   | 蔗糖酶         | 脲酶       | 酸性磷酸酶     | 过氧化氢酶     |
|----------------------|-------------|----------|-----------|-----------|
| 氮沉降水平                | 15.44***    | 13.31*** | 30.36***  | 41.33***  |
| 氮沉降时间                | 47.10***    | 30.18*** | 40.98***  | 76.25***  |
| 土层深度                 | 1 281.17*** | 72.69*** | 155.76*** | 174.06*** |
| 土层深度 * 氮沉降时间         | 4.54***     | 1.93     | 10.02***  | 9.81***   |
| 土层深度 * 氮沉降水平         | 0.07        | 0.13     | 1.05      | 0.75      |
| 氮沉降时间 * 氮沉降水平        | 1.16        | 1.30     | 1.54      | 2.46      |
| 土层深度 * 氮沉降时间 * 氮沉降水平 | 0.22        | 0.20     | 0.85      | 1.50      |

注:表中\*,\*\*,\*\*\*分别表示在 $p < 0.05$ , $p < 0.01$ , $p < 0.001$ 水平下差异显著。

### 2.2 氮沉降对土壤化学性质的影响

由表 4 可以看出,各土壤化学性质均表现为 0—5 cm > 5—10 cm > 10—20 cm ( $p < 0.05$ ),其中土壤 SOC, TN 和  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  在 3 个土层间的差异最大,分别为 21.00%~59.23%, 31.75%~57.03% 和 38.57%~72.90%。在不同氮沉降水平下,氮沉降对土壤化学性质均有显著影响 ( $p < 0.05$ ),其中土壤 pH 值, SOC 和 TP 随氮沉降水平增加而降低,总体表现为 CK > LN > MN > HN,各氮处理相较于 CK 分别低 9.44%

~12.30%, 26.86%~51.11% 和 35.24%~48.83%。土壤 TN 随氮沉降水平增加而增加,总体表现为 HN > MN > LN > CK,各氮处理相较于 CK 分别高 18.90%~39.92%。氮沉降下土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  呈先增加后降低的趋势,总体表现为 MN > LN > CK > HN,在中氮达到最高值,相较于 CK 高 132.30%;土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  呈先降低后增加,再降低的趋势,总体表现为 CK > HN > MN > LN,各氮处理相较于 CK 低 12.25%~22.94%。

表 4 氮沉降下不同土层土壤化学性质的变化特征

Table 4 Characteristic changes in soil chemical properties in different soil horizons under nitrogen deposition

| 处理 | pH 值                     |                         |                         | SOC/(g · kg <sup>-1</sup> ) |                          |                          | TN/(g · kg <sup>-1</sup> ) |                         |                         |
|----|--------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------------|--------------------------|--------------------------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
|    | 0—5 cm                   | 5—10 cm                 | 10—20 cm                | 0—5 cm                      | 5—10 cm                  | 10—20 cm                 | 0—5 cm                     | 5—10 cm                 | 10—20 cm                |
| CK | 4.58±0.11 <sup>Ba</sup>  | 4.90±0.19 <sup>Aa</sup> | 5.00±0.19 <sup>Aa</sup> | 31.24±3.92 <sup>Aa</sup>    | 22.28±1.49 <sup>Ba</sup> | 15.18±1.33 <sup>Ca</sup> | 0.62±0.06 <sup>Ab</sup>    | 0.43±0.06 <sup>Ab</sup> | 0.31±0.03 <sup>Bb</sup> |
| LN | 4.26±0.15 <sup>Bab</sup> | 4.44±0.16 <sup>Ab</sup> | 4.42±0.13 <sup>Ab</sup> | 19.35±2.08 <sup>Ab</sup>    | 17.75±1.93 <sup>Bb</sup> | 13.16±1.29 <sup>Cb</sup> | 0.69±0.05 <sup>Ab</sup>    | 0.51±0.05 <sup>Ab</sup> | 0.41±0.05 <sup>Bb</sup> |
| MN | 4.04±0.13 <sup>Bb</sup>  | 4.36±0.13 <sup>Ab</sup> | 4.38±0.10 <sup>Ab</sup> | 15.52±1.58 <sup>Ac</sup>    | 13.55±1.52 <sup>Bc</sup> | 10.80±0.62 <sup>Cc</sup> | 0.72±0.06 <sup>Aa</sup>    | 0.56±0.06 <sup>Aa</sup> | 0.47±0.04 <sup>Ba</sup> |
| HN | 4.00±0.14 <sup>Bb</sup>  | 4.34±0.13 <sup>Ab</sup> | 4.35±0.07 <sup>Ab</sup> | 12.29±0.65 <sup>Ac</sup>    | 11.21±0.63 <sup>Bc</sup> | 10.09±0.63 <sup>Cc</sup> | 0.76±0.05 <sup>Aa</sup>    | 0.63±0.06 <sup>Aa</sup> | 0.54±0.06 <sup>Ba</sup> |

