

## 氮沉降下滇中华山松林土壤特性变化对土壤呼吸的影响

梁阳森<sup>1</sup>,王克勤<sup>1,2</sup>,宋娅丽<sup>1,2\*</sup>,郑兴蕊<sup>1</sup>,胡 淳<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学 生态与环境学院,云南 昆明 650224;2. 国家林业和草原局 云南玉溪磨盘山华山松人工林为研究对象,云南 昆明 650224;  
3. 云南经贸外事职业学院,云南 昆明 650224)

**摘 要:**研究氮(N)沉降背景下湿、干季土壤理化性质、微生物特征及酶活性变化对土壤呼吸影响,阐明 N 沉降下土壤呼吸的季节变化特征以及土壤呼吸与土壤特性之间的动态响应,为滇中亚高山森林生态系统 C 循环研究提供科学依据。选择云南玉溪磨盘山华山松人工林为研究对象,研究模拟 N 沉降下(对照-CK,0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、低 N-LN,10 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、中 N-MN,20 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>、高 N-HN,25 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)湿(7 月)、干(1 月)季土壤理化性质、酶活性、土壤微生物数量、微生物量 C(MBC)、微生物量 N(MBN)以及土壤呼吸变化特征,阐明 N 沉降下土壤呼吸与土壤特性的动态变化特征。结果表明,1)湿季时,与 CK 相比,各 N 沉降处理下土壤 TP、TK、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N、AN 均显著增加(13.1%~95.5%);干季时,TN、TP、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、AN 显著增加(26.9%~69.6%)。2)在湿干两季过氧化氢酶活性均在各 N 处理下显著降低(14.8%~61.8%),多酚氧化酶活性则在湿季各 N 处理下降低(15.0%~52.2%),蔗糖酶及脲酶活性在不同季节分别在 LN、HN 处理以及 HN 处理下显著降低(7.1%~48.9%和 10.5%~16.7%);在湿干季时,HN 处理降低了土壤微生物数量、MBC、MBN(10.3%~49.8%)。3)N 沉降抑制了华山松林土壤呼吸,且随着施 N 浓度的增加,土壤呼吸抑制作用越明显;土壤呼吸与湿干季土壤温度呈正显著相关;各 N 处理均降低了土壤温度敏感性 Q<sub>10</sub>(2.93%~36.86%)。综上,N 沉降抑制了华山松林的土壤呼吸,且并未改变华山松林土壤呼吸的季节变化规律与日变化规律。

**关键词:**N 沉降;华山松林;土壤呼吸;森林土壤特性

**中图分类号:**S791.241 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2023)06-0010-10

### Effects of Nitrogen Deposition on Soil Respiration Based on the Changes in Soil Properties of *Pinus armandii* Forest in Yunnan Province

LIANG Yang-sen<sup>1</sup>,WANG Ke-qin<sup>1,2</sup>,SONG Ya-li<sup>1,2\*</sup>,ZHENG Xing-rui<sup>1</sup>,HU Chun<sup>3</sup>

(1. College of Ecology and Environment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, Yunnan, China; 2. Yuxi Forestry Ecosystem Research Station of National Forestry and Grassland Administration, Kunming 650224, Yunnan, China;  
3. Yunnan Economics Trade and Foreign Affairs College, Kunming 650224, Yunnan, China)

**Abstract:** This study investigated the effects of soil physical and chemical properties, microbial characteristics and enzyme activities on soil respiration in wet and dry seasons under the background of nitrogen (N) deposition, and elucidated the seasonal changes of soil respiration under N deposition and the dynamic response between soil respiration and soil properties, so as to provide a scientific basis for the study of carbon (C) cycle in alpine forest ecosystems in Central Yunnan. The soil physicochemical properties, enzyme activ-

收稿日期:2022-10-08 修回日期:2023-05-30

基金项目:云南省教育厅科学研究基金项目(2021Y236);云南省农业基础研究联合专项(202301BD070001-059);云南省一流学科:水土保持与荒漠化防治学(05000-523005);云南省自然生态监测网络项目云南玉溪森林生态站运行(2022-YN-13);云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地(2020132550)。

第一作者:梁阳森。研究方向:森林生态系统功能。E-mail:lys98616@163.com

\* 通信作者:宋娅丽,副教授,硕士生导师。研究方向:生态系统过程与功能。E-mail:songyali19851205@sina.com

ity, soil microbial population, and microbial carbon (MBC) were studied under simulated N deposition (control-CK, 0, low-LN, 10, medium-MN, 20, and high-HN,  $25 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) in wet (July) and dry (January) seasons in a *Pinus armandii* plantations in Yuxi, Yunnan. The results showed that 1) soil TP, TK,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ ,  $\text{NO}_3^- \text{-N}$ , and AN increased significantly (13.1%—95.5%) under each N deposition treatment compared with CK in the wet season, and TN, TP,  $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ , and AN increased significantly (26.9%—69.6%) in the dry season. 2) Catalase activity significantly decreased in both wet and dry seasons under each N treatment (14.8%—61.8%), while polyphenol oxidase activity decreased in the wet season under each N treatment (15.0%—52.2%), and sucrase and urease activities significantly decreased in different seasons under LN, HN, and HN treatment, respectively (7.1%—48.9% and 10.5%—16.7%); HN treatment reduced soil microbial population, MBC, and MBN during the wet and dry seasons (10.3%—49.8%). 3) N deposition inhibited soil respiration in *P. armandii* forest, and the inhibition of soil respiration became more pronounced with the increase of applying N concentration; soil respiration was positively and significantly correlated with soil temperature in the wet-dry season; all N treatments reduced soil temperature sensitivity  $Q_{10}$  (2.93%—36.86%). In conclusion, N deposition inhibits soil respiration in *P. armandii* forest, and dose not change the seasonal and daily patterns of soil respiration.

**Key words:** N deposition; *Pinus armandii* forest; soil respiration; forest soil properties

随着工业化速度不断加快、化石能源消耗和农牧业的发展,导致大气中含 N 化合物的含量迅速增加,预计全球 N 沉降量将由 2010 年的  $124 \text{ Tg N}^{-1}$  增加到 2050 年的  $200 \text{ Tg N}^{-1}$ <sup>[1]</sup>。我国作为世界三大 N 沉降区之一<sup>[2]</sup>,预计到 2050 年将承担全球约 24% 的 N 沉降量<sup>[3]</sup>。森林生态系统结构复杂, N 沉降过量增加会对其造成不利影响,如过量 N 沉降将降低土壤缓冲能力、加速土壤酸化、增强土壤硝化作用,降低微生物多样性和活性等<sup>[4]</sup>。森林土壤是森林生态系统的主要 C 库<sup>[5-6]</sup>,对全球气候变化具有重要作用,有关森林土壤的研究已成为森林生态系统重点研究方向之一<sup>[7]</sup>。因此,研究 N 沉降对森林土壤理化环境、生态系统和 C、N 循环等带来的影响,对如何更好地解决 N 沉降带来的生态环境问题具有重要价值。

