

# 模拟氮沉降对毛竹林土壤生化特性和酶活性的影响

陈向峰<sup>1,2</sup>, 刘娟<sup>1,2</sup>, 姜培坤<sup>1,2</sup>, 吴家森<sup>1,2</sup>, 周国模<sup>1,2</sup>, 李永夫<sup>1,2</sup>

(1.浙江农林大学亚热带森林培育国家重点实验室,浙江 临安 311300;

2.浙江农林大学浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室,浙江 临安 311300)

**摘要:**以亚热带毛竹林为研究对象,以长江三角洲地区实际氮沉降量 40 kg/(hm<sup>2</sup>·a)为参照,设置 2 种形态(铵态氮(NH<sub>4</sub>Cl)和硝态氮(KNO<sub>3</sub>))和 3 种水平(对照、低氮和高氮(0,40,120 kg/(hm<sup>2</sup>·a)))的氮添加试验。结果表明:(1)氮添加显著降低了土壤 pH,不同氮水平和形态对 pH 均有显著影响( $P=0.001$ 和 $P=0.010$ );(2)高水平氮处理下,硝态氮处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DON 含量分别高于铵态氮处理的 40.06%和 50.10%,土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量低于铵态氮处理的 12.33%,在同一氮形态下,高氮处理的土壤 NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DON 含量分别高于低氮处理的 47.12%和 78.12%,土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 含量低于低氮处理的 24.24%。说明氮水平和形态均对土壤 NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 和 DON 含量有显著影响( $P<0.05$ );(3)与对照相比,高水平氮处理下土壤脲酶和蔗糖酶活性分别提高了 14.16%和 8.11%,氮形态对土壤脲酶和蔗糖酶活性没有显著影响。氮水平和形态对过氧化氢酶活性均无显著影响( $P>0.05$ );(4)土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均呈现显著的季节变化,脲酶和蔗糖酶活性夏季高,冬季低,春秋居中,过氧化氢酶则秋冬季节较高。氮添加没有改变酶活性的季节分异规律。通过 Pearson 分析发现,土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶)与土壤生化特性显著相关( $P<0.05$ )。氮水平和形态对土壤生化特性和酶活性的影响存在一定差异,研究结果可为氮沉降背景下亚热带毛竹林的管理提供理论依据。

**关键词:**氮水平;氮形态;毛竹林;生化特性;酶活性

中图分类号:S714.3

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0277-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.038

## Effects of Nitrogen Deposition on Soil Biochemical Properties and Enzymes Activities in Moso Bamboo (*Phyllostachys edulis*) Forest

CHEN Xiangfeng<sup>1,2</sup>, LIU Juan<sup>1,2</sup>, JIANG Peikun<sup>1,2</sup>, WU Jiasen<sup>1,2</sup>, ZHOU Guomo<sup>1,2</sup>, LI Yongfu<sup>1,2</sup>

(1.State Key Laboratory of Subtropical Silviculture, Lin'an, Zhejiang 311300; 2.Zhejiang Provincial

Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Lin'an, Zhejiang 311300)

**Abstract:** Taking the subtropical moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest as research object, the soil biochemical properties and enzymes activities were studied using two forms (NH<sub>4</sub>Cl and KNO<sub>3</sub>) and three levels (0,40 and 120 kg / (hm<sup>2</sup>·a)).The results showed that: (1) The nitrogen input reduces the pH of soil, different forms and levels had a significant effect on soil pH ( $P = 0.001$  and  $P = 0.010$ ); (2) Under high nitrogen treatment, nitrate nitrogen of soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and DON differ with ammonium nitrogen of 12.33%, 40.06% and 50.10%. Under the same nitrogen form, high-N treatment of soil NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N and DON differ with ammonium nitrogen of 24.24%, 47.12% and 78.12%. Nitrogen forms and levels had significant effects on soil biochemical properties; (3) Compared with the CK, soil urease and invertase activities were increased by 14.16% and 8.11% under High-N treatment, and nitrogen forms had no significant effect on soil urease and invertase activities. Nitrogen levels and forms had no effect on catalase activity ( $P > 0.05$ ); (4) Soil enzyme activities (urease, inverse and catalase activities) showed significant seasonal variation in bamboo forest. The highest activities of urease and invertase were found in the summer and the lowest activities of urease and invertase were found in the winter. But the highest activities of catalase activity was found in the winter. However, inputs of extraneous N made little different on temporal variation. Through the Pearson method, Soil enzyme activities were significantly correlated with soil biochemical

收稿日期:2020-03-22

资助项目:国家自然科学基金项目(31700540);浙江省重点研发计划项目(2019C02008-03)

第一作者:陈向峰(1993-),女,在读硕士研究生,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail:chenxf91413@163.com

通信作者:刘娟(1978-),女,副教授,硕士生导师,主要从事土壤碳汇与全球气候变化研究。E-mail:liujuan@zafu.edu.cn

properties ( $P < 0.05$ ). The above results show that the effects of nitrogen levels and forms on soil biochemical properties and enzyme activities are different, which can provide a theoretical basis for the management of subtropical moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest under the background of nitrogen deposition.

**Keywords:** N levels; N forms; moso bamboo (*Phyllostachys edulis*) forest; soil biochemical properties; enzyme activities

氮沉降是大气中活性氮化合物通过降雨、降尘等途径降落到地表的过程。由于人为活动的影响,19 世纪 60 年代到 20 世纪 90 年代初,人类活动所产生的活性氮大幅增加,由每年的 15 Tg N 上升到 156 Tg N,2050 年预计将达到 270 Tg N<sup>[1]</sup>。我国现已成为全球氮沉降的三大严重地区之一,年均氮沉降水平从 1980s 的 13.2 kg/(hm<sup>2</sup>·a) 增加到 2000s 的 21.1 kg/(hm<sup>2</sup>·a),局部地区高达 63.5 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[2]</sup>,其中,长江三角洲地区实际氮沉降量达 40 kg/(hm<sup>2</sup>·a)<sup>[3]</sup>。迅速增加的氮沉降已对森林生态系统产生了巨大影响,如氮沉降减少植物多样性、降低凋落物分解速率和改变微生物群落结构等,影响有机质的矿化和腐殖质的形成,显著影响了森林生态系统碳、氮循环<sup>[4]</sup>。

