

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2021.03.010

# 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

潘禹, 宋娅丽, 王克勤\*, 张雨鉴, 郑兴蕊

(西南林业大学生态与环境学院, 云南昆明 650224)

**摘要:** [目的] 模拟 N 沉降下调落物分解及土壤微生物特征, 为研究森林生态系统碳、氮循环对氮沉降的响应机制提供依据。[方法] 以滇中亚高山常绿阔叶林、华山松 (*Pinus armandii*) 林、高山栎 (*Quercus semicarpifolia*) 林和云南松 (*Pinus yunnanensis*) 林凋落物为研究对象, 采用凋落物袋法, 于 2018 年 2 月至 2019 年 1 月, 通过模拟 N 沉降和原位分解实验, 研究不同模拟 N 沉降下 (CK, 0; LN, 5; MN, 15; HN, 30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>) 凋落物碳氮、土壤微生物量碳 (MBC)、微生物量氮 (MBN) 及土壤微生物数量变化特征。[结果] 分解 1 年后, 不同 N 沉降处理下, 常绿阔叶林和高山栎林凋落物 C 含量均显著增加 (0.40%~8.16%), 华山松林和云南松林凋落物 C 含量呈 LN 减少 (2.67%), HN 增加 (4.09%); 各林分凋落物 N 含量均显著增加 (1.45%~69.01%), C/N 则显著降低 (0.34%~37.92%); 相同 N 沉降下土壤微生物量随土层的加深而减小, N 沉降对土层垂直分布格局影响不显著; N 沉降对常绿阔叶林和高山栎林土壤 MBC 和 MBN 的影响表现为抑制, 对华山松林和云南松林表现为低 N 促进, 高 N 抑制; 4 种林分土壤 MBC/MBN 介于 5.31~11.26 之间, N 沉降对不同林分不同土层的 MBC/MBN 影响存在差异, 但均受到高 N 的抑制作用。[结论] 滇中亚高山 4 种典型森林凋落物分解主要受森林类型影响, N 沉降次之; 土壤微生物量和数量主要受森林类型影响, 土壤深度次之, N 沉降最小。

**关键词:** 氮沉降; 凋落物分解; 微生物量碳氮; 滇中亚高山

**中图分类号:** S718.51

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-1498(2021)03-0088-10

凋落物是森林生态系统养分循环的重要组分, 其养分释放作为森林营养循环过程中的关键环节, 对植物的生长发育、土壤理化性质以及森林生态系统 C、N 循环均具有关键作用<sup>[1]</sup>。土壤微生物在土壤养分循环过程中扮演极为重要的角色, 是凋落物分解过程中不可或缺的一部分<sup>[2]</sup>。凋落物分解通过改变 C、N 等养分元素归还量来影响土壤微生物数量及活性, 从而改变微生物养分固定量和提供植物生长的养分比例, 进而影响生态系统中 C、N 循环<sup>[3]</sup>。

N 沉降的持续增加可通过改变森林凋落物量, 使植物-土壤微生物的养分格局发生变化, 间接影响凋落物-土壤-土壤微生物之间的关系, 对凋落物

分解、土壤微生物活性、土壤 C 库等造成重要影响, 进而促进或抑制森林生态系统 C 和 N 的循环<sup>[4]</sup>。韩雪等<sup>[5]</sup>在对北京西山辽东栎 (*Quercus liaotungensis* Blume.) 进行为期 2 年的模拟 N 沉降实验时发现, N 沉降减缓了凋落物的分解速率, 且不同 N 处理显著增加凋落物 N 含量, 但对凋落物 C 含量影响不显著; 李登峰等<sup>[6]</sup>在对常绿阔叶林进行模拟 N 沉降实验时发现, 随着 N 浓度的上升, 凋落物 C 含量增长显著, 而凋落物 N 含量变化不大; 魏圣钊等<sup>[7]</sup>在华西雨屏区常绿阔叶林凋落物分解中发现 MBC 和 MBN 在 N 处理下表现为低 N 促进, 高 N 抑制; Van 等<sup>[8]</sup>在北美阔叶林进行长期 N 处理实