| 处理 | TP/(g · kg <sup>-1</sup> ) |                         |                          | $\text{NO}_3^- \text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ |                          |                          | $\text{NH}_4^+ \text{-N}/(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1})$ |                          |                         |
|----|----------------------------|-------------------------|--------------------------|--|--------------------------|--------------------------|--|--------------------------|-------------------------|
|    | 0—5 cm                     | 5—10 cm                 | 10—20 cm                 | 0—5 cm   | 5—10 cm                  | 10—20 cm                 | 0—5 cm   | 5—10 cm                  | 10—20 cm                |
| CK | 2.58±0.80 <sup>Aa</sup>    | 2.11±0.71 <sup>Ba</sup> | 2.04±0.68 <sup>Ba</sup>  | 0.82±0.25 <sup>Aa</sup>                                    | 0.47±0.12 <sup>Ba</sup>  | 0.36±0.09 <sup>Ba</sup>  | 9.93±1.26 <sup>Aa</sup>                                    | 7.45±0.77 <sup>Ba</sup>  | 6.57±0.91 <sup>Ba</sup> |
| LN | 1.85±0.63 <sup>Ab</sup>    | 1.39±0.45 <sup>Ab</sup> | 1.12±0.24 <sup>Bab</sup> | 1.33±0.41 <sup>Ab</sup>                                    | 1.07±0.31 <sup>Bab</sup> | 0.90±0.29 <sup>Bab</sup> | 7.19±0.47 <sup>Aa</sup>                                    | 6.04±0.53 <sup>ABa</sup> | 5.22±0.63 <sup>Ba</sup> |
| MN | 1.64±0.50 <sup>Ab</sup>    | 1.03±0.27 <sup>Ab</sup> | 1.00±0.16 <sup>Bb</sup>  | 1.53±0.41 <sup>Ab</sup>                                    | 1.26±0.35 <sup>Bb</sup>  | 1.04±0.33 <sup>Bb</sup>  | 7.92±0.58 <sup>Ab</sup>                                    | 6.83±0.50 <sup>ABa</sup> | 6.26±0.56 <sup>Ba</sup> |
| HN | 1.49±0.43 <sup>Ab</sup>    | 0.99±0.21 <sup>Ab</sup> | 0.96±0.17 <sup>Bb</sup>  | 0.78±0.24 <sup>Ab</sup>                                    | 0.42±0.11 <sup>Bb</sup>  | 0.29±0.08 <sup>Bb</sup>  | 6.99±0.49 <sup>Aa</sup>                                    | 6.01±0.45 <sup>ABa</sup> | 5.18±0.62 <sup>Ba</sup> |

注:表中数据为氮沉降后第 25, 27, 29, 31, 33, 35 个月各次测定的平均值±标准误;不同大写字母表示同一氮沉降水平不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同一土层不同氮沉降水平间差异显著 ( $p < 0.05$ ); pH 值为酸碱度; SOC 为土壤有机碳; TN 为全氮; TP 为全磷;  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  为硝态氮;  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  为铵态氮。下同。