森林土壤酶是森林土壤生化过程的积极参与者,直接参与土壤 C、N 和 P 循环,能快速表征土壤环境的变化,可作为评价土壤质量和养分能力的重要表征<sup>[5]</sup>。土壤酶活性受多种因素的影响,其中,不同林地类型、氮形态和水平对土壤酶活性产生较大的差异。孙宇等<sup>[6]</sup>模拟不同水平(0, 50, 150 kg/(hm<sup>2</sup>·a))氮沉降对湿性常绿阔叶次生林酶活性的影响,结果表明,土壤多酚氧化酶活性随氮沉降水平的提高而降低。张艺等<sup>[7]</sup>对温带森林进行(NH<sub>4</sub>)<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 不同形态的氮添加试验,结果表明,NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N 和 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub>-N 处理都显著增加了 β-葡萄糖苷酶活性,对碱性磷酸酶、多酚氧化酶和过氧化氢酶均无显著性影响( $P > 0.05$ )。目前已开展的模拟氮沉降对土壤酶活性影响的试验主要聚焦于氮水平或氮形态对酶活性影响,而对氮水平、氮形态及其交互作用对土壤酶活性影响的研究较少,亟需通过试验研究加以解决。

毛竹林是一种重要的森林类型,中国现有毛竹林面积 4.43×10<sup>6</sup> hm<sup>2</sup>,占全球毛竹林分布面积的 84.02%<sup>[8]</sup>。目前有关毛竹林氮沉降的研究主要集中在欧美国家的北方森林和温带森林<sup>[9]</sup>,而对处于全球氮沉降高值区的亚热带毛竹林研究较少。因此,本研究开展了不同氮水平、氮形态及其交互作用对土壤生化特性和酶活性影响的试验。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地概况

试验区位于浙江省杭州市临安区青山镇(30°14'N, 119°42'E),该地区为浙江省毛竹主产区之一,地处亚

热带季风气候区,夏季高温多雨,冬季温和少雨,年均降水量 1 450 mm。其平均海拔约 150 m,年平均气温 15.9 °C,日照时间 1 856 h,无霜期 241 天,土壤类型为黄红壤。试验期间(2017 年 11 月至 2019 年 4 月)年累积降水量 1 720.13 mm,月平均气温 18.1 °C(图 1)。

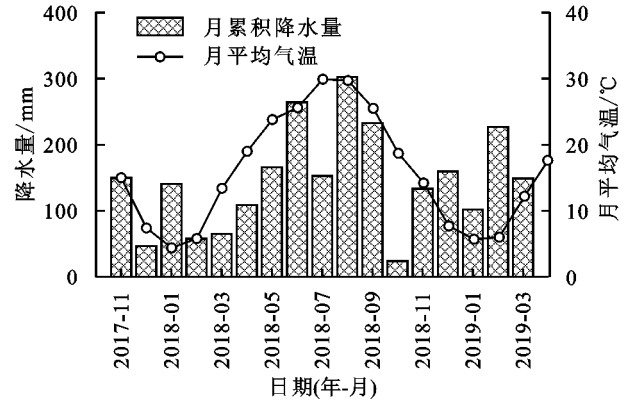


图 1 试验期间月累积降水量和月平均气温

### 1.2 试验设计

选择地理条件(土壤类型、坡度与坡向)基本一致的毛竹林作为试验样地。样地内毛竹林的种植密度约为 3 000 株/hm<sup>2</sup>,毛竹的平均胸径约为 9.1 cm。毛竹林不进行劈山、除草、施肥、垦复等人工措施,林下植被保存较好,主要以香野茉莉(*Styrax odoratissima*)和高粱泡(*Rubus lambertianus* Ser.)为主。外源氮输入水平以长江三角洲地区实际氮沉降量 40 kg/(hm<sup>2</sup>·a)为参照<sup>[3]</sup>,设置 2 种形态(铵态氮(NH<sub>4</sub>Cl)和硝态氮(KNO<sub>3</sub>))和 3 种水平,对照(0, CK)、低氮(40 kg/(hm<sup>2</sup>·a),N40)和高氮(120 kg/(hm<sup>2</sup>·a),N120)的氮添加(低氮和高氮模拟当地氮沉降增加约 1.3 倍)试验。共 5 个处理,分别为:对照(CK)、低硝态氮(N40)、高硝态氮(N120)、低铵态氮(N40)和高铵态氮(N120);每个处理设置 3 次重复。试验采用完全随机设计,共 15 个小区,每个试验小区面积为 100 m<sup>2</sup>(10 m×10 m),相邻小区之间设置 5 m 的缓冲隔离带。试验时间为 2017 年 11 月至 2019 年 4 月,每月初将氮溶于 5 L 的自来水中,在相应样地内均匀喷施,同时在对照小区内喷洒等量的自来水。

### 1.3 样品的采集与测定

每月下旬采用五点取样法采集表层(0—20 cm)土壤样品,带回实验室,土壤样品充分混匀后过 2 mm 筛,用镊子除去可见的细根,一部分新鲜土样放入 4 °C 冰箱内冷藏保存,一部分土壤进行风干。

土壤 pH 采用 pH 计法(水土比为 1:2.5)测定。土壤铵态氮采用氯化钾浸提—靛酚蓝比色法测定,硝态氮采用双波长紫外分光光度法测定。土壤微生物生物量碳、氮的测定参照 Wu 等<sup>[10]</sup>的方法。土壤可溶性有机碳、氮的测定参照 Wang 等<sup>[11]</sup>的方法,称取土壤样品 20.00 g,加入 40 mL 蒸馏水(水土比为 1:2),100 r/min 恒温(25 °C)振荡 30 min,离心 20 min(3 000 r/min),用 0.45 μm 滤膜抽滤,用有机碳分析仪(TOC—VCPH,岛津公司)测定滤液中有有机碳、氮含量。

土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性分别采用苯酚—次氯酸钠比色法、3,5—二硝基水杨酸比色法和高锰酸钾滴定法<sup>[12]</sup>测定。脲酶活性和蔗糖酶活性采用单位时间内 1 g 烘干土中土壤酶消耗特定底物(或是生成特定底物)的质量表示,过氧化氢酶活性采用单位时间内 1 g 烘干土中土壤酶消耗的 0.02 mol/L 的  $\text{KMnO}_4$  的体积表示。