收稿日期: 2020-08-08 修回日期: 2020-10-30

基金项目: 云南省教育厅研究生科学研究基金项目 (2019Y01134); 云南省国家级大学生创新训练项目 (20191067707); 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 (2020132078) 和云南玉溪森林生态系统国家长期科研基地 (2020132550) 资助

\* 通讯作者: 王克勤, 博士, 教授, 研究方向: 生态系统功能与小流域环境综合治理, E-mail: wangkeqin7389@sina.com

验时发现 MBC/MBN 降低 10%, 微生物总生物量降低 1/4。在以上模拟 N 沉降的研究中, 国内外学者对凋落物分解多集中于单一森林类型下土壤微生物量的变化特征<sup>[9]</sup>, 但对不同森林类型下凋落物分解对土壤微生物数量影响以及凋落物分解、土壤微生物量碳氮及土壤微生物数量之间关系的研究则鲜有报道。

滇中亚高山磨盘山地区位于云贵高原的西部边缘, 自然条件独特, 植被多以中山半湿性阔叶林为主<sup>[10]</sup>。本研究以该地区不同森林生态系统云南松 (*Pinus yunnanensis* Franch.) 林、华山松 (*Pinus armandii* Franch.) 林、常绿阔叶林以及高山栎 (*Quercus semicarpifolia* Smith.) 林为研究对象, 采用凋落物袋法, 通过原位分解和模拟 N 沉降实验, 分析 N 沉降下 4 种不同森林凋落物分解及土壤微生物特征, 研究以下两个问题: (1) 分解 1 年后, 4 种不同森林凋落物 C、N 含量、MBC 和 MBN 及土壤微生物数量特征对 N 沉降如何响应? (2) N 沉降下, 凋落物生物量与土壤微生物量有何相互关系? 通过以上研究, 揭示 N 沉降下不同林分类型下凋落物与土壤微生物在 C、N 生物地球化学循环机制中的作用, 为滇中亚高山森林管理和建设提供科学依据。

## 1 研究地区与研究方法

### 1.1 研究区概况

试验地位于云南省玉溪市磨盘山森林定位研究站 (23°46'18"~23°54'34" N, 101°16'06"~101°16'12" E),

海拔 2 215.8 m。该地区山地气候特征较为显著, 且位于亚热带南北两部气候交汇处, 属于中亚热带气候, 年均气温 15℃, 年均降水量为 1 050 mm, 降水主要集中在 5—10 月。研究区域森林覆盖率达 85% 以上, 植被垂直分布特征较为明显, 主要的林分类型有针叶林、高山矮林以及常绿阔叶林等。

### 1.2 研究方法

**1.2.1 试验设计** 于 2017 年 11 月, 分别收获 4 种林分的新鲜凋落物, 相同林分的凋落物充分混匀。风干后, 分别准确称取 10 g 装入大小为 20 cm × 20 cm 的分解袋 (孔径为 1 mm)。以析因设计法于 2018 年 1 月在 4 种森林下各设置 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, 减少样地环境对土壤微生物量的影响。样方之间距离大于 10 m, 防止相互干扰。将前期准备好的凋落物袋均匀摆放在各样方中 (各 3 个重复), 并对各样方中的凋落物喷施 NH<sub>4</sub>NO<sub>3</sub> 溶液 (模拟 N 沉降)。

本实验 N 沉降水平主要参考北美地区 Harvard Forest 以及华西地区所布设的实验<sup>[11-12]</sup>, 并结合我国西南地区及本地区年沉降量 (3.84 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), N 沉降共设定 4 个水平: 对照 (CK, 0 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、低 N (LN, 5 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、中 N (MN, 15 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>)、高 N (HN, 30 g·m<sup>-2</sup>·a<sup>-1</sup>), 每个水平 3 个重复。将 1 年的使用量分为均等的 12 份, 从 2018 年 1 月初开始, 遵循上述各水平对样方进行施 N 处理, 对照组施相同量的水。除施 N 外, 其他措施保持一致, 样地情况如表 1。