### 2.3 土壤酶活性之间及其与土壤化学性质之间相关性分析

相关性分析表明(表 5):土壤 Inv, Ure, ACP 和 CAT 之间相关性较强。相关性网络拓扑图分析表明(图 5),土壤 pH 值与 Inv 呈正相关,与 Ure, ACP 和 CAT 呈负相关;土壤 SOC 与 Ure, ACP 和 CAT 呈正相关,与 Inv 呈负相关,其中 Ure 和 CAT 对 SOC 的响应最敏感;土壤 TN 与 Inv 和 ACP 呈正相关,与 Ure 和 CAT 呈负相关,其中 Inv 对 TN 的响应最敏感;土壤 TP 与 Inv 呈负相关,与 Ure, ACP 和 CAT 呈正相关,且 Ure 和 CAT 对 TP 的响应最敏感;土壤  $\text{NO}_3^- \text{-N}$  与 Inv, Ure 和 CAT 呈正相关,与 ACP 呈负相关;土壤  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  与 4 种酶均呈正相关,其中 Ure, ACP 和 CAT 对  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$  响应最敏感。

表 5 氮沉降下土壤酶活性间的相关性分析结果

Table 5 Results of correlation analysis between soil enzyme activities under nitrogen deposition

| 土壤酶   | 蔗糖酶     | 脲酶      | 酸性磷酸酶  | 过氧化氢酶 |
|-------|---------|---------|--------|-------|
| 蔗糖酶   | 1       |         |        |       |
| 脲酶    | 0.612*  | 1       |        |       |
| 酸性磷酸酶 | 0.712** | 0.758** | 1      |       |
| 过氧化氢酶 | 0.469   | 0.955** | 0.702* | 1     |

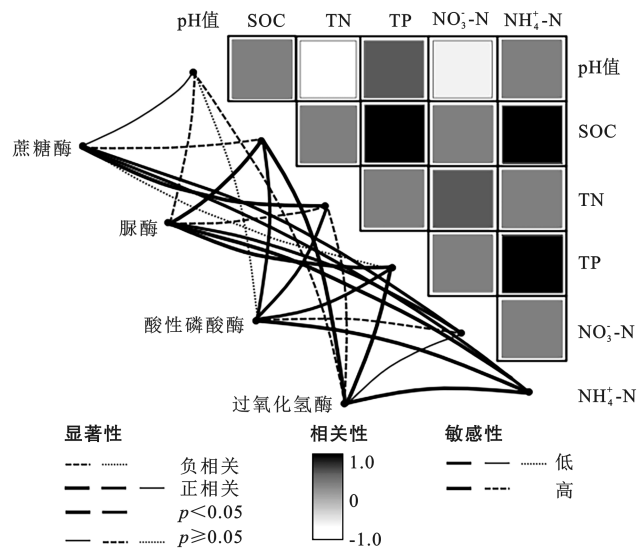


图 5 氮沉降下土壤酶活性与土壤化学性质的相关性网络拓扑图

Fig.5 Network topology of correlation between soil enzyme activities and soil chemical properties under nitrogen deposition

## 3 讨论

### 3.1 土壤酶活性对持续氮沉降的响应特征

氮沉降能为土壤直接提供氮源,引起土壤中各种

营养元素含量变化,改变微生物和植物根系活性,从而影响土壤酶活性。土壤蔗糖酶直接参与土壤有机物的代谢和糖类的释放过程,是表征土壤碳素循环速度的重要指标。本研究中,氮沉降促进了 Inv 活性,原因可能是有机质作为 Inv 的底物,底物丰富度可以增加与碳相关微生物对 Inv 的活性和表达,氮沉降使 Inv 作用的底物多样性增加,从而提高了 Inv 活性;还可能是由于本研究与其他研究的林分密度不同<sup>[25]</sup>,不同林分密度土壤通气性和水分状况存在差异,影响凋落物输入量以及微生物对土壤有机质的分解速率,从而使 Inv 活性促进或抑制。土壤脲酶通过加速尿素分解,促进有机氮向无机氮的转化过程,从而影响了土壤中氮的有效性。本研究中氮沉降抑制了 Ure 活性,可能是因为土壤氮含量随着氮沉降水平的增加逐渐提高,土壤生态系统生物活性降低,土壤氮矿化速率降低,对氮的吸收能力减弱,导致氮素的积累,导致 Ure 活性降低。土壤酸性磷酸酶 ACP 能够矿化有机磷,可反映磷的转化效率。本研究得出,ACP 活性随氮沉降水平增加逐渐提高,多种生态系统的研究也表明氮沉降能促进 ACP 活性<sup>[26-27]</sup>。原因可能是氮沉降减少了微生物对氮的需求,转而增加对碳和磷的需求,因而使得水解酶 ACP 活性升高。土壤过氧化氢酶 CAT 可反映土壤腐殖质化、有机质化的强度和速度。本研究中,氮沉降抑制了 CAT 活性,可能是由于与其他研究区的氮浓度不同<sup>[28-29]</sup>,高氮肥环境下产生了大量的氮代谢产物,氮代谢过程中产生的氨和硝酸盐等氮化合物在高浓度下会具有毒性,这些氮代谢产物可能会与 CAT 结合或改变其结构,从而抑制其活性。