#### 1.4 数据分析

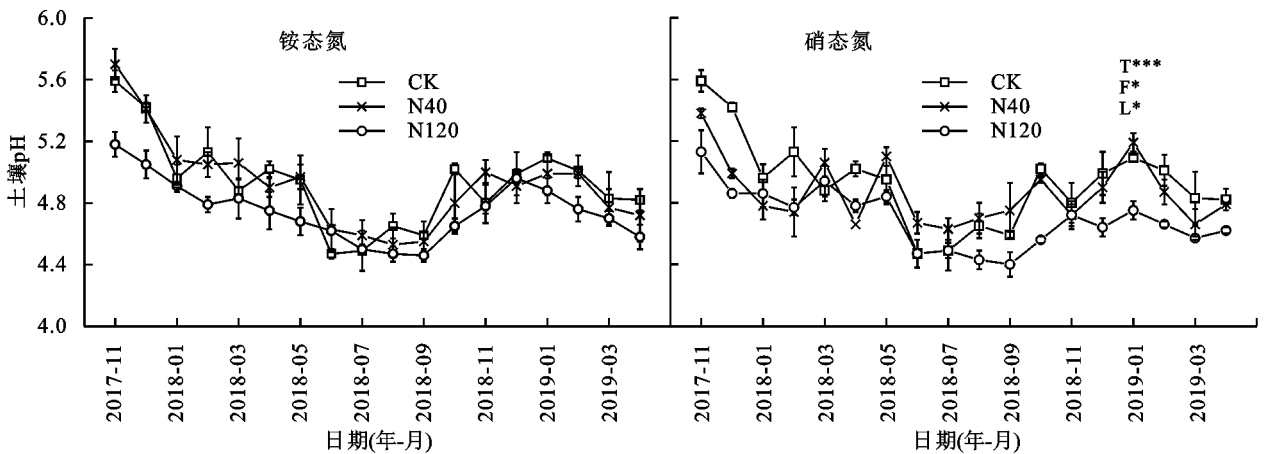
采用 SPSS 23.0 和 Origin 9.0 进行数据统计和分析。不同氮水平、氮形态和时间的交互作用对毛竹林土壤生化特性和酶活性的影响采用 3 因素重复测量方差分析(repeated measures ANOVA),没有交互

作用的各施氮处理进行单因素重复测量方差分析,用 LSD 方法进行多重比较分析同一采样时间不同处理之间差异显著性( $P=0.05$ )。各氮处理下毛竹林土壤生化特性和酶活性与环境因子的相关性利用 Pearson 相关分析进行分析。绘图利用 Origin 9.0 完成。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同水平和形态的氮输入对毛竹林土壤 pH 的影响

由图 2 可知,氮水平和形态的交互作用对毛竹林土壤 pH 的影响差异不显著( $P>0.05$ )。将同一水平氮的不同形态的 pH 取平均值作为不同氮水平的观测值,进行单因素重复测量方差分析得出,氮水平对毛竹林土壤 pH 影响显著( $P=0.001$ )。对照、低氮和高氮处理下土壤 pH 分别为 4.93,4.89,4.58,与对照相比,高氮处理和低氮处理分别使土壤 pH 下降了 0.04 和 0.35 个单位。将同一形态氮的不同水平取平均值作为不同氮形态的观测值,进行单因素重复测量方差分析发现,氮形态对土壤 pH 影响显著( $P=0.010$ )。对照、铵态氮和硝态氮处理下土壤 pH 分别为 4.93,4.84,4.74,铵态氮处理和硝态氮处理分别使土壤 pH 下降了 0.09,0.19 个单位。



注:T 为采样时间;F 为外源氮输入形态;L 为外源氮输入水平;采样时间,外源氮输入形态和外源氮输入水平的效用采用三因素重复测量方差分析,\*表示  $P<0.05$ ;\*\*表示  $P<0.01$ ;\*\* \*表示  $P<0.001$ 。下同。

图 2 模拟氮沉降对土壤 pH 的影响

### 2.2 不同水平和形态的氮输入对毛竹林土壤生化特性的影响

由图 3、图 4 和图 5 可知,氮水平和形态对毛竹林土壤铵态氮、硝态氮和可溶性有机氮含量的影响差异显著( $P<0.05$ )。对照、低铵态氮、高铵态氮、低硝态氮和高硝态氮处理下,土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量分别为 2.85,2.87,2.94,2.80,4.12 mg/kg,可溶性有机氮含量分别为 13.65,11.39,12.74,10.74,19.12 mg/kg,铵态氮含量分别为 8.38,7.98,9.91,8.16,8.83 mg/kg。在高氮水平下,硝态氮处理的土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量和土壤可溶性

有机氮含量分别高出铵态氮处理的 40.06%和 50.10%,硝态氮处理下土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量低于铵态氮处理的 12.33%;在硝态氮处理下,高氮处理土壤  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  含量和可溶性有机氮含量分别高出低氮处理的 47.12%和 78.12%,在铵态氮处理下,高氮处理土壤  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  含量高出于低氮处理的 24.24%。

由图 6、图 7 和图 8 可知,在氮水平和形态的交互作用下对毛竹林土壤可溶性有机碳、微生物生物量碳和微生物生物量氮含量整体呈下降趋势,但未达显著性水平( $P>0.05$ )。