表 1 4 种森林类型研究样地概况

Table 1 Geophysical characteristics of the investigating plots in four forest types

森林类型 Forest type	样地编号 Plot number	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	郁闭度 Canopy density	平均胸径 Average DBH/cm	平均树高 Average H/m	林龄 Age/a
常绿阔叶林 Evergreen broad-leaf forest	1	2 258	13	NW	0.85	9.5	9.0	16
	2	2 193	15	NW	0.90	9.0	9.2	14
	3	2 236	16	NW	0.87	8.9	8.9	16
华山松林 <i>P.armandii</i> forest	1	2 119	18	NE	0.60	12.3	10.9	19
	2	2 178	20	NE	0.65	11.0	10.3	18
	3	2 156	19	NE	0.73	12.1	9.9	19
高山栎林 <i>Q.semicarpifolia</i> forest	1	2 208	16	NE	0.92	9.0	4.5	14
	2	2 373	14	NE	0.88	10.0	4.0	15
	3	2 281	15	NE	0.90	10.6	4.0	15
云南松林 <i>P.yunnanensis</i> forest	1	2 193	13	NW	0.73	10.2	8.4	22
	2	2 158	15	NW	0.82	12.5	11.0	24
	3	2 236	12	NW	0.75	11.0	9.0	22

1.2.2 样品的采集 施N处理1年后,于2019年1月,对各林分各处理样方中的凋落物进行取样,各样方取凋落叶和枝各3袋,清除袋中的杂物,风干。在取凋落物的同时,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5钻,将同一林分中同一N沉降处理下相同土层的土样充分混合。

1.2.3 样品的测定 凋落物在恒温干燥箱内烘干,粉碎并过筛。采用重铬酸钾-外加热硫酸氧化法(LY/T 1237—1999)测定碳含量<sup>[10]</sup>,采用半微量凯氏定氮法(LY/T 1269—1999)测定氮含量<sup>[10]</sup>。

土壤微生物量碳(MBC)和土壤微生物量氮(MBN)采用氯仿熏蒸浸提法测定<sup>[13]</sup>。土壤微生物计数采用琼脂膜法<sup>[14]</sup>。MBC、MBN分别用下式<sup>[15]</sup>求得:

$$MBC = E_C / k_C$$

$$MBN = E_N / k_N$$

式中: $E_C$ 、 $E_N$ 分别为熏蒸和未熏蒸浸提液中土壤有机碳、全氮的差值; $k_C$ 、 $k_N$ 为转化系数,分别为0.38、0.54。

### 1.3 数据处理

数据统计分析利用SPSS25.0软件完成。采用双因素方差分析,分析不同森林类型和N沉降下C、N含量,各组分C/N均以质量比表示;采用多因素方差分析,分析不同森林类型,不同土层,不同N沉降下微生物生物量C、N、微生物数量,各组分微生物生物量C/N均以质量比表示,显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

## 2 结果分析

### 2.1 N沉降对凋落物碳氮含量的影响

由图1可知,分解1年后不同N沉降下,各林分类型凋落物C含量平均值总体表现为:云南松林>高山栎林>华山松林>常绿阔叶林。与CK相比,常绿阔叶林凋落物C含量均显著增加(2.56%~8.16%);LN和MN下华山松林凋落叶C含量分别降低2.35%和1.13%,HN下增加1.24%,LN下凋落枝降低2.67%;高山栎林C含量则与常绿阔叶林趋势相同;HN下云南松林凋落叶和枝C含量分别增加3.97%和4.09%。