从氮沉降时间格局上看,季节的交替会改变氮沉降对微生物和植物的生物量分配,影响土壤中生物化学过程。本研究中 Inv, Ure, ACP 和 CAT 活性均在湿季(2021年8月和10月;2022年6月和8月)达到最高值。原因可能是湿季通常伴随着较高的降水量,这会使土壤湿度增加,有利于提高理化性质和微生物活性;同时,土壤中有机物质分解速率增加,会产生各种碳源,这些产物可以作为土壤酶的底物,从而促进土壤酶活性。本研究中,Inv, Ure, ACP 和 CAT 活性均随土层深度加深而逐渐降低,氮沉降下土壤酶活性的垂直分布格局并未改变。这与王丽君等<sup>[30]</sup>对马尾松(*Pinus massoniana*)—栓皮栎(*Quercus variabilis*)混交林和徐雷等<sup>[31]</sup>对杉木(*Cunninghamia lanceolata*)林在氮沉降后土壤酶活性的垂直性变化研究结果一致。这主要是因为随着土层深度的加深,土壤生物量降低,土壤容重也随着降低所致。Inv 活性在

不同土层之间差异最大,这主要是因为碳水解酶 Inv 可直接影响凋落物的降解速率和有机质的释放过程。一般情况下表层土壤凋落物量和微生物丰富度较高,有机质含量丰富,分泌 Inv 的微生物直接参与有机质的分解过程,进而使 Inv 活性在不同土层之间存在较大差异。本研究中土层深度和氮沉降时间的交互作用对 Inv, ACP 和 CAT 影响显著( $p < 0.05$ ),而对 Ure 影响不显著( $p > 0.05$ )。原因可能是土壤中与氮水解酶相关的微生物分解者对当前氮环境已适应,持续氮沉降对有关微生物的刺激作用不大。

### 3.2 土壤化学性质对持续氮沉降的响应特征及其与酶活性的关系

土壤化学性质是影响生化过程的关键因素。本研究中土壤 pH 和 SOC 随氮沉降水平的增加逐渐降低,土壤 TN 则逐渐增加。这可能是因为过量的氮素导致硝化作用形成了硝酸盐和  $H^+$ ,引起土壤酸化;而氮沉降会通过促进活性碳的分解,提高矿化速率来降低 SOC 的积累。另外,氮的输入通过  $N_2O$  排放等形式产生的氮损失不足以抵消,从而使土壤 TN 含量提高。这与前人结论一致<sup>[32]</sup>。本研究还发现,氮沉降降低了土壤 TP,这与亚热带气候区的森林主要以磷限制为主的研究结论一致<sup>[28]</sup>。但王小南等<sup>[29]</sup>与吕来新等<sup>[33]</sup>的研究中氮沉降对土壤 TP 没有影响,不同结论的原因可能与土壤种类有关,因为不同类型的土壤具有不同的化学和生物学特性,会影响土壤中磷的吸附和解吸过程,从而影响了土壤 TP 的变化。土壤  $NO_3^-$ -N 和  $NH_4^+$ -N 在 MN 出现单峰模式后在 HN 降低,则主要由于 HN 会使氮化合物通过硝化作用和反硝化作用转化为其他形式的氮组成所致。