森林土壤呼吸作为陆地生态系统土壤呼吸的重要组成部分,其微小变化不仅会改变大气中  $\text{CO}_2$  浓度,也会对森林碳贮存能力产生影响<sup>[8]</sup>。土壤呼吸的主要来源之一为土壤微生物的活动<sup>[9]</sup>,而土壤微生物量碳氮反映了土壤中微生物的活性和土壤养分状况,是反映土壤质量和生态功能的重要指标<sup>[10]</sup>。N 沉降通过土壤 N 含量影响植物养分利用效率、短期固 N 和生态系统 N 循环,并通过土壤有机质、植物 C 分配、微生物群落结构和微生物酶的变化影响土壤理化性质,包括土壤酸度,土壤 N 浓度等的变化,进而影响土壤微生物特征<sup>[11]</sup>,改变微生物量碳氮含量,导致土壤呼吸发生变化<sup>[12]</sup>。目前关于土壤理化性质对土壤呼吸影响的研究主要集中在土壤温度和土壤湿度上,研究表明,土壤呼吸在长时间尺度

上与土壤温度呈正相关关系且响应敏感<sup>[13]</sup>;而对土壤湿度的响应具有不确定性,在不同生态系统中与土壤呼吸表现出正相关、负相关和不相关关系<sup>[14]</sup>。以往研究表明, N 沉降对土壤呼吸的影响表现为促进、抑制和无影响<sup>[15-18]</sup>。余景松等<sup>[19]</sup>研究表明在土壤处于 N 限制时, N 沉降会使土壤中 N 限制得到缓解,促进土壤微生物量活动,根系呼吸加强,从而促进土壤呼吸。Wang 等<sup>[20]</sup>研究表明 N 沉降使得地块 N 浓度高,降低根系生物量,减少自养呼吸,直接或间接抑制土壤微生物,导致土壤呼吸被抑制。陈平等<sup>[21]</sup>研究发现 N 沉降促进自养呼吸和抑制异养呼吸的作用相互抵消,使得 N 沉降对土壤呼吸没有影响。因此, N 沉降对土壤呼吸的影响仍然存在争议,而基于 N 沉降背景按照垂直剖面分层来研究其他土壤理化性质、微生物特征及酶活性变化对土壤呼吸影响的研究鲜有报道。因此,亟待开展在 N 沉降持续增加的背景下森林土壤呼吸如何通过土壤理化性质、微生物特征及酶活性变化差异性变化而产生响应的研究。

滇中磨盘山华山松是该区域重要树种,生物量可达  $(526.00 \pm 18.02) \text{ t/hm}^2$ <sup>[22]</sup>,生态系统碳储量高达  $503.5 \text{ t/hm}^2$ <sup>[23]</sup>,生长环境优越,生态功能较强,其生态系统的 C、N 循环具有较高的研究意义和研究价值。因此,本研究以滇中磨盘山优势森林华山松林为研究对象,并对其进行不同水平施 N 试验,通过分析 N 沉降下土壤呼吸、土壤理化性质、微生物特征及酶活性变化特征,探究其耦合关系,为预测滇中亚高山森林生态系统 C 平衡、物质循环对 N 沉降的响应机制提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于云南玉溪森林生态系统国家定位观测站(23°46′18″—23°54′34″N, 101°16′06″—101°16′12″E), 海拔 1 260.0~2 614.4 m, 太阳光照充足, 位于云南亚热带南北部的气候过渡带, 是典型的中亚热带气候, 年平均气温 15 ℃, 最高气温 33.0 ℃, 最低气温 -2.2 ℃, 年降雨量 1 050 mm, 干湿季分明(干季: 11 月至次年 4 月; 湿季: 5—10 月)。土壤以红壤和黄棕壤为主, 植被类型丰富, 具有明显的垂直分布特点, 森林覆盖率达 64.2% 以上, 植被类型主要以针叶林(华山松林、云南松林)、阔叶林(亚热带常绿阔叶林和高山栎林)为主<sup>[24]</sup>。华山松林为人工林, 林龄在 20 a, 树木生长迅速, 且当地气候适宜, 使其生物

量(526.00±18.02 t/hm<sup>2</sup>)增长迅速, 植被层碳储量高, 林分固碳能力强。

### 1.2 试验地设置

本试验在滇中磨盘山优势森林华山松林中设置 3 个 20 m×20 m 的样地(3 个重复), 在每个样地内随机选择 4 个 3 m×3 m 的小样方(4 个处理), 每个样方间的距离>10 m, 减少干扰, 华山松人工林样地基本情况见表 1。参考 Harvard Forest 等<sup>[25]</sup>、华西雨屏区<sup>[26]</sup>、四川西缘山地接合部<sup>[27]</sup>、青藏高原东缘<sup>[28]</sup>、广西木论国家自然保护区<sup>[29]</sup>等模拟 N 沉降试验设置, 结合该地区年 N 沉降量(3.84 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 设置 4 个 N 沉降水平: 对照(CK, 0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、低 N(LN, 10 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、中 N(MN, 20 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、高 N(HN, 25 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 每个处理设置 3 个重复。

表 1 华山松林样地基本概况

Table 1 Basic overview of *Pinus armandii* forest 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	郁闭度	密度/(株·hm <sup>-2</sup> )
1	2 119	18	东北	20	12.3	11.0	0.60	3 582
2	2 178	20	东北	19	11.0	10.4	0.65	3 390
3	2 156	19	东北	20	12.1	10.0	0.73	3 436

从 2019 年 1 月初开始, 根据以上 4 个水平, 将模拟 N 沉降量等量分为 12 份, 在每月中旬对各个小样方进行定量喷洒, 以此模拟 N 沉降处理。将各个水平所需的 CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O 溶解至 1L 去离子水中, 用喷雾器均匀的喷洒在 3 个重复水平样方内, 对照组喷洒等量的清水。

### 1.3 土壤呼吸测定

从 2019 年 2 月到 2020 年 1 月, 每个月中旬用 Li-6400 土壤碳通量分析系统(LI-COR, USA)测得土壤呼吸速率, 测土壤呼吸时, 将土壤呼吸室放在半径 10 cm 高 5 cm 的 PVC 管上, 将其一端削尖, 垂直插入土壤 3 cm 深处, 并在观测前 24 h 内除去地圈内地上部分的植物, 以此减少对土壤的干扰。每个样点测 3 个重复。

在施 N 后的湿季(2019 年 7 月)和干季(2020 年 1 月), 从 8:00 到 19:00, 用 Li-6400 土壤碳通量分析系统和土壤温湿度测定仪(SIN-TN8)对土壤呼吸和土壤温湿度每隔 1 h 进行测定。

### 1.4 土壤样品采集与测定

采用随机数法对各样方中的土壤进行取样, 用四分法混合均匀后带回实验室, 分别进行保存。一部分风干保存, 用于测定 TN、TP、TK、碱解氮、蔗糖酶、脲酶, 另一部分冷冻和 -40 ℃ 保存, 用于测定硝态氮、氨态氮、过氧化氢酶、多酚氧化酶。分别于 2019 年 7 月和 2020 年 1 月采集湿季和干季土壤样品。

全氮(TN)用半微量凯氏定氮法(LY/T 1228—1999)测定; 全磷(TP)用钼锑抗比色法(LY/T 1232—1999)测定; 全钾(TK)、硝态氮(NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N)、氨态氮(NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N)采用德国 SEAL Analytical AA3 测定, 碱解氮(AN)采用碱解扩散法; 土壤 pH 采用电位法测定, 土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾外加热法测定。

蔗糖酶活性用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定; 脲酶活性采用靛酚比色法测定; 过氧化氢酶活性采用高锰酸钾滴定法测定; 多酚氧化酶用碘量滴定法测定。