各林分类型凋落物N含量平均值总体表现为:高山栎林>常绿阔叶林>华山松林>云南松

林。随着N沉降的增加,常绿阔叶林下调落物N含量均显著增加( $P < 0.05$ ),与CK相比,凋落叶增加27.18%~69.01%,凋落枝增加12.76%~26.78%;华山松林凋落物N含量总体呈现上升趋势(增加22.37%~60.29%);高山栎林MN下调落叶和枝比CK显著增加13.02%和11.74%;云南松林HN下调落叶和枝N含量比CK显著增加67.67%和22.29%。

不同林分类型凋落物C/N在不同N沉降处理下变化范围在36.39~96.55之间。随着N沉降的增加,4种林分类型凋落物C/N总体均呈下降趋势。与CK相比,常绿阔叶林凋落叶降低25.11%~36.00%,凋落枝降低15.99%~16.29%;华山松林凋落叶降低19.20%~34.28%,凋落枝降低37.91%;MN下高山栎林凋落叶和枝分别降低8.10%和9.08%;云南松林凋落叶降低2.66%~2.91%,凋落枝降低20.94%~37.92%。

### 2.2 N沉降对土壤微生物量碳氮含量的影响

由图2可知,不同N沉降下,4种林分类型土壤MBC质量分数变化范围在104.20~1041.99 mg.kg<sup>-1</sup>之间,相同土层不同森林类型平均值表现为云南松林>常绿阔叶林>高山栎林>华山松林,云南松林MBC比其他3个林分高出23.27%~60.34%;不同土层相同森林类型表现为0~5>5~10>10~20 cm,0~5 cm分别为5~10 cm和10~20 cm的1.36和2.08倍。随着N沉降的增加,常绿阔叶林3个土层的MBC均逐渐降低(10.00%~66.67%);华山松林则呈先增加后降低的趋势,在LN处达到最高值(555.73 mg.kg<sup>-1</sup>);高山栎林在0~5 cm和5~10 cm土层逐渐降低,10~20 cm呈波动趋势;云南松林则与华山松林趋势相同。

由图3可知,不同N沉降下,4种林分类型土壤MBN质量分数变化范围为19.09~109.57 mg.kg<sup>-1</sup>,相同土层不同森林类型平均值表现为云南松林>常绿阔叶林>高山栎林>华山松林,云南松林MBN比其他3个林分高出24.86%~60.54%;。不同土层相同森林类型表现为0~5>5~10>10~20 cm,0~5 cm分别为5~10 cm和10~20 cm的1.28和1.70倍。随着N沉降的增加,常绿阔叶林和高山栎林3个土层的MBN均逐渐降低(4.66%~58.40%和5.15%~62.70%);华山松林则呈先增加后减少的趋势,且在LN处达到最高值(54.90 mg.kg<sup>-1</sup>)( $P <$