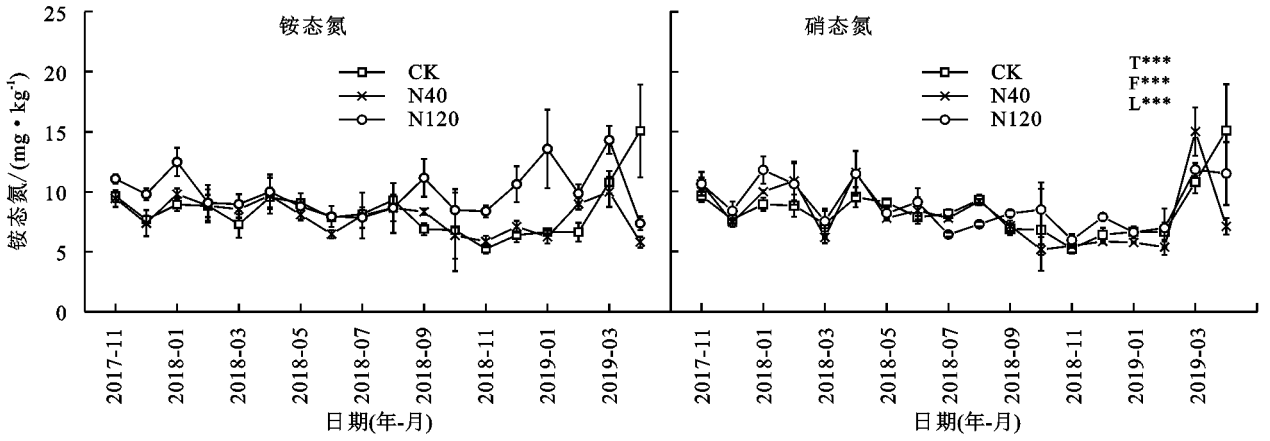


图 3 外源氮输入对毛竹林土壤铵态氮的影响

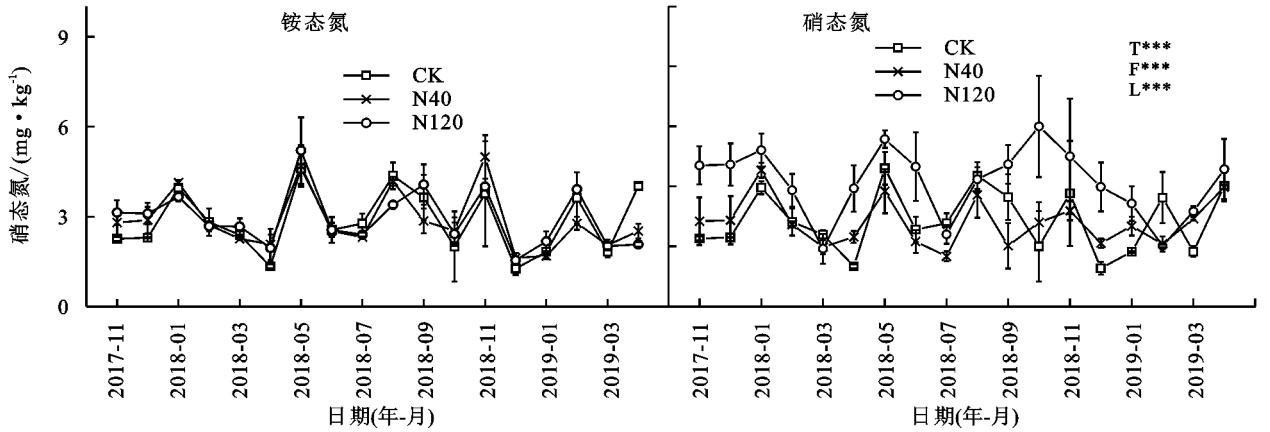


图 4 外源氮输入对毛竹林土壤硝态氮含量的影响

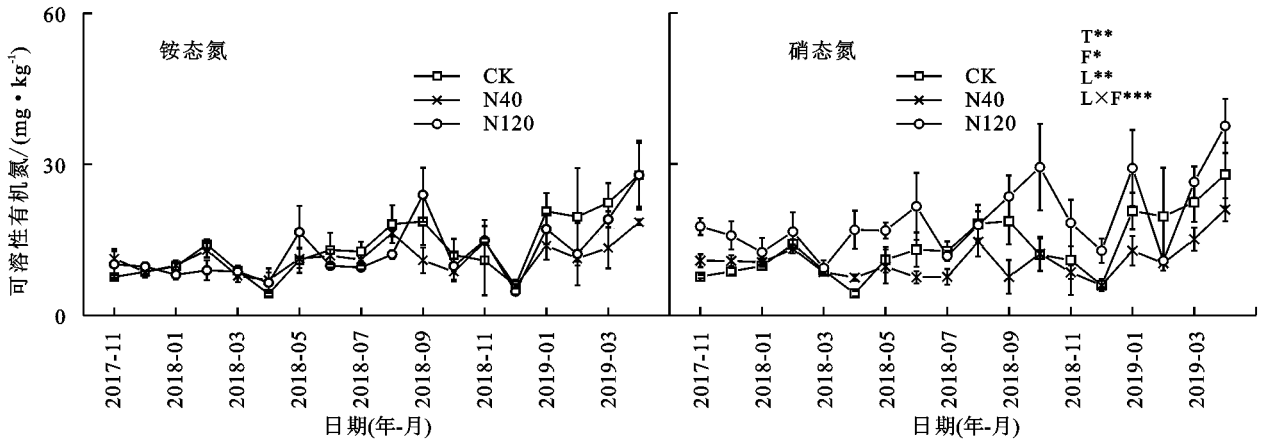


图 5 外源氮输入对毛竹林土壤可溶性有机氮含量的影响

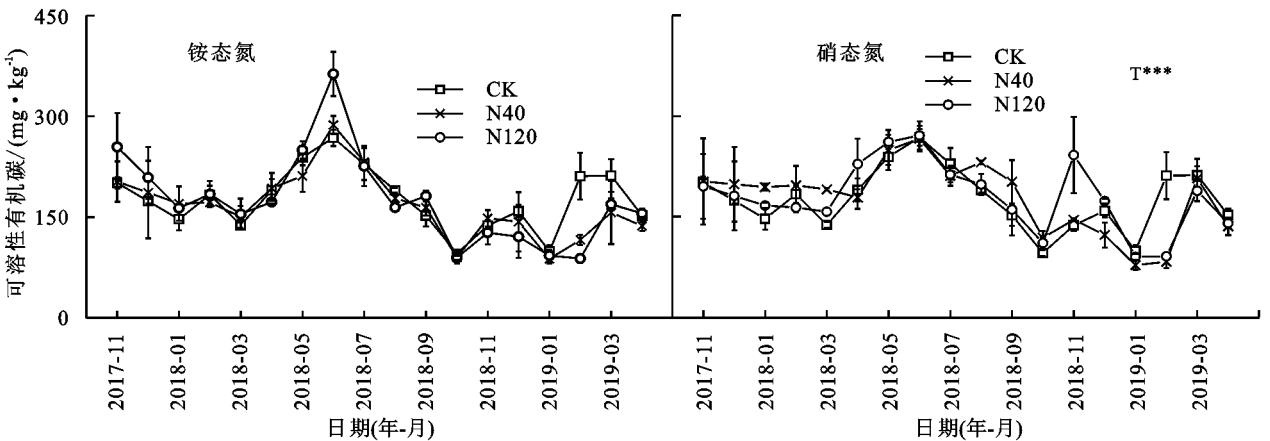


图 6 外源氮输入对毛竹林土壤可溶性有机碳含量的影响

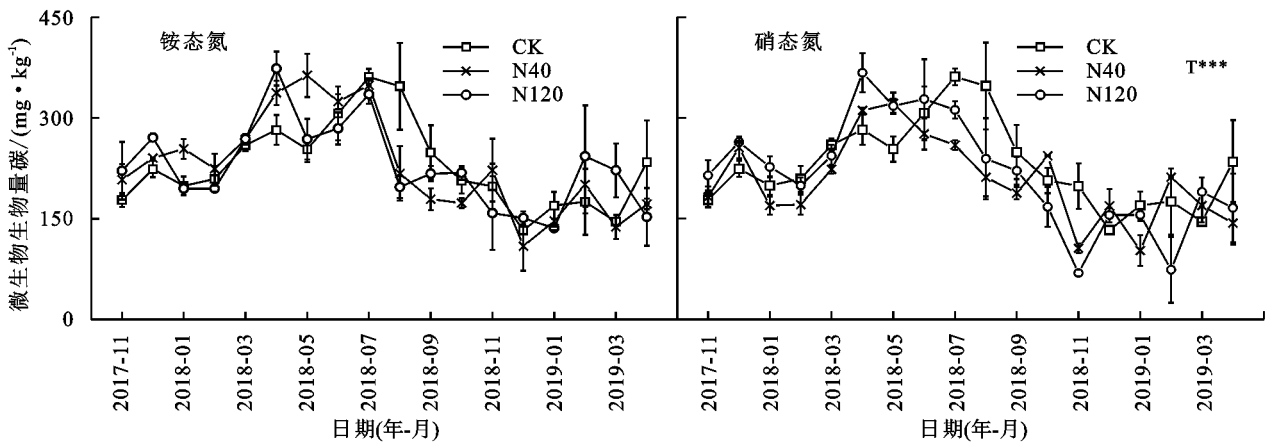


图7 外源氮输入对毛竹林土壤微生物生物量碳的影响

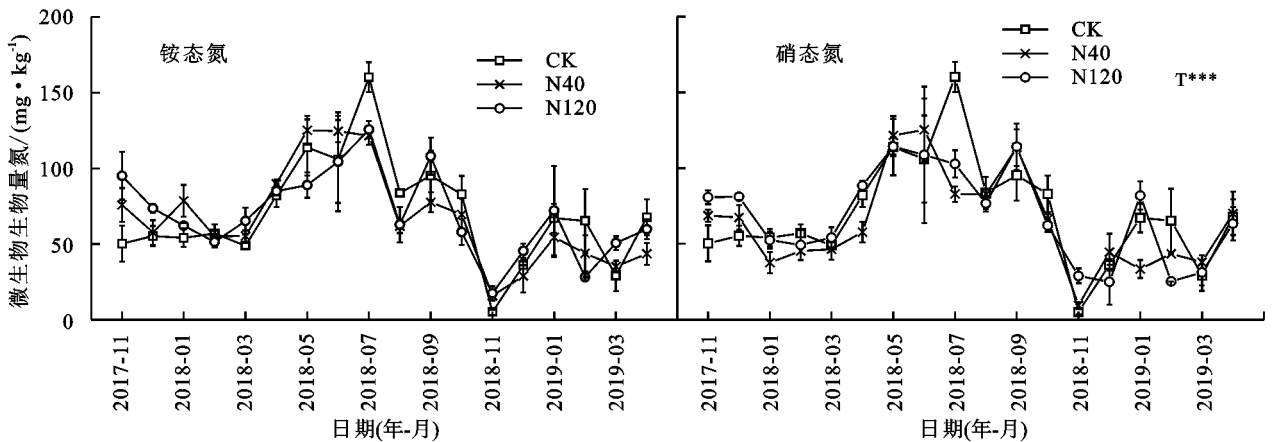


图8 外源氮输入对毛竹林土壤微生物生物量氮的影响

## 2.3 外源氮输入对毛竹林土壤酶活性及其时间分异规律的影响

2.3.1 不同水平和形态的氮输入对毛竹林土壤酶活性的影响 由图9、图10和图11可知,氮水平和形态的交互作用对毛竹林土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的影响均无显著差异( $P > 0.05$ ),将氮水平和形态合并后进行单因素重复测量方差分析。

将同一水平氮的不同形态的酶活性取平均值作为不同氮水平输入的观测值。通过单因素重复测量方差分析得出,氮水平显著影响了毛竹林土壤脲酶和蔗糖酶的活性( $P < 0.05$ )。对照、低氮和高氮处理下毛竹林土壤脲酶活性分别为  $19.95, 20.45, 22.72 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ,蔗糖酶活性分别为  $0.91, 0.94, 0.98 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。高氮对毛竹林土壤脲酶活性的促进作用显著高于低氮输入( $P = 0.045$ ),与对照相比,高氮处理下毛竹林土壤脲酶活性提高了  $14.16\%$  ( $P = 0.022$ );高氮处理下毛竹林土壤蔗糖酶活性比对照高  $8.11\%$  ( $P = 0.016$ )。不同水平氮输入对毛竹林土壤过氧化氢酶活性无显著影响( $P > 0.05$ )。