土壤微生物量碳(MBC, 式中用  $M_{BC}$  表示)和土壤微生物量氮(MBN, 式中用  $M_{BN}$  表示)的测定方法是氯仿熏蒸浸提法。根据下面公式计算 MBC、MBN<sup>[30]</sup>。

$$M_{BC} = E_C / k_C \quad (1)$$

$$M_{BN} = E_N / k_N \quad (2)$$

式中:  $E_C$  和  $E_N$  分别是熏蒸和与熏蒸土壤浸提液提取的 C 和 N 的差值,  $k_C$  和  $k_N$  表示熏蒸后 C 和 N 提取出的比例系数, 其中  $k_C = 0.38$ ,  $k_N = 0.54$ 。

### 1.5 数据分析与处理

数据由 Excel 2010 进行整理、作图, 用 SPSS 23.0 对数据进行统计。采用单因素方差分析法(LSD)比较土壤呼吸在不同施 N 处理的差异性水平和土壤理化性质、土壤酶活性、土壤微生物量碳、氮以及微生物数量在不同施 N 处理的差异性水平

以及采用相关性分析法分析与土壤呼吸的相关关系,采用回归分析法描述土壤呼吸与土壤温度( $T$ )和湿度( $W$ )的关系。

土壤呼吸速率与土壤温度的单因素指数模型为

$$R_s = a e^{bT} \tag{3}$$

土壤呼吸温度敏感系数  $Q_{10}$  计算方法为

$$Q_{10} = e^{10b} \tag{4}$$

式中: $R_s$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $T$  为土壤温度( $^{\circ}\text{C}$ ), $a$ 、 $b$  为系数。

土壤呼吸速率与土壤湿度的单因素模型为

$$R_s = aW^2 + bW + c \tag{5}$$

式中: $R_s$  为土壤呼吸速率( $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ), $W$  为土壤湿度(%), $a$ 、 $b$ 、 $c$  为参数。

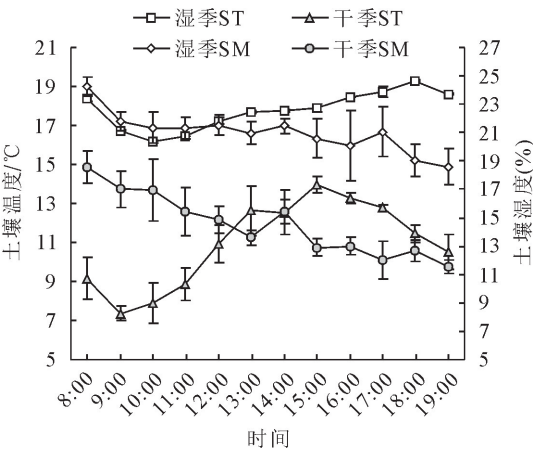
2 结果与分析

2.1 N 沉降下土壤理化性质变化特征

2.1.1 土壤温、湿度日变化特征 由图 1 可知,华山松林土壤温度日变化总体均呈单峰曲线。在湿季时,土壤温度最高为  $19.28^{\circ}\text{C}$  ( $18:00$ ),最低温度为  $16.20^{\circ}\text{C}$  ( $10:00$ );土壤最大湿度为  $24.21\%$  ( $8:00$ ),最小湿度为  $18.58\%$  ( $19:00$ )。在干季时,华山松林土壤最高温度为  $13.95^{\circ}\text{C}$  ( $15:00$ ),最低温度为  $7.38^{\circ}\text{C}$  ( $9:00$ );土壤最大湿度为  $18.56\%$  ( $8:00$ ),最小湿度为  $11.52\%$  ( $19:00$ )。

2.1.2 土壤化学性质季节变化特征 由表 2 可知,与 CK 相比,在湿季时华山松林土壤 TP、TK、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、AN 在各 N 处理下均显著增加

( $P < 0.05$ ),最大增幅分别为  $13.1\%$ 、 $75.2\%$ 、 $86.4\%$ 、 $95.5\%$ 、 $24.6\%$ ;TN 在 HN 处理下显著增加( $33.8\%$ )( $P < 0.05$ );pH 在 HN 处理下显著降低( $7.0\%$ )( $P < 0.05$ );SOC 在 LN 显著降低了  $13.6\%$ ,在 MN、HN 显著增加了  $8.6\%$ 、 $28.8\%$ 。在干季时,与 CK 相比,TN、TP、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、AN 在各 N 处理下均显著增加( $P < 0.05$ ),最大增幅分别为  $69.6\%$ 、 $32.5\%$ 、 $26.9\%$ 、 $47.3\%$ ;TK 和  $\text{NO}_3^-\text{-N}$  在 MN、HN 处理下显著增加( $57.1\% \sim 54.8\%$ )( $P < 0.05$ );pH 在 HN 处理下显著降低( $9.8\%$ )( $P < 0.05$ );SOC 在 LN 显著降低了  $8.9\%$ ,在 HN 显著增加了  $8.4\%$ 。



ST 为土壤温度,SM 为土壤湿度。  
图 1 在湿、干季华山松林土壤温度和湿度日变化  
Fig. 1 Daily changes in soil temperature and humidity in the *P. armandii* forest in the wet and dry seasons

表 2 在湿、干季华山松林土壤化学性质季节变化特征

Table 2 Seasonal variation characteristics of soil chemistry in *P. armandii* forest in the wet and dry seasons

处理		CK	LN	MN	HN
TN	湿季	0.71±0.03 Ab	0.72±0.07 Ab	0.75±0.07 Ab	0.95±0.11 Aa
	干季	0.46±0.02 Bc	0.66±0.08 Bb	0.70±0.03 Ba	0.78±0.07 Ba
TP	湿季	2.68±0.03 Ab	2.98±0.08 Aa	3.02±0.07 Aa	3.03±0.05 Aa
	干季	0.77±0.06 Bc	0.88±0.07 Bb	0.94±0.03 Ba	1.02±0.05 Ba
TK	湿季	3.39±0.09 Ad	4.60±0.02 Ac	5.30±0.11 Ab	5.94±0.15 Aa
	干季	3.66±0.05 Ac	3.71±0.01 Ac	4.78±0.09 Ab	5.45±0.03 Aa
$\text{NH}_4^+\text{-N}$	湿季	10.90±0.14 Ad	15.68±0.16 Ac	16.45±0.11 Ab	20.32±0.18 Aa
	干季	14.63±0.08 Bd	17.46±0.14 Bc	18.25±0.09 Bb	18.56±0.04 Ba
$\text{NO}_3^-\text{-N}$	湿季	0.44±0.03 Ad	0.60±0.07 Ac	0.69±0.03 Ab	0.86±0.03 Aa
	干季	0.42±0.02 Ab	0.43±0.05 Ab	0.63±0.03 Aa	0.65±0.03 Aa
AN	湿季	213.50±3.30 Ad	266.00±4.04 Aa	251.30±3.15 Ac	259.00±2.78 Ab
	干季	164.30±2.47 Bd	241.95±3.32 Ba	194.95±2.64 Bc	218.89±2.69 Bb
pH	湿季	4.83±0.19 Aa	4.60±0.16 Aab	4.57±0.12 Aab	4.49±0.17 Ab
	干季	4.58±0.18 Ba	4.48±0.15 Ba	4.43±0.10 Ba	4.13±0.16 Bb
SOC	湿季	28.33±0.57Ac	24.47±0.73Ad	30.78±1.23Ab	36.48±1.82Aa
	干季	38.88±0.78Bb	35.41±1.42Bc	40.57±1.62Bab	42.14±2.11Ba