不同土壤化学性质通过影响微生物对养分的获取,进而调节酶的分泌来影响土壤酶的活性。本研究发现,土壤酶之间的相关性较强,使得分泌水解酶 Inv, Ure, ACP 和 CAT 的微生物协作性较高,影响土壤养分循环。土壤 TN 是影响 Inv 活性的主要环境因子, SOC, TP 和  $NH_4^+$ -N 是影响 Ure 和 CAT 活性的主要环境因子。由于土壤动物—植物—微生物的相互作用,氮沉降的增加可能会导致微生物分泌酶活性和获取养分差异;同时土壤酶化学计量比和土壤养分化学计量比也可能存在动态平衡关系。因此,土壤酶活性的变异是多因子综合作用的结果。由于亚热带气候区的森林主要以磷限制为主<sup>[28]</sup>,未来的研究可以结合氮磷添加及微生物过程和养分化学计量比,进一步探讨氮沉降增加背景下亚热带森林土壤养分动态。

## 4 结论

(1) 水解酶 Inv, Ure, ACP 和氧化酶 CAT 活性以及土壤化学性质 (pH, SOC, TN, TP,  $\text{NO}_3^-$ -N,  $\text{NH}_4^+$ -N) 均表现为 0—5 cm > 5—10 cm > 10—20 cm, 氮沉降并没有改变垂直分布特征。

(2) Inv, Ure, ACP 和 CAT 均在湿季 (2021 年 8 月和 10 月; 2022 年 6 月和 8 月) 达到最高值, 土壤酶活性对季节变化的响应要高于目前持续氮沉降的时间。

(3) 氮沉降会导致土壤 pH 值, SOC, TP 降低 (9.44% ~ 12.30%, 26.86% ~ 51.11% 和 35.24% ~ 48.83%), 会使 TN 增加 (18.90% ~ 39.92%); 氮沉降提高了 Inv 和 ACP 活性 (16.94% ~ 34.00%, 23.42% ~ 40.09%), 抑制了 Ure 和 CAT 的活性 (8.70% ~ 27.18%, 9.26% ~ 23.36%)。长期氮沉降降低了土壤 TP 含量使滇中亚高山华山松林出现磷限制, Inv 活性的提高将促进土壤有机质的分解和周转。氮沉降增加背景下, 土壤酶活性变化是多因子综合作用的结果。其中, 土壤 TN 是影响 Inv 活性的主要环境因子, SOC, TP 和  $\text{NH}_4^+$ -N 是影响 Ure 和 CAT 活性的主要环境因子。

## 参考文献 (References)

- [1] 常婕, 居新, 伊李凯, 等. 不同水平氮添加下华北盐渍化草地根际土壤阴阳离子特征 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 212-218.  
Chang Jie, Ju Xin, Yi Likai, et al. Characteristics of anion and cation in rhizosphere soil of saline grassland in North China under different nitrogen addition levels [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 212-218.
- [2] 王坚强, 闫素仙, 李慧明, 等. 不同时期水氮调控下高粱根系生理特征 [J]. 山西农业大学学报 (自然科学版), 2024, 44(1): 24-33.  
Wang Jianqiang, Yan Suxian, Li Huiming, et al. Physiological characteristics of sorghum root systems under water and nitrogen regulation at different stages [J]. Journal of Shanxi Agricultural University (Natural Science Edition), 2024, 44(1): 24-33.
- [3] Galloway J N, Townsend A R, Erisman J W, et al. Transformation of the nitrogen cycle: Recent trends, questions, and potential solutions [J]. Science, 2008, 320(5878): 889-892.
- [4] 贺凌云, 陈伏生, 郑志宇, 等. 氮磷添加对常绿阔叶林土壤团聚体有机碳及其与磷组分相关的影响 [J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 377-386.  
He Lingyun, Chen Fusheng, Zheng Zhiyu, et al. Effects

of nitrogen and phosphorus additions on aggregate-associated soil carbon and interactions with phosphorus fractions in evergreen broad-leaved forest [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 377-386.