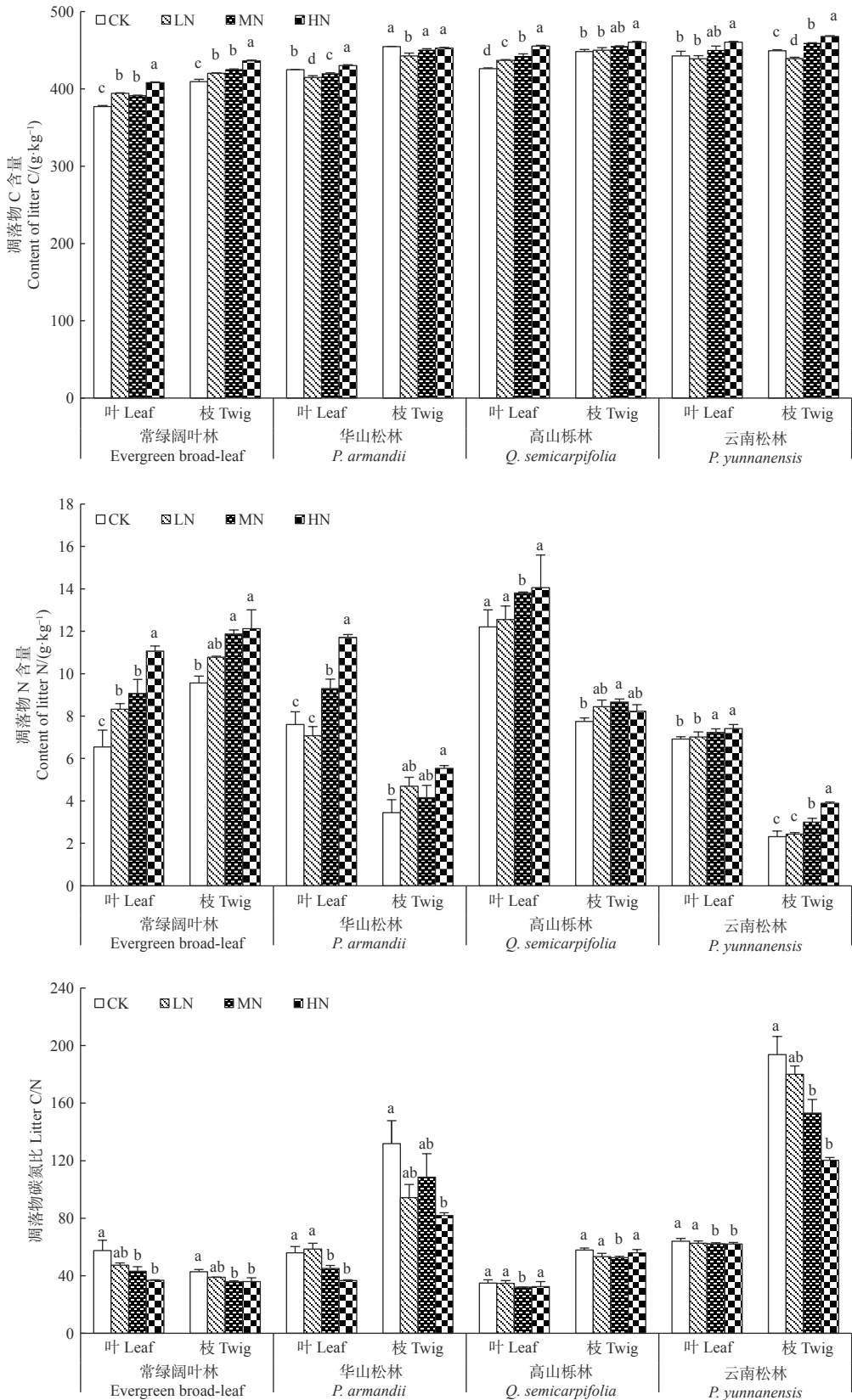
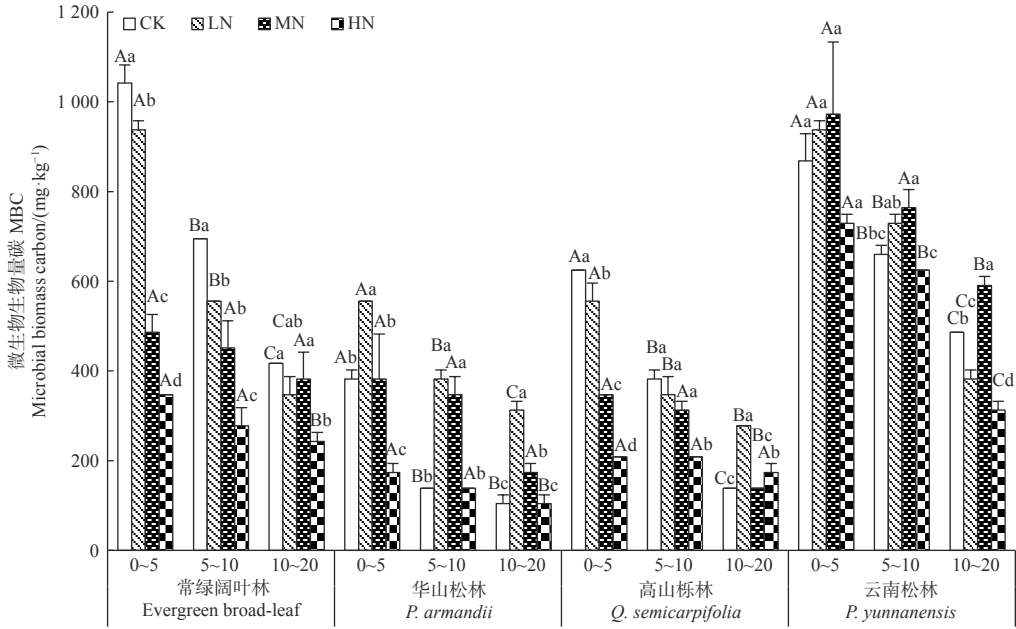