注:CK 为对照;LN 为低氮处理;MN 为中氮处理;HN 为高氮处理。大写字母表示不同季节间差异显著( $P < 0.05$ ),小写字母表示相同季节不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。下同。



## 2.2 N 沉降下土壤酶活性变化特征

由图 2 可知,在不同 N 沉降水平下,与 CK 相比,土壤脲酶活性在湿干两季均随施 N 浓度的增加表现为先增加后降低,在 LN、MN 增加了 1.9%~25.0%,在 HN 降低了 16.7%和 10.5%,说明 LN、MN 促进脲酶活性,HN 则抑制。蔗糖酶活性湿季时在 LN 和 HN 分别降低了 7.1%和 16.6%,干季

时各 N 水平下均受到抑制,分别降低了 30.7%、48.9%、14.6%。过氧化氢酶活性在湿干两季各 N 处理下均受到抑制作用,湿季及干季分别降低 14.8%~18.5%和 32.7%~61.8%。N 沉降处理会抑制湿季时土壤多酚氧化酶的活性(15.0%~52.2%),干季时 LN、HN 促进其活性(2.8%~5.6%),MN 则抑制。

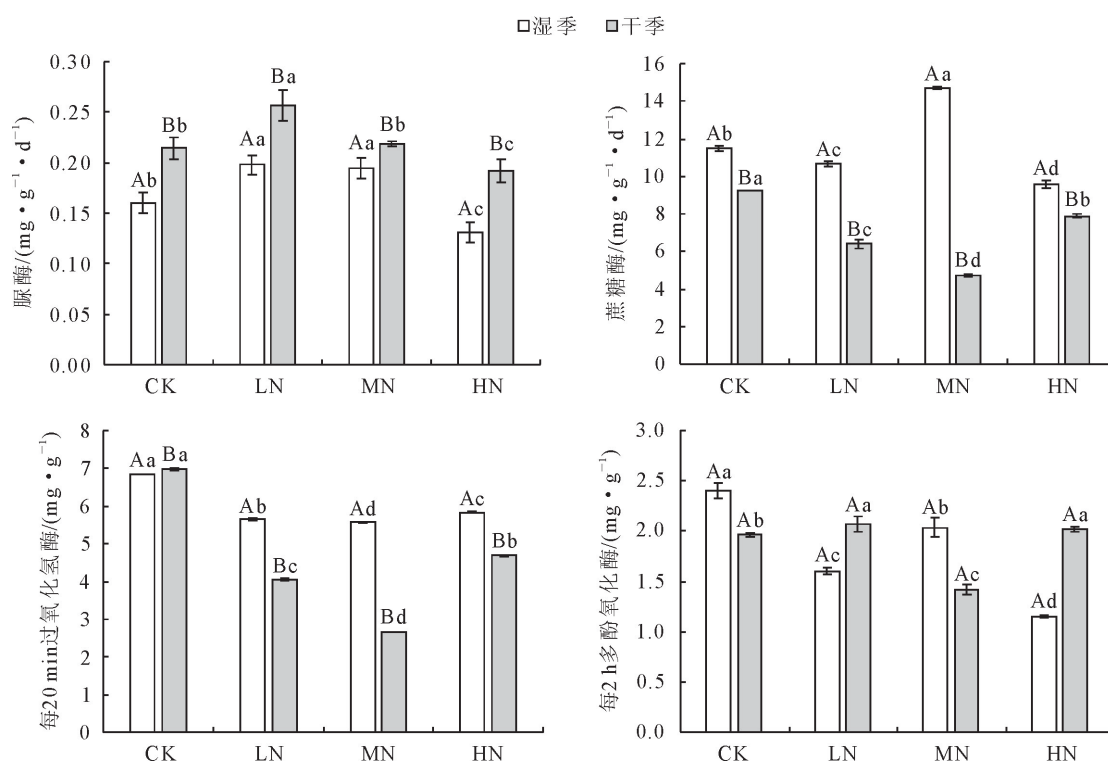


图 2 在湿、干季华山松林酶活性变化特征

Fig. 2 Characteristics of enzyme activity changes in *P. armandii* forest in the wet and dry seasons

## 2.3 N 沉降下土壤微生物变化特征

由图 3 可知,随着施 N 量的增加,土壤微生物数量、MBC、MBN 表现为先增加后降低的趋势。与 CK 相比, LN、MN 均提高湿季土壤微生物数量(6.3%~8.4%), HN 下则显著降低(10.3%); LN 显著增加了干季土壤微生物数量(14.2%), MN、HN 则显著降低(5.8%~27.2%)。干、湿季 MBC、MBN 在 LN、MN 均显著增加(15.8%~29.4%和 15.0%~44.1%), HN 则显著降低(16.6%~26.8%和 31.7%~49.8%),且湿季含量显著高于干季。

## 2.4 N 沉降下土壤呼吸变化特征

由图 4 知,在湿季时,华山松林土壤呼吸日变化总体呈单峰曲线,各 N 处理与 CK 差异性显著( $P < 0.05$ ),各 N 处理土壤呼吸速率平均值表现为 HN ( $5.332 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  MN ( $5.401 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  LN ( $5.405 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  CK ( $6.917 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ),峰值均出现在 13:00。

在干季时,华山松林土壤呼吸日变化总体呈波动变化,4 种处理之间差异性显著( $P < 0.05$ ),各 N 处理土壤呼吸速率平均值表现为 HN ( $1.618 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  MN ( $2.737 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  LN ( $2.864 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )  $<$  CK ( $3.933 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )。

由图 5 可知,华山松林土壤呼吸在各 N 沉降处理下表现出明显的月变化,均呈双峰曲线,峰值分别出现在 6 月和 10 月。LN、HN 下土壤呼吸最低值则出现在 1 月, MN 则在 2 月。各 N 沉降处理均抑制了土壤呼吸,抑制幅度最高为 LN 29.8%, MN 52.4%, HN 58.1%。

## 2.5 N 沉降下土壤呼吸与土壤特性相关性分析

### 2.5.1 土壤呼吸与土壤温、湿度的关系模型参数

由表 3、表 4 可知,华山松林土壤呼吸与各个季节土壤温度呈正显著相关( $P < 0.05$ ),湿季时,CK 的土壤呼吸与土壤湿度呈正显著相关,各 N 处理呈负显著相关,干季时,CK 的土壤呼吸与土壤湿度呈负显

著相关,各N处理呈正显著相关。在湿季时,土壤呼吸受到土壤温度、湿度影响,其影响占比分别为25.8%~50.6%,11.5%~36.5%。与CK处理 $Q_{10}$ 相比,LN、MN、HN均降低了 $Q_{10}$ ,分别降低了26.65%、29.51%、36.86%。在干季时,土壤呼吸变化中10.1%~23.5%是由于土壤温度变化引起的,40.6%~62.5%是由于土壤湿度变化引起的。对比CK,LN、MN、HN均降低了土壤呼吸的温度敏感性 $Q_{10}$ (2.93%~18.93%)。