- [5] Galloway J, Aber J, Erisman J, et al. The nitrogen cascade [J]. Bioscience, 2003, 53(4): 341-356.
- [6] 沈芳芳, 王彬宇, 姚必达, 等. 高氮负荷森林生态系统对大气氮沉降降低的响应研究进展 [J]. 浙江农林大学学报, 2024, 41(1): 211-222.  
Shen Fangfang, Wang Binyu, Yao Bida, et al. Response of high nitrogen-loaded forest ecosystem to decreasing atmospheric nitrogen deposition: A review [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2024, 41(1): 211-222.
- [7] 申继凯, 黄懿梅, 黄倩, 等. 黄土高原不同植被类型土壤微生物残体碳的积累及其对有机碳的贡献 [J]. 应用生态学报, 2024, 35(1): 124-132.  
Shen Jikai, Huang Yimei, Huang Qian, et al. Accumulation of microbial necromass carbon and their contribution to soil organic carbon in different vegetation types on the Loess Plateau, Northwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(1): 124-132.
- [8] Jian Siyang, Li Jianwei, Chen Ji, et al. Soil extracellular enzyme activities, soil carbon and nitrogen storage under nitrogen fertilization: A meta-analysis [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2016, 101: 32-43.
- [9] DeForest J L, Zak D R, Pregitzer K S, et al. Atmospheric nitrate deposition and the microbial degradation of cellobiose and vanillin in a northern hardwood forest [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 965-971.
- [10] 陈天, 程瑞梅, 王丽君, 等. 氮添加对马尾松人工林土壤团聚体氮矿化及土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2023, 43(16): 6528-6538.  
Chen Tian, Cheng Ruimei, Wang Lijun, et al. Effects of nitrogen addition on the mineralization and enzymatic activities within soil aggregates in *Pinus massoniana* plantation [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(16): 6528-6538.
- [11] 费裕舫, 伍丽华, 陈义堂, 等. 氮添加对杉木凋落物分解过程中酶活性的影响 [J]. 东北林业大学学报, 2023, 51(5): 66-73.  
Fei Yuchong, Wu Lihua, Chen Yitang, et al. Effects of exogenous nitrogen input on enzyme activity during litters decomposition of *Cunninghamia lanceolata* [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2023, 51(5): 66-73.
- [12] 马伟伟, 王丽霞, 李娜, 等. 不同水氮水平对川西亚高山林地土壤酶活性的影响 [J]. 生态学报, 2019, 39(19): 7218-7228.  
Ma Weiwei, Wang Lixia, Li Na, et al. Dynamic effects