将同一形态氮的不同水平的酶活性取平均值作为不同氮形态的观测值。通过单因素重复测量方差分析得出,氮形态对毛竹林土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均无显著影响( $P > 0.05$ )。

2.3.2 不同水平和形态的氮输入对毛竹林土壤酶活性时间分异规律的影响 由图9、图10和图11可知,毛竹林土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性均呈现了显著的时间分异规律( $P < 0.01$ ),氮水平和氮形态的交互作用对毛竹林土壤脲酶、蔗糖酶和过氧化氢酶活性的时间分异规律均没有显著影响( $P > 0.05$ )。土壤脲酶和蔗糖酶活性夏季高,冬季低,春秋居中,最高值出现在8月,分别为  $45.70 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和  $2.18 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ,最低值出现在1,3月,分别为  $7.52 \mu\text{g}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 和  $0.31 \text{ mg}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。而过氧化氢酶活性秋冬季节高,最高值出现在11月,为  $1.15 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{h})$ ,最低值出现在4月,为  $0.18 \text{ mL}/(\text{g} \cdot \text{h})$ 。

## 2.4 毛竹林土壤生化特性与酶活性的相关性

对毛竹林土壤生化特性和酶活性进行相关性分析(表1)表明,土壤酶活性(脲酶、蔗糖酶与过氧化氢酶)与微生物生物量氮含量相关性显著( $P < 0.01$ ),相关系数分别为  $0.290, 0.170, -0.306$ ;与pH均呈负相关性,其中,脲酶和蔗糖酶活性与pH相关性显著,相关系数为  $-0.138$ 和  $-0.167$ 。