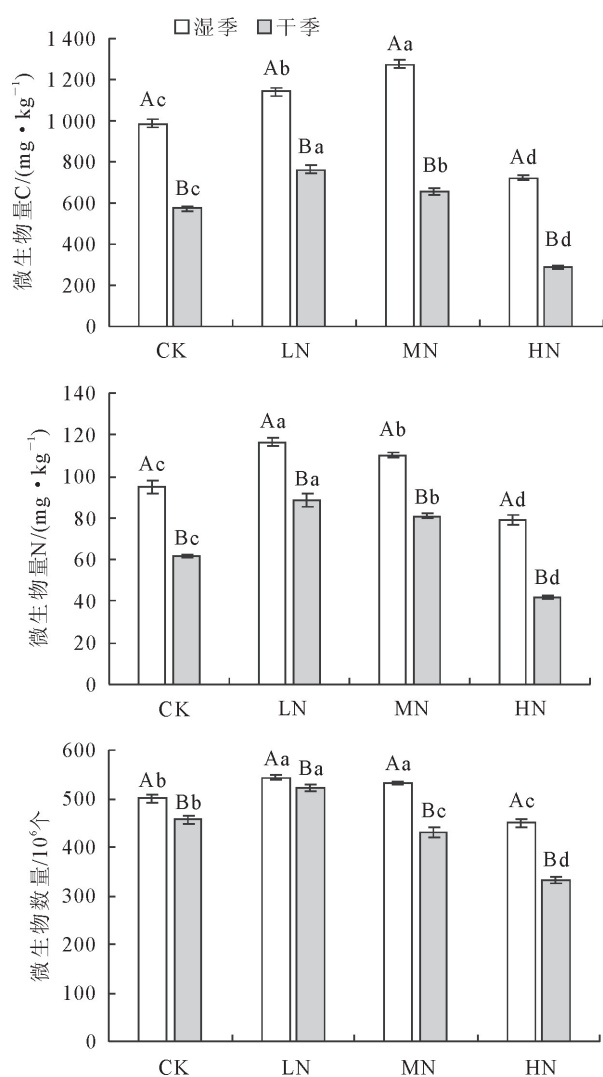


图3 在湿、干季华山松林微生物数量及C、N变化特征

Fig. 3 Microbial number and carbon and nitrogen change characteristics of *P. armandii* forest in the wet and dry seasons

2.5.2 土壤呼吸与土壤特性的相关关系 由表5、表6可知,在湿季,土壤呼吸与土壤TP、TK、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 、AN表现为极显著负相关( $P < 0.01$ ),与pH表现为显著正相关( $P < 0.05$ ),与土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶表现为极显著正相关( $P < 0.01$ )。在干季时,土壤呼吸与土壤TN、TP、TK、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$ 为极显著负相关( $P < 0.01$ ),与微生物数量、pH表现为极显著正相关

( $P < 0.01$ ),与MBC表现为显著正相关( $P < 0.05$ )。

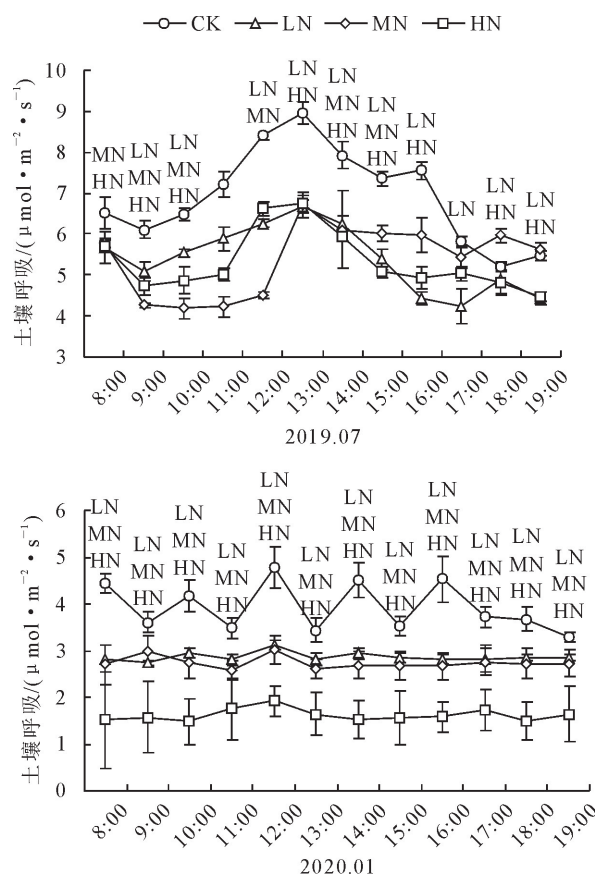
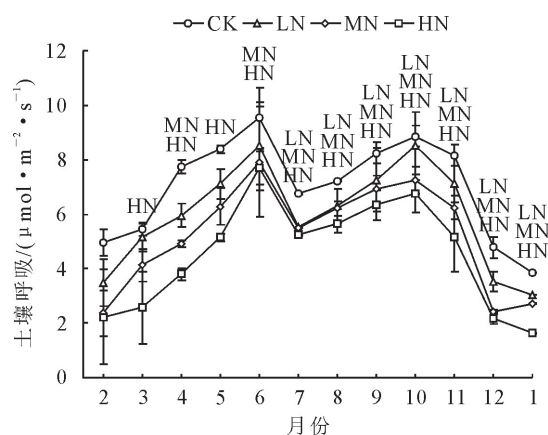


图4 在湿、干季华山松林土壤呼吸日变化特征

Fig. 4 Characteristics of soil respiration in the wet and dry seasons of *P. armandii* forest



横坐标2~12代表2019年2~12月,1代表2020年1月。

图5 华山松林土壤呼吸月变化特征

Fig. 5 Characteristics of soil respiration in *P. armandii* forest

### 3 结论与讨论

#### 3.1 N沉降对土壤呼吸的影响

本研究中,华山松林土壤呼吸日变化在湿季时呈单峰曲线,峰值出现在13:00,其值主要受到土壤温度影响,解释率为25.8%~50.6%;在干季时,土

壤呼吸呈波动变化,这主要是由于干季时土壤呼吸日变化主要受到土壤湿度影响,解释率为 40.6%~62.5%。这与周海霞等<sup>[31]</sup>和邱睿等<sup>[32]</sup>的研究结果一致。因此,季节变化对土壤呼吸也有一定的影响。本研究中,华山松林土壤呼吸月变化呈双峰曲线,峰

值分别出现在 6 月和 10 月,这可能是由于 6 月和 10 月分别达到土壤根系和土壤微生物的最适温度。而孙海燕等<sup>[33]</sup>研究区位于福建武夷山,属于亚热带季风气候,土壤含水量全年较为充足,土壤呼吸则主要受到温度制约,因此呈单峰曲线,致使结果不一致。

表 3 不同 N 沉降下土壤呼吸与土壤温度的关系模型参数

Table 3 Model parameters of soil respiration and soil temperature under different N depositions

处理	7 月					1 月				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>	<i>Q</i> <sub>10</sub>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>	<i>Q</i> <sub>10</sub>
CK	2.657	0.079	0.384	0.017	2.203	2.510	0.043	0.119	0.020	1.537
LN	3.426	0.048	0.258	0.000	1.616	2.018	0.040	0.101	0.003	1.492
MN	2.361	0.044	0.433	0.013	1.553	1.950	0.035	0.235	0.018	1.419
HN	5.166	0.033	0.506	0.042	1.391	1.299	0.022	0.113	0.019	1.246

表 4 不同 N 沉降下土壤呼吸与土壤湿度的关系模型参数

Table 4 Model parameters of the relationship between soil respiration and soil moisture under different N depositions