图 1 4 种森林类型凋落物 C 含量、N 含量及碳氮比

Fig. 1 Litter C and N content and C/N in four forest types



注：0~5、5~10、10~20 cm 表示土壤深度；不同小写字母表示同林型同土层不同施氮处理间差异显著 ( $P < 0.05$ )；不同大写字母表示同林型同施氮处理不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ )。下同。

Notes: 0~5, 5~10 and 10~20 cm indicate soil depth. Different lowercase letters indicate significant differences between different nitrogen treatments in the same forest type and soil layer ( $P < 0.05$ ). Different capital letters indicate significant differences between different soil layers in the same forest type and nitrogen treatment ( $P < 0.05$ ). The same below.

图 2 4 种森林类型土壤 MBC 的变化

Fig. 2 Variation of soil microbial biomass carbon (MBC) in four forest types

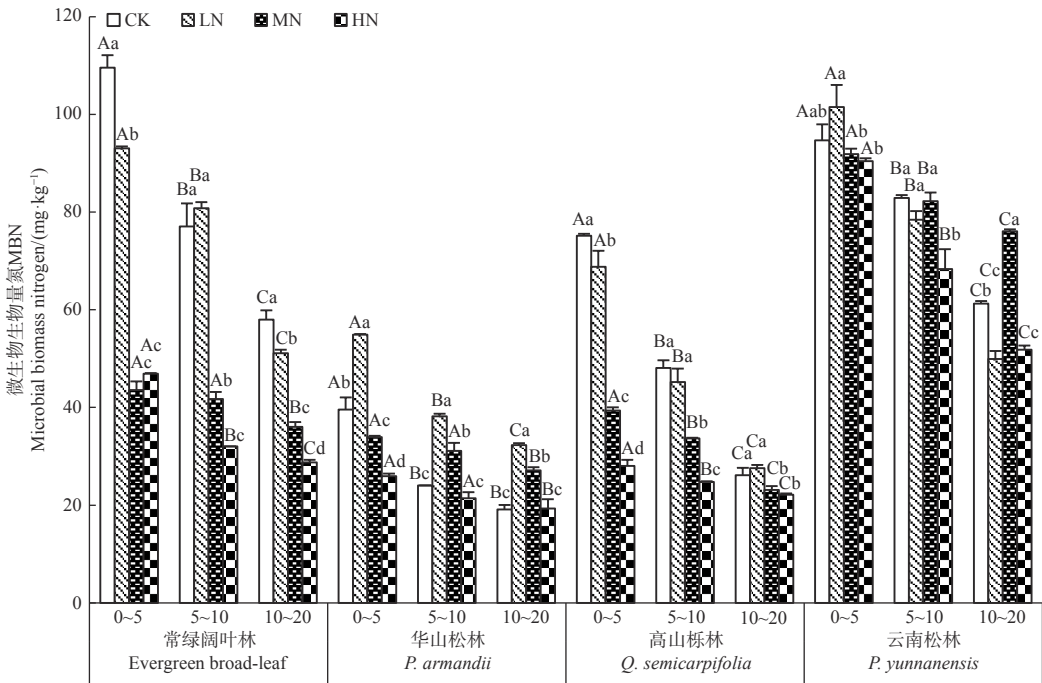


图 3 4 种森林类型土壤 MBN 的变化

Fig. 3 Variation of soil microbial biomass nitrogen (MBN) in four forest types

0.05)；云南松林则呈波动趋势。

由图 4 可知，不同 N 沉降下，4 种林分类型土

壤 MBC/MBN 变化范围在 5.31~11.26 之间。不同土层相同森林类型，总体差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