脲酶活性与蔗糖酶、pH、硝态氮、微生物生物量氮、可溶性有机氮、微生物生物量碳和可溶性有机碳呈显著相关( $P < 0.05$ ),相关系数分别为  $0.216,$

-0.235, 0.291, 0.290, 0.170, 0.136, 0.177; 蔗糖酶活性与脲酶、pH、硝态氮和微生物生物量氮显著相关 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 0.216, -0.239, 0.268, 0.170; 过氧

化氢酶活性与铵态氮、微生物生物量氮、微生物生物量碳和可溶性有机碳含量均呈显著负相关关系 ( $P < 0.05$ ), 相关系数为 -0.307, -0.306, -0.333。

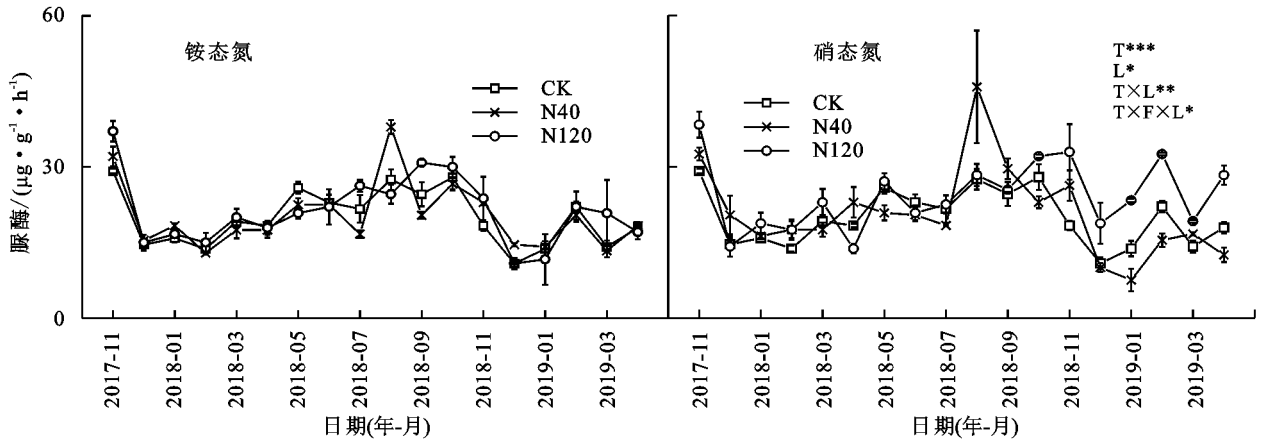


图 9 外源氮输入对毛竹林土壤脲酶活性的影响

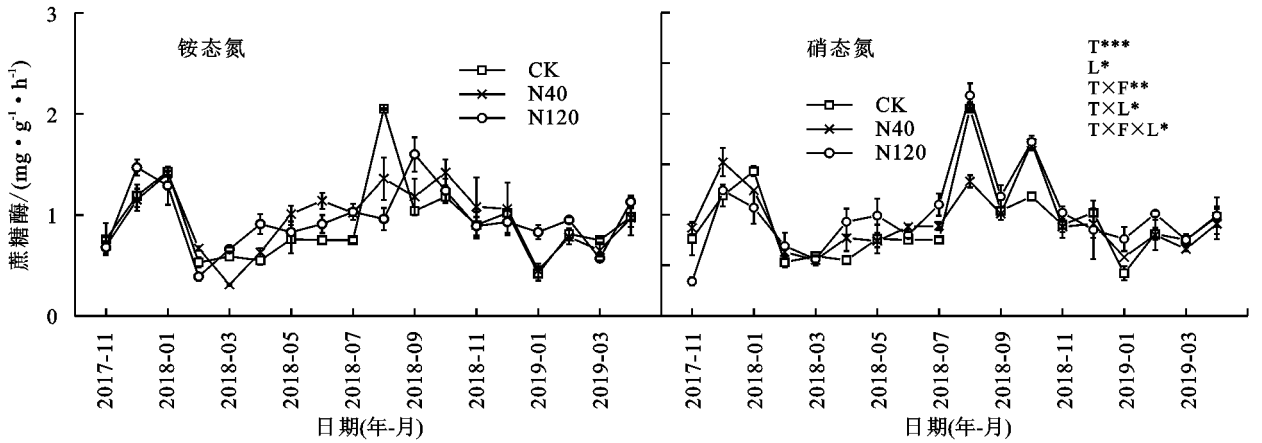


图 10 外源氮输入对毛竹林土壤蔗糖酶活性的影响

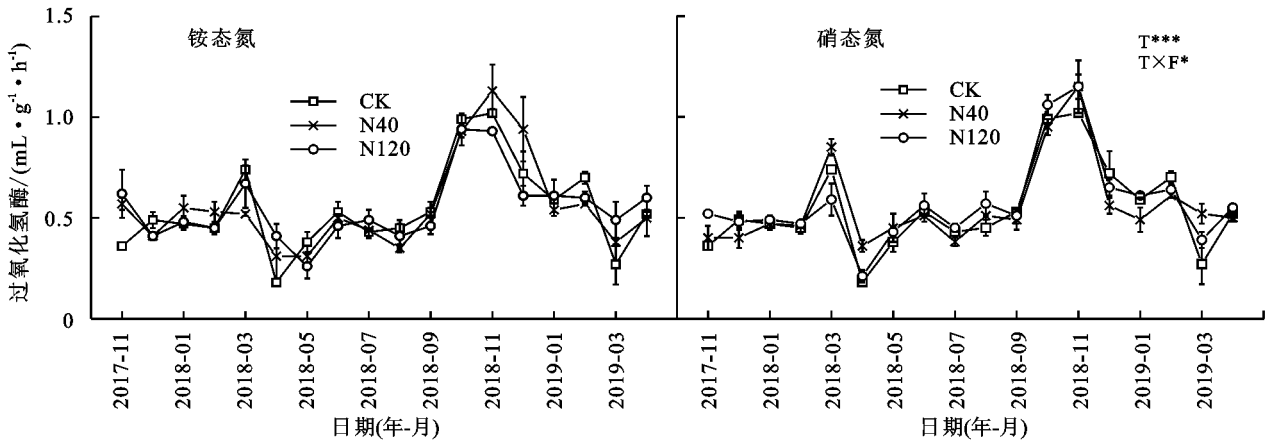


图 11 外源氮输入对毛竹林土壤过氧化氢酶活性的影响

表 1 外源氮输入下毛竹林土壤酶活性与环境因子的相关性

指标	pH	硝态氮	铵态氮	微生物 生物量氮	可溶性 有机氮	微生物 生物量碳	可溶性 有机碳	脲酶	蔗糖酶	过氧化 氢酶
脲酶	-0.138*	0.266**	0.045	0.226**	0.149*	0.084	0.197**	1.000		
蔗糖酶	-0.167**	0.239**	-0.100	0.126*	0.077	0.066	0.042	0.212**	1.000	
过氧化氢酶	-0.020	0.061	-0.306**	-0.322**	0.032	-0.296**	-0.265**	0.116	0.099	1.000