处理	7 月					1 月				
	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>c</i>	<i>R</i> <sup>2</sup>	<i>P</i>
CK	-0.254	9.075	-74.113	0.365	0.013	-0.254	9.075	-74.113	0.442	0.000
LN	0.197	-6.941	66.531	0.115	0.019	0.197	-6.941	66.531	0.599	0.000
MN	0.285	-9.817	89.751	0.133	0.013	0.285	-9.817	89.751	0.625	0.000
HN	0.414	-15.048	141.677	0.292	0.023	0.414	-15.048	141.577	0.406	0.000

表 5 土壤呼吸与土壤化学性质的相关关系

Table 5 Correlation between soil respiration and soil chemistry

指标	季节	TN	TP	TK	NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	AN	pH	SOC
TP	湿季	0.568	1						
	干季	0.963**	1						
TK	湿季	0.693*	0.892**	1					
	干季	0.770**	0.837**	1					
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	湿季	0.720**	0.858**	0.976**	1				
	干季	0.931**	0.867**	0.759**	1				
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> -N	湿季	0.820**	0.854**	0.966**	0.970**	1			
	干季	0.802**	0.865**	0.946**	0.764**	1			
AN	湿季	0.391	0.917**	0.775**	0.802**	0.721*	1		
	干季	0.668*	0.530	0.180	0.687*	0.122	1		
pH	湿季	-0.045	-0.425	-0.613*	-0.645*	-0.484	-0.519	1	
	干季	-0.453	-0.411	-0.708**	-0.576*	-0.487	-0.305	1	
SOC	湿季	0.849**	0.378	0.677*	0.653*	0.759**	0.113	-0.204	1
	干季	0.489	0.636*	0.784**	0.321	0.833*	-0.275	-0.234	1
土壤呼吸	湿季	-0.487	-0.934**	-0.931**	-0.933**	-0.863**	-0.937**	0.679*	-0.371
	干季	-0.881**	-0.882**	-0.911**	-0.875**	-0.805**	-0.546	0.787**	-0.530

本研究中,首先,不同水平 N 处理对华山松林土壤呼吸均表现出抑制作用,LN、MN、HN 最大抑制幅度分别为 29.8%、52.4%和 58.1%,且随着施 N 浓度的增加,且施 N 浓度增加,抑制作用越显著。这与向元彬等<sup>[34]</sup>在华西雨屏区的常绿阔叶林的结果一致,而刘博奇等<sup>[35]</sup>则认为 N 沉降促进了黑龙江丰林国家级自然保护区云冷杉红松林土壤呼吸(1.12%~18.26%)。这可能是由于本研究区的年

N 沉降量较高(3.84 g/m<sup>2</sup>),而黑龙江丰林国家级自然保护区年平均 N 沉降量仅为 1.88g/m<sup>2</sup><sup>[36]</sup>,本研究区华山松林土壤 N 含量已饱和,N 不再是土壤呼吸受限因子<sup>[37]</sup>,高浓度的 N 沉降会减少土壤养分有效性,抑制根系呼吸<sup>[38]</sup>,从而降低土壤呼吸。其次,N 沉降增加了 TP、TK、NH<sub>4</sub><sup>+</sup>-N、NO<sub>3</sub><sup>-</sup>-N 含量(1.4%~95.5%),抑制土壤过氧化氢酶和多酚氧化酶活性(湿季:14.8%~52.2%,干季:32.7%~

61.8%),土壤呼吸与 TP、TK、 $\text{NH}_4^+-\text{N}$ 、 $\text{NO}_3^--\text{N}$  为极显著负相关,与土壤过氧化氢酶、多酚氧化酶为显著正相关,土壤 pH 下降,土壤原有的养分平衡被打破,影响了土壤生化反应速率,进而影响土壤呼

吸,使土壤呼吸受到抑制。最后,N 沉降的增加,影响了土壤微生物的数量以及群落结构,高浓度 N 降低了微生物活性和数量,降低土壤 C 释放速率,使土壤呼吸受到抑制<sup>[38]</sup>。

表 6 土壤呼吸与土壤酶和微生物的相关关系

Table 6 Relationship between soil respiration and soil enzymes and microorganisms

指标	季节	脲酶	蔗糖酶	过氧化氢酶	多酚氧化酶	微生物数量	MBC	MBN
蔗糖酶	湿季	0.611 *	1					
	干季	-0.392	1					
过氧化氢酶	湿季	-0.406	-0.183	1				
	干季	-0.286	0.966 * *	1				
多酚氧化酶	湿季	0.363	0.608 *	0.610 *	1			
	干季	0.115	0.704 *	0.605 *	1			
微生物数量	湿季	0.914 * *	0.571	-0.257	0.462	1		
	干季	0.835 * *	-0.186	0.010	0.075	1		
MBC	湿季	0.909 * *	0.810 * *	-0.307	0.535	0.941 * *	1	
	干季	0.829 * *	-0.475	-0.268	-0.240	0.943 * *	1	
MBN	湿季	0.930 * *	0.519	-0.369	0.342	0.990 * *	0.920 * *	1
	干季	0.837 * *	-0.653 *	-0.477	-0.328	0.863 * *	0.973 * *	1
土壤呼吸	湿季	-0.072	0.074	0.932 * *	0.826 * *	0.099	0.050	-0.023
	干季	0.400	0.253	0.489	0.003	0.746 * *	0.655 *	0.470

注: \* 表示显著相关( $P<0.05$ ), \* \* 表示极显著相关( $P<0.01$ )。

3.2 N 沉降下土壤温、湿度对土壤呼吸的影响

土壤温度是影响土壤呼吸的主要因子之一<sup>[39]</sup>。本研究中,不同水平 N 处理下,华山松林土壤呼吸与土壤温度之间均呈显著正相关关系( $P<0.05$ )。但是不同水平 N 处理下,土壤呼吸的温度敏感性  $Q_{10}$  均被降低(2.93%~36.86%),这与高伟峰等<sup>[40]</sup>对阔叶红松林的研究结果一致,原因可能是根系、土壤微生物和土壤动物对于温度敏感性的贡献不同<sup>[41]</sup>,N 添加会对根系、土壤微生物和土壤动物造成影响,进而进一步影响土壤呼吸温度敏感性<sup>[42-43]</sup>。本研究中,土壤湿度与土壤呼吸呈显著相关关系( $P<0.05$ ),而周迎<sup>[44]</sup>研究长沙森林植物园樟树林和湿地松林结果表明土壤湿度对土壤呼吸的影响无显著相关性( $P>0.05$ ),这与本研究结果不同。这可能是由于本研究区季节呈明显的干湿两季<sup>[45]</sup>,导致不同季节降水、蒸发量等不均匀,使土壤湿度在湿干季差异较大;而长沙森林植物园属于亚热带季风气候,年降雨量分布较为均匀,且冬季蒸发量相对较低,导致土壤湿度在年变化内不会出现大的波动,从而使得土壤湿度并未成为限制土壤微生物的活动与生长的因素,因此土壤湿度对土壤呼吸影响不显著。

由此可见,影响土壤呼吸的因素具有多样性,土壤特性、N 沉降水平、土壤温度、湿度等都会影响,为进一步探究 N 沉降对土壤呼吸的影响,仍需要长时间的试验研究,多方面探讨,以便深入了解土壤呼吸与土壤特性的耦合机制。

参考文献:

[1] BEVERLY L. Biogeochemistry: nitrogen deposition and forest carbon[J]. *Nature*, 2013, 496(7445): 307-308.