- of nitrogen deposition on soil enzyme activities in soils with different moisture content [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019,39(19):7218-7228.
- [13] 余汉基,薛立.森林土壤酶活性对氮沉降的响应[J].世界林业研究,2018,31(1):7-12.  
She Hanji, Xue Li. Responses of forest soil enzymes to nitrogen deposition [J]. *World Forestry Research*, 2018,31(1):7-12.
- [14] 许延琴,周冰倩,刘隋赟昊,等.模拟氮沉降对土壤酶活性和微生物组成的影响[J].生态学报,2023,43(20):8417-8429.  
Xu Yanqin, Zhou Bingqian, Liu S, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activity, microbial community composition and stoichiometric characteristics of short-term enclosed grassland around Urumqi [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(20):8417-8429.
- [15] 侯芳,王克勤,宋娅丽,等.滇中亚高山 5 种典型森林乔木层生物量及碳储量分配格局[J].水土保持研究,2018,25(6):29-35.  
Hou Fang, Wang Keqin, Song Yali, et al. Biomass of tree layer and distribution of carbon storage in five typical forest types in subalpine of middle of Yunnan Province [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2018,25(6):29-35.
- [16] 肖春艳,胡情情,陈晓舒,等.基于文献计量的大气氮沉降研究进展[J].生态学报,2023,43(3):1294-1307.  
Xiao Chunyan, Hu Qingqing, Chen Xiaoshu, et al. Research progress of atmospheric nitrogen deposition based on bibliometrics [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(3):1294-1307.
- [17] 陆姣云,张鹤山,田宏,等.氮沉降影响草地生态系统土壤氮循环过程的研究进展[J].草业学报,2022,31(6):221-234.  
Lu Jiaoyun, Zhang Heshan, Tian Hong, et al. Research progress on effects of nitrogen deposition on soil nitrogen cycling in grassland ecosystems [J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2022,31(6):221-234.
- [18] 铁烈华,张仕斌,熊梓岑,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.  
Tie Liehua, Zhang Shibin, Xiong Zicen, et al. Effects of simulated nitrogen and sulfur deposition on lignin degradation during foliar litter decomposition in evergreen broad-leaved forest in the rainy area of West China [J]. *Forest Research*, 2019,32(2):25-31.
- [19] 周慧娴,沈傲,崔寅平,等.区域氮干沉降分布特征的数值模拟[J].环境科学学报,2022,42(10):129-137.  
Zhou Huixian, Shen Ao, Cui Yinping, et al. Numerical simulation of distribution characteristics of regional nitrogen dry deposition [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022,42(10):129-137.
- [20] 张六一.三峡库区大气氮沉降特征、通量及其对水体氮素的贡献[D].重庆:中国科学院大学(中国科学院重庆绿色智能技术研究院),2019.  
Zhang Liuyi. Atmospheric nitrogen deposition in the Three Gorges Reservoir area: characteristics, fluxes, and contributions to the aquatic environment [D]. Chongqing: Chongqing Institute of Green and Intelligent Technology, Chinese Academy of Sciences, 2019.
- [21] 赵文君,刘永涛,谭成江,等.模拟氮沉降对喀斯特原生乔木林土壤氮矿化的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(7):124-131.  
Zhao Wenjun, Liu Yongtao, Tan Chengjiang, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen mineralization in Karst primary forest [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021,41(7):124-131.
- [22] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.  
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [23] 黄路婷,刘济明,李佳,等.氮添加对米槁林下土壤养分及酶活性的影响[J].中南林业科技大学学报,2021,41(6):122-130.  
Huang Luting, Liu Jiming, Li Jia, et al. Effects of nitrogen addition on soil nutrients and enzyme activities under *Cinnamomum migao* forest [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2021,41(6):122-130.
- [24] 韩翠,康扬眉,余海龙,等.荒漠草原凋落物分解过程中降水量对土壤酶活性的影响[J].生态环境学报,2022,31(9):1802-1812.  
Han Cui, Kang Yangmei, Yu Hailong, et al. Effects of precipitation on soil enzyme activities during litter decomposition in A desert steppe of northwestern China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(9):1802-1812.
- [25] 汪星星,廖文海,孟芳芳,等.林分密度对杉木人工林土壤理化性质和酶活性的影响[J].福建农林大学学报(自然科学版),2023,52(3):329-336.  
Wang Xingxing, Liao Wenhai, Meng Fangfang, et al. Effect of stand density on soil physicochemical properties and enzyme activities of Chinese fir plantations [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 2023,52(3):329-336.
- [26] 黄瑞灵,王西文,马国虎,等.模拟氮沉降对高寒湿地土壤理化性质和酶活性的影响[J].草地学报,2022,30