注: \* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上极显著相关。

## 3 讨论

### 3.1 外源氮输入对毛竹林土壤 pH 的影响

土壤养分的变化对土壤 pH 产生影响,同时也受到 pH 的制约。本研究表明,氮输入显著降低了土壤 pH ( $P < 0.05$ ),与张丹丹等<sup>[13]</sup>的研究结果类似。氮添加增加了土壤硝态氮和铵态氮含量,土壤  $\text{NH}_4^+$  和  $\text{NO}_3^-$  增加, $\text{NH}_4^+$  一部分被土壤胶体吸附或被植物吸收,一部分在硝化细菌作用下转化为  $\text{NO}_3^-$ ,同时释放出  $\text{H}^+$ ,导致土壤 pH 下降<sup>[14]</sup>,李秋玲等<sup>[15]</sup>研究也发现,氮添加( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ )显著降低了阔叶林土壤的 pH。但刘星等<sup>[16]</sup>研究发现,添加尿素提高了人工林土壤 pH,是因为人工林中土壤硝化作用较弱,土壤 pH 的变化以尿素水解作用为主导,而尿素在水解过程中会提高土壤 pH。

### 3.2 外源氮输入对毛竹林土壤生化特性的影响

土壤有效氮主要以  $\text{NO}_3^- - \text{N}$  和  $\text{NH}_4^+ - \text{N}$  的形式存在<sup>[17]</sup>。本研究中,氮水平和氮形态处理均显著增加了土壤有效氮的含量 ( $P < 0.05$ ),且随氮水平的增加而累积,说明氮添加对土壤氮氨化和硝化有显著的促进作用,与孙宇等<sup>[6]</sup>在湿性常绿阔叶次生林进行的 3 个水平(0, 50, 150  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )氮添加试验的结果相一致。这由于土壤氮素转化过程是一个基质限制过程,氮添加可以增加土壤中矿质氮的含量,从而缓冲硝化细菌、反硝化细菌与植物的吸收,减少氮的竞争。向元彬等<sup>[18]</sup>研究发现,常绿阔叶林土壤有效氮含量随氮添加水平的提高而增大。

氮沉降直接或间接对土壤微生物产生影响,随氮添加水平的不同,微生物数量、活性等均会产生变化,从而对土壤中物质转化及营养元素的迁移产生影响。氮添加促进了地上部分生物量增加,并增加了地上部分凋落物向土壤的输入,为土壤微生物提供了充足的碳源和氮源,从而增加了土壤微生物生物量。王泽西等<sup>[19]</sup>对红杉林的研究发现,氮添加后土壤微生物生物量碳提高了 5%~9%,微生物生物量氮提高了 23%~34%。李素新等<sup>[20]</sup>进行低氮添加(80  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )促进了贫氮的华北地区森林土壤微生物的生长,也增加了土壤微生物生物量碳氮含量。但本研究表明,氮添加抑制了土壤微生物生物量碳氮的含量。这与李素新等<sup>[20]</sup>对华北落叶松人工林进行高浓度施氮(150  $\text{kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ )抑制了土壤微生物生物量碳氮的结果一致。这一结果主要是由于高氮素持续添加导致土壤酸化,产生“铝毒效应”,抑制微生物活动,从而降低了土壤微生物生物量碳氮含量。

可溶性有机氮含量与植物残体归还土壤的数量

有关,有研究<sup>[20]</sup>表明,土壤有机质、根系活动及氮素等是可溶性有机氮的主要来源。土壤中水溶性有机碳、氮含量的变化取决于其来源和消耗之间的平衡关系。氮添加可以提高植物的光合速率,促进植物生长,提高进入到土壤中的枯枝落叶生物量和根系分泌物的量,从而导致土壤水溶性有机碳、氮含量增加。另一方面,水溶性有机碳、氮是土壤微生物主要的能量来源,土壤微生物尤其是根际微生物的大量活动会导致土壤水溶性有机碳、氮的大量损失,降低可溶性有机碳、氮含量<sup>[21]</sup>。本研究中,除高硝态氮显著增加了土壤可溶性有机氮含量外,其他处理对可溶性有机氮和可溶性有机碳含量均没有显著影响。

### 3.3 外源氮输入对毛竹林土壤酶活性的影响

土壤酶主要来源于土壤微生物、根系的分泌物及动植物残体分解释放的过程,在生态系统物质循环和能量流动过程中扮演着重要的角色<sup>[9]</sup>。森林土壤酶是森林土壤生化过程的积极参与者,直接参与土壤 C、N 和 P 循环,能快速表征土壤环境的变化,可作为评价土壤质量和养分能力的重要指标<sup>[5]</sup>。氮添加可以增加土壤肥力,促进植物生长,增加植物根系分泌物,增强土壤微生物活性,从而促进土壤酶活性<sup>[22]</sup>。本研究中,氮添加促进了土壤脲酶和蔗糖酶活性。但刘星等<sup>[16]</sup>对太岳山人工油松林的研究发现,氮添加抑制了壤有机氮矿化速率,土壤 pH 下降,导致植物根系受损,从而抑制了太岳山人工油松林土壤蔗糖酶活性。

过氧化氢酶是一种重要的土壤氧化还原酶,能促进过氧化氢对各种化合物的氧化,催化过氧化氢分解,防止其对生物体的毒害作用<sup>[5]</sup>。氮添加后土壤容易出现板结,透气性减弱,限制了微生物的繁殖与生长,土壤可通过增加过氧化氢酶活性来缓解过氧化氢的毒害作用<sup>[7]</sup>,也有研究<sup>[23]</sup>发现,氮添加抑制白腐真菌活性,进而减少过氧化氢酶的分泌量。本研究表明,氮添加对土壤过氧化氢酶没有显著影响,这一结果与张艺等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。可能是由于氮添加形态、水平及植被类型不同所造成的。