[2] LIU X J, ZHANG Y, HAN W X, *et al.* Enhanced nitrogen deposition over China[J]. *Nature*, 2013, 494(7438): 459-462.

[3] CUIS H, SHIY L, GROFFMANP M, *et al.* Centennial-scale analysis of the creation and fate of reactive nitrogen in China (1910—2010)[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110(6): 2052-2057.

[4] 郭超,王霖娇. 氮沉降对森林生态系统土壤微生物、酶活性以及细根生产与周转的影响研究进展[J]. *生态学杂志*, 2021, 40(11): 3730-3741.

GUO C, WANG L J. Effects of nitrogen deposition on soil microbes, enzyme activities, fine root production and turnover in forest ecosystems: a review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2021, 40(11): 3730-3741. (in Chinese)

[5] RAICHJ W and SCHLESINGERW H. The global carbon dioxide flux in soil respiration and its relationship to vegetation and climate[J]. *Tellus B.*, 1992, 44(2): 81-99.

[6] 谢君毅,徐侠,蔡斌,等. “碳中和”背景下碳输入方式对森林土壤活性氮库及氮循环的影响[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2022, 46(2): 1-11.

XIE J Y, XU X, CAI B, *et al.* Responses of forest soil labile nitrogen pool and nitrogen cycle to the changes of carbon input under "carbon neutrality"[J]. *Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition*, 2022, 46(2): 1-11. (in Chinese)

[7] 熊小玲,任寅榜,吕茂奎,等. 武夷山不同海拔典型森林土壤有机碳和全氮储量分布特征[J]. *水土保持研究*, 2022, 29(4): 83-88.

XIONG X L, REN Y B, LÜ M K, *et al.* Distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen storage in typical



- forest soils at different altitudes in Wuyishan Mountain[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022, 29(4): 83-88. (in Chinese)
- [8] 李奕霏, 肖谋良, 袁红朝, 等. CO<sub>2</sub> 倍增对稻田土壤碳氮水解酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2018, 38(9): 3474-3480.
- [9] 魏书精, 罗碧珍, 魏书威, 等. 森林生态系统土壤呼吸测定方法研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 504-514.
- WEI S J, LUO B Z, WEI S W, *et al.* Methods of measuring of soil respiration in forest ecosystems: a review[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2014, 23(3): 504-514. (in Chinese)
- [10] 王静, 王磊, 刘耀斌, 等. 长期施氮肥对黄棕壤微生物生物性状的影响及其调控因素[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(5): 833-843.
- WANG J, WANG L, LIU Y B, *et al.* Effects and associated regulatory factors of the microbial characteristics of yellow-brown soils following long-term nitrogen fertilization[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(5): 833-843. (in Chinese)
- [11] 黄玉梓, 樊后保, 李燕燕, 等. 氮沉降对杉木人工林土壤呼吸与土壤纤维素酶活性的影响[J]. 福建林学院学报, 2009, 29(2): 120-124.
- HUANG Y Z, FAN H B, LI Y Y, *et al.* Impacts of nitrogen deposition on the soil respiration rate and soil cellulose enzyme activity in Chinese fir plantation[J]. Journal of Fujian College of Forestry, 2009, 29(2): 120-124. (in Chinese)
- [12] FENDER A C, GANSERT D, JUNGKUNST H F, *et al.* Root-induced tree species effects on the source/sink strength for greenhouse gases (CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub>) of a temperate deciduous forest soil[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2013, 57: 587-597.
- [13] 王红, 王邵军, 李霄航, 等. 森林土壤呼吸及其主要调控因素研究进展[J]. 西北林学院学报, 2017, 32(1): 92-97.
- WANG H, WANG S J, LI Q H, *et al.* Characteristics and the influencing factors of forest soil respiration: a review[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2017, 32(1): 92-97. (in Chinese)
- [14] 王新源, 李玉霖, 赵学勇, 等. 干旱半干旱区不同环境因素对土壤呼吸影响研究进展[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4890-4901.
- WANG X Y, LI Y L, ZHAO X Y, *et al.* Responses of soil respiration to different environment factors in semi-arid and arid areas[J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(15): 4890-4901. (in Chinese)
- [15] 白英辰, 陈晶, 康峰峰, 等. 模拟氮沉降下不同凋落物处理对太岳山华北落叶松林土壤呼吸的影响[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(4): 92-99.
- BAI Y C, CHEN J, KANG F F, *et al.* Effect of different litter treatment under simulated nitrogen deposition on soil respiration in *Larix principis-rupprechtii* Mayr. plantation in the Taiyue Mountain, China[J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2017, 37(4): 92-99. (in Chinese)
- [16] 张娇, 郝龙飞, 王庆成, 等. 模拟氮沉降对落叶松人工林土壤呼吸的影响[J]. 植物研究, 2016, 36(4): 596-604.
- [17] 孙素琪, 王玉杰, 王云琦, 等. 缙云山常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 林业科学, 2014, 50(1): 1-8.
- SUN S Q, WANG Y J, WANG Y Q, *et al.* Responses of soil respiration to simulated nitrogen deposition in an evergreen broad-leaved forest in Jinyun Mountain[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2014, 50(1): 1-8. (in Chinese)
- [18] 程淑兰, 方华军, 徐梦, 等. 氮沉降增加情景下植物-土壤-微生物交互对自然生态系统土壤有机碳的调控研究进展[J]. 生态学报, 2018, 38(23): 8285-8295.
- CHENG S L, FANG H J, XU M, *et al.* Regulation of plant-soil-microbe interactions to soil organic carbon in natural ecosystems under elevated nitrogen deposition: a review[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(23): 8285-8295. (in Chinese)
- [19] 余景松, 付若仙, 俞元春, 等. 氮沉降对北亚热带麻栎林土壤呼吸及其温湿度敏感性的影响[J]. 生态学报, 2021, 40(4): 1029-1037.
- YU J S, FU R X, YU Y C, *et al.* Effects of nitrogen deposition on soil respiration and its sensitivity to temperature and humidity in a *Quercus acutissima* forest in northern subtropics[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(4): 1029-1037. (in Chinese)
- [20] WANG Q K, ZHANG W D, SUN T, *et al.* N and P fertilization reduced soil autotrophic and heterotrophic respiration in a young *Cunninghamia lanceolata* forest[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 232: 66-73.
- [21] 陈平, 赵博, 闫子超, 等. 太岳山油松人工林土壤呼吸对模拟氮沉降的短期响应[J]. 生态学报, 2018, 38(22): 8184-8193.
- CHEN P, ZHAO B, YAN Z C, *et al.* Short-term response of soil respiration to simulated nitrogen deposition in a *Pinus tabulaeformis* plantation on Taiyue Mountain, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): 8184-8193. (in Chinese)
- [22] 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 F, WANG K Q, SONG Y L, *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. (in Chinese)
- [23] 潘禹, 王克勤, 宋娅丽, 等. 华山松林凋落物养分释放及土壤生态化学计量特征对模拟氮沉降的短期响应[J]. 生态环境学报, 2021, 30(3): 492-502.
- PAN Y, WANG K Q, SONG Y L, *et al.* Short-term responses of litter nutrient release and soil ecological stoichiometry to simulated nitrogen deposition in *Pinus armandii* forest in central Yunnan, China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2021, 30(3): 492-502. (in Chinese)
- [24] 张雨鉴, 宋娅丽, 王克勤, 等. 模拟氮沉降对滇中高山栎林凋落物碳氮磷释放和生态化学计量特征的影响[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2022, 50(11): 1-12.
- ZHANG Y J, SONG Y L, WANG K Q, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on C, N and P release from litter and ecological stoichiometry in *Quercus aquifolioides* forest in central Yunnan[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Sciences Edition, 2022, 50(11): 1-12. (in Chinese)
- [25] ABER J, MCDOWELL W, NADELHOFFER K, *et al.* Nitrogen saturation in temperate forest ecosystems[J]. Biological Science, 1998, 48(11): 921-934.
- [26] 胡峻嵒, 陈蕙心, 周世兴, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常