- (6):1343-1349.
- Huang Ruiling, Wang Xiwen, Ma Guohu, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil physicochemical properties and enzyme activities in alpine wetland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2022,30(6):1343-1349.
- [27] 魏枫,王慧娟,邱秀文,等.模拟氮沉降对樟树人工林土壤酶活性的影响[J].*江苏农业科学*,2019,47(19):129-133.
- Wei Feng, Wang Huijuan, Qiu Xiuwen, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil enzyme activities in *Cinnamomum camphora* plantation [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019,47(19):129-133.
- [28] 夏允,徐玲琳,杨柳明,等.模拟氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤解磷微生物群落和功能潜力的影响[J].*生态学报*,2024,44(4):1727-1736.
- Xia Yun, Xu Linglin, Yang Liuming, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on soil microbial community and functional potential of phosphate-solubilizing microorganisms in a subtropical *Castanopsis carlesii* forest [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2024,44(4):1727-1736.
- [29] 王小南,熊德成,周嘉聪,等.土壤增温和氮沉降对杉木幼树叶片和土壤化学计量特征的影响[J].*应用与环境生物学报*,2022,28(6):1557-1563.
- Wang Xiaonan, Xiong Decheng, Zhou Jiacong, et al. Effects of soil warming and nitrogen deposition on leaf and soil stoichiometric characteristics of *Cunninghamia lanceolata* saplings [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022,28(6):1557-1563.
- [30] 王丽君,程瑞梅,肖文发,等.氮添加对三峡库区马尾松—栓皮栎混交林土壤微生物生物量和酶活性的影响[J].*应用生态学报*,2022,33(1):42-50.
- Wang Lijun, Cheng Ruimei, Xiao Wenfa, et al. Effects of nitrogen addition on soil microbial biomass and enzyme activities of *Pinus massoniana-Quercus variabilis* mixed plantations in the Three Gorges reservoir area [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2022,33(1):42-50.
- [31] 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].福建福州:福建农林大学,2007.
- Xu Lei. Impacts of nitrogen deposition on physical-chemical properties and enzyme activities of soil in Chinese-fir plantation forest [D]. Fuzhou, Fujian: Fujian Agriculture and Forestry University, 2007.
- [32] 邓玉峰,田善义,成艳红,等.模拟氮沉降下施石灰对休耕红壤优势植物根际土壤微生物群落的影响[J].*土壤学报*,2019,56(6):1449-1458.
- Deng Yufeng, Tian Shanyi, Cheng Yanhong, et al. Effects of liming on rhizosphere soil microbial communities of dominant plants in fallowed red soil under simulated nitrogen deposition [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019,56(6):1449-1458.
- [33] 吕来新,宋蕾,刘志理,等.红松人工林土壤酶活性与化学性质对氮添加的响应[J].*环境科学*,2020,41(4):1960-1967.
- Lü Laixin, Song Lei, Liu Zhili, et al. Response of soil enzyme activity and chemical properties to nitrogen addition in a Korean pine plantation [J]. *Environmental Science*, 2020,41(4):1960-1967.
- 的应用与前景[J].*生态学报*,2002,22(1):111-117.
- Cao Yanli, Lu Qi, Lin Guanghui. Review and perspective on hydrogen stable isotopes technique in tracing plant water sources researches [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002,22(1):111-117.
- [30] 宋献方,夏军,于静洁,等.应用环境同位素技术研究华北典型流域水循环机理的展望[J].*地理科学进展*,2002,21(6):527-537.
- Song Xianfang, Xia Jun, Yu Jingjie, et al. The prospect in the research of water cycle at the typical catchments of North China Plain using environmental isotopes [J]. *Progress In Geography*, 2002,21(6):527-537.
- [31] 林光辉.稳定同位素生态学:先进技术推动的生态学新分支[J].*植物生态学报*,2010,34(2):119-122.
- Lin Guanghui. Stable isotope ecology: A new branch of ecology resulted from technology advances [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2010,34(2):119-122.
- (上接第 37 页)
- [27] 李金波,伍红燕,赵斌,等.模拟边坡条件下常见护坡植物苗期根系构型特征[J].*生态学报*,2023,43(24):10131-10141.
- Li Jinbo, Wu Hongyan, Zhao Bin, et al. Root architecture characteristics of common slope protection plants at seedling stage under simulated slope conditions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2023,43(24):10131-10141.
- [28] 党晓宏,高永,汪季,等.砒砂岩沟坡沙棘根系分布特征及其对林下土壤的改良作用[J].*中国水土保持科学*,2012,10(4):45-50.
- Dang Xiaohong, Gao Yong, Wang Ji, et al. Characteristics of root distribution of *Hippophae rhamnoides* L. and its improving effect on the forest soil on the ditch slope of soft sandstone area [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2012,10(4):45-50.
- [29] 曹燕丽,卢琦,林光辉.氢稳定性同位素确定植物水源