### 3.4 外源氮输入对毛竹林土壤酶活性时间分异规律的影响

土壤酶活性的季节变化受温度、降水、土壤养分及凋落物状况的影响<sup>[6]</sup>。本研究中,毛竹林土壤脲酶和蔗糖酶活性呈现显著的季节变化,夏季高,冬季低,这与张艺等<sup>[7]</sup>的研究结果一致。脲酶和蔗糖酶活性最高值出现在夏季,可能是由于夏季高温多雨,植物新陈代谢旺盛,树木积累自身生物量,释放大量的光合同化产物,土壤生物化学作用和微生物活动旺盛,

微生物和根系代谢加强,分泌产生更多的酶。

土壤过氧化氢酶活性的季节变化趋势与脲酶、蔗糖酶不一致,其最高值出现在秋冬季节。陈倩妹等<sup>[24]</sup>在川西亚高山针叶林模拟外源氮输入土壤酶活性的影响研究结果也表明,土壤酶活性的季节变化并不完全一致。这可能是由于土壤酶的来源及其对环境响应的敏感性不同所致。张艺等<sup>[7]</sup>对温带森林的研究结果表明,土壤过氧化氢酶活性的峰值出现在冬季,是由于冬季积雪使土壤透气性减弱,易于生成化合物过氧化氢,限制了微生物的生长与繁殖,土壤通过增加过氧化氢酶活性来缓解过氧化氢对土壤的毒害作用。

## 4 结论

综上所述,氮添加显著增加了土壤铵态氮、硝态氮、可溶性有机氮含量、脲酶和蔗糖酶活性,降低了土壤 pH ( $P < 0.05$ ),对过氧化氢酶活性无显著影响 ( $P > 0.05$ )。氮添加通过改变毛竹林土壤环境因子,对土壤生化特性和酶活性产生影响。土壤生化特性和酶活性对不同氮水平的响应程度比不同氮形态的响应更加显著,因此,在之后研究中应更加关注不同氮水平对土壤生化特性和酶活性的影响。

### 参考文献:

- [1] 臧彩婷.氮沉降对沐川县几种林分土壤碳素组分的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2016.
- [2] Song X Z, Zhou G M, Gu H H, et al. Management practices amplify the effects of N deposition on leaf litter decomposition of the Moso bamboo forest [J]. *Plant and Soil*, 2015, 395(1): 391-400.
- [3] 何珊.外源氮输入对毛竹林土壤甲烷吸收的影响[D].杭州:浙江农林大学,2019.
- [4] 陈美领,陈浩,毛庆功,等.氮沉降对森林土壤磷循环的影响[J].*生态学报*, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [5] Burns R G, deforest J L, Marxsen J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions[J].*Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 58: 216-234.
- [6] 孙宇,彭天驰,李顺,等.模拟氮沉降对湿性常绿阔叶次生林土壤碳氮组分和酶活性的影响[J].*水土保持学报*, 2019, 33(2): 235-243, 250.
- [7] 张艺,王春梅,许可,等.模拟氮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.
- [8] 刘宁,彭春菊,雷赵枫,等.氮沉降和生物质炭对毛竹叶片光合特性的影响[J].*浙江农林大学学报*, 2019, 36(4): 704-712.
- [9] 周嘉聪,刘小飞,郑永,等.氮沉降对中亚热带米楮天然林微生物生物量及酶活性的影响[J].*生态学报*, 2017, 31(1): 127-135.
- [10] Wu J S, Jiang P K, Chang S X, et al. Dissolved soil organic carbon and nitrogen were affected by conversion of native forests to plantations in subtropical China[J].*Canadian Journal of Soil Science*, 2010, 90(1): 27-36.
- [11] Wang Z L, Li Y F, Scott X C, et al. Contrasting effects of bamboo leaf and its biochar on soil CO<sub>2</sub> efflux and labile organic carbon in an intensively managed Chinese chestnut plantation[J].*Biology and Fertility of Soils*, 2014, 50(7): 1109-1119.
- [12] 周际海,郝茹茹,魏倩,等.旱地红壤不同土地利用方式对土壤酶活性及微生物多样性的影响差异[J].*水土保持学报*, 2020, 34(1): 327-332.
- [13] 张丹丹,李婧,郭琪,等.氮添加对杉木人工林土壤氮有效性、溶解性有机氮和酸化的影响[J].*西北农林科技大学学报*, 2019, 47(12): 77-85, 114.
- [14] 沈灵凤,白玲玉,曾希柏,等.施肥对设施菜地土壤硝态氮累积及 pH 的影响[J].*农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1350-1356.
- [15] 李秋玲,肖辉林,曾晓舵,等.模拟氮沉降对森林土壤化学性质的影响[J].*生态环境学报*, 2013, 22(12): 1872-1878.
- [16] 刘星,汪金松,赵秀海.模拟氮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.
- [17] 唐剑东.模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林表层土壤养分的影响[D].四川雅安:四川农业大学,2017.
- [18] 向元彬,黄从德,胡庭兴,等.模拟氮沉降对常绿阔叶林土壤有效氮形态和含量的影响[J].*西北农林科技大学学报*, 2016, 44(12): 73-80.
- [19] 王泽西,陈倩妹,黄尤优,等.川西亚高山森林土壤呼吸和微生物生物量碳氮对施氮的响应[J].*生态学报*, 2019, 39(19): 7197-7207.
- [20] 李素新,覃志杰,刘泰瑞,等.模拟氮沉降对华北落叶松人工林土壤微生物碳和微生物氮的动态影响[J].*水土保持学报*, 2020, 34(1): 268-274.
- [21] 肖列,刘国彬,李鹏,等.氮素添加和 CO<sub>2</sub> 浓度升高对白羊草根际和非根际土壤水溶性有机碳、氮的影响[J].*应用生态学报*, 2017, 28(1): 64-70.
- [22] 马晓飞,楚新正,马倩.艾比湖地区冻融作用对梭梭群落土壤酶活性及微生物数量的影响[J].*干旱区地理*, 2015, 38(6): 1190-1201.
- [23] 李吉玫,张毓涛.模拟氮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*, 2019, 39(4): 1-8.
- [24] 陈倩妹,王泽西,刘洋,等.川西亚高山针叶林土壤酶及其化学计量比对模拟氮沉降的响应[J].*应用与环境生物学报*, 2019, 25(4): 791-800.