- 绿阔叶林凋落叶分解过程中 K、Ca、Mg 元素释放的影响[J]. 林业科学研究, 2020, 33(3): 124-131.
- [27] 林玉. 模拟氮沉降对四川盆地西缘常绿阔叶林土壤微生物和酶活性的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2020.
- [28] 张英, 张常洪, 汪其同, 等. 氮沉降下西南山地针叶林根际和非根际土壤微生物养分限制特征差异[J]. 植物生态学报, 2022, 46(4): 473-483.
- ZHANG Y, ZHANG C H, WANG Q T, *et al.* Difference of microbial nutrient limiting characteristics in rhizosphere and bulk soil of coniferous forests under nitrogen deposition in southwest mountain, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2022, 46(4): 473-483. (in Chinese)
- [29] 何美霞. 模拟大气氮沉降对亚热带喀斯特森林土壤氧化亚氮排放的影响机制[D]. 桂林: 广西师范大学, 2022.
- [30] 潘禹, 宋娅丽, 王克勤, 等. 模拟 N 沉降对滇中亚高山典型森林凋落物分解及土壤微生物的影响[J]. 林业科学研究, 2021, 34(3): 88-97.
- [31] 周海霞, 张彦东, 孙海龙, 等. 东北温带次生林与落叶松人工林的土壤呼吸[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2668-2674.
- ZHOU H X, ZHANG Y D, SUN H L, *et al.* Soil respiration in temperate secondary forest and *Larix gmelinii* plantation in northeast China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2007, 18(12): 2668-2674. (in Chinese)
- [32] 邱睿, 魏江生, 周梅, 等. 氮沉降对大兴安岭南段白桦林土壤呼吸的影响[J]. 内蒙古农业大学学报: 自然科学版, 2015, 36(5): 35-41.
- QIU R, WEI J S, ZHOU M, *et al.* Effects of simulated nitrogen deposition on soil respiration in *Betula platyphylla* forest in south of Daxing'anling Mountains in China[J]. Journal of Inner Mongolia Agricultural University: Natural Sciences Edition, 2015, 36(5): 35-41. (in Chinese)
- [33] 孙海燕, 赵俊平, 肖艳玲, 等. 模拟氮沉降对武夷山亚热带常绿阔叶林土壤呼吸的影响[J]. 生态环境学报, 2018, 27(9): 1632-1638.
- SUN H Y, ZHAO J P, XIAO Y L, *et al.* Soil respiration and its response to simulated nitrogen deposition in a subtropical evergreen broad-leaved forest in mount Wuyi[J]. Ecology and Environment Sciences, 2018, 27(9): 1632-1638. (in Chinese)
- [34] 向元彬, 黄从德, 胡庭兴, 等. 华西雨屏区常绿阔叶林土壤呼吸对模拟氮沉降的响应[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2016, 44(10): 68-74, 82.
- XIANG Y B, HUANG C D, HU T X, *et al.* Responses of soil respiration to simulated nitrogen deposition in evergreen broad-leaved forest in the rainy area of Western China [J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Sciences Edition, 2016, 44(10): 68-74, 82. (in Chinese)
- [35] 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.
- [36] 王小云, 温腾. 模拟氮沉降对小兴安岭地区人工红松林土壤氮转化的影响[J]. 土壤通报, 2017, 48(3): 604-610.
- WANG X Y, WEN T. Effects of simulated nitrogen deposition on soil nitrogen transformation in artificial Korean pine of Xiaoxing'anling region[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(3): 604-610. (in Chinese)
- [37] 李伟, 白娥, 李善龙, 等. 施氮和降水格局改变对土壤 CH<sub>4</sub> 和 CO<sub>2</sub> 通量的影响[J]. 生态学杂志, 2013, 32(8): 1947-1958.
- LI W, BAI E, LI S L, *et al.* Effects of nitrogen addition and precipitation change on soil methane and carbon dioxide fluxes [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013, 32(8): 1947-1958. (in Chinese)
- [38] CARFRAE J A, SKENE K R, SHEPPARD L J, *et al.* Effects of nitrogen with and without acidified sulphur on an ectomycorrhizal community in a Sitka spruce (*Picea sitchensis* Bong. Carr) forest [J]. Environmental pollution, 2006, 141(1): 131-138.
- [39] 付若仙, 余景松, 张云彬, 等. 氮添加下城市森林土壤呼吸动态变化及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2020, 31(3): 744-752.
- FU R X, YU J S, ZHANG Y B, *et al.* Dynamics of soil respiration and its influencing factors in urban forests under nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2020, 31(3): 744-752. (in Chinese)
- [40] 高伟峰, 史宝库, 金光泽. 模拟氮沉降对典型阔叶红松林土壤呼吸的影响[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2016, 40(1): 8-14.
- GAO W F, SHI B K, JIN G Z, *et al.* Effect of simulated nitrogen deposition on soil respiration in the typical mixed broad-leaved-Korean pine forest[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2016, 40(1): 8-14. (in Chinese)
- [41] 唐燕飞, 王国兵, 阮宏华. 土壤呼吸对温度的敏感性研究综述[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2008, 32(1): 124-128.
- TANG Y F, WANG G B, RUAN H H. A review on the sensitivity of soil respiration to temperature[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2008, 32(1): 124-128. (in Chinese)
- [42] 高士杰, 王春梅, 王鹏, 等. 多形态多水平氮添加对温带森林土壤根系呼吸和微生物呼吸的影响[J]. 环境化学, 2020, 39(6): 1568-1577.
- GAO S J, WANG C M, WANG P, *et al.* Effects of multi-form and multi-level nitrogen addition on root respiration and microbial respiration in temperate forest soil[J]. Environmental Chemistry, 2020, 39(6): 1568-1577. (in Chinese)
- [43] 王可洪, 武海涛, 吴东辉. 土壤动物对土壤呼吸的影响研究进展[J]. 土壤通报, 2013, 44(6): 1526-1530.
- WANG K H, WU H T, WU D H. Effects of soil fauna on soil respiration: research progress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2013, 44(6): 1526-1530. (in Chinese)
- [44] 周迎. 模拟氮沉降对樟树林和湿地松林土壤呼吸的影响[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2015.
- [45] 杨子生, 谢应齐, 杨绍武. 蒸发比( $E/E_0$ )指标在云南省干湿气候区划与干湿气候分类中的应用[J]. 云南大学学报: 自然科学版, 1994, 16(Supp. 1): 91-98, 106.
- YANG Z S, XIE Y Q, YANG S W. The application of evaporation ratio( $E/E_0$ ) to the regionalization and classification of arid and humid climate of Yunnan Province[J]. Journal of Yunnan University: Natural Sciences Edition, 1994, 16(Supp. 1): 91-98, 106. (in Chinese)