随着 N 沉降的增加, 常绿阔叶林 3 个土层的 MBC/MBN 呈波动趋势, 但均在 MN 处达到最高值 11.15; 华山松林总体呈先增加后降低的趋势, 0~5 cm 和

5~10 cm 土层峰值出现在 MN (11.26 和 11.17), 10~20 cm 则出现在 LN (9.68); 高山栎林和与云南松林则呈波动趋势。

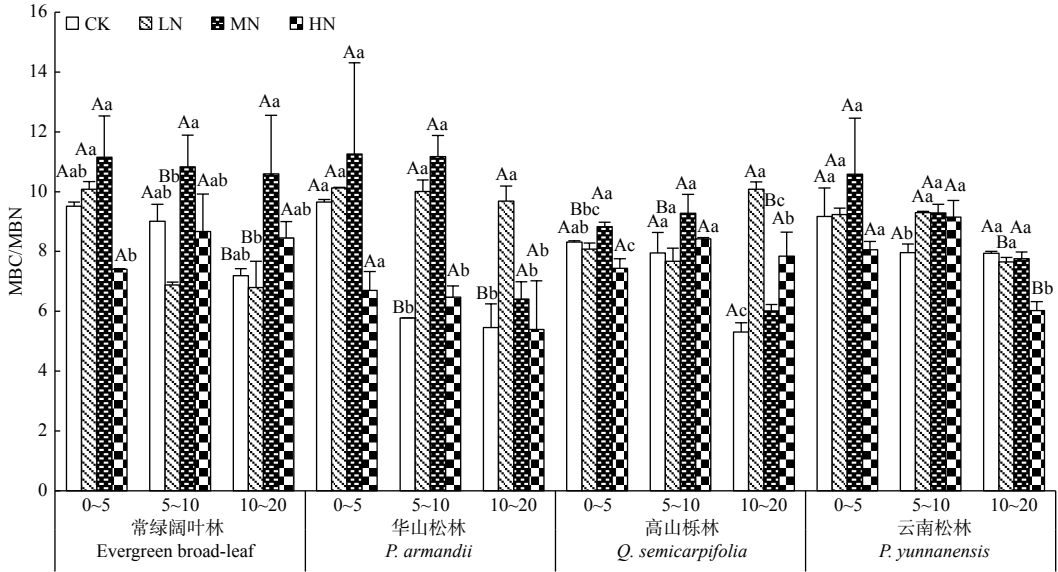


图 4 4 种森林类型土壤 MBC/MBN 的变化

Fig. 4 Variation of soil MBC/MBN in four forest types

### 2.3 N 沉降对土壤微生物数量的影响

由图 5 可知, 不同 N 沉降下, 4 种林分类型土壤微生物数量变化范围在  $43.81 \sim 1021.24 \times 10^6$  个, 相同土层不同森林类型平均值表现为云南松林 > 常绿阔叶林 > 华山松林 > 高山栎林, 云南松林土壤微生物数量比其余 3 个林分高出 6.89%~82.44%。不同土层相同森林类型下, 常绿阔叶林和

表现为  $10 \sim 20 > 5 \sim 10 > 0 \sim 5$  cm, 10~20 cm 分别为 5~10 cm 和 0~5 cm 的 1.33 倍和 2.51 倍, 华山松林和云南松林则呈波动趋势。随着 N 沉降的增加, 3 个土层中, 常绿阔叶林微生物数量总体呈现先增加后减小的趋势, 高山栎林总体呈现上升趋势, 且差异性显著 ( $P < 0.05$ ); 华山松林和与云南松林呈波动趋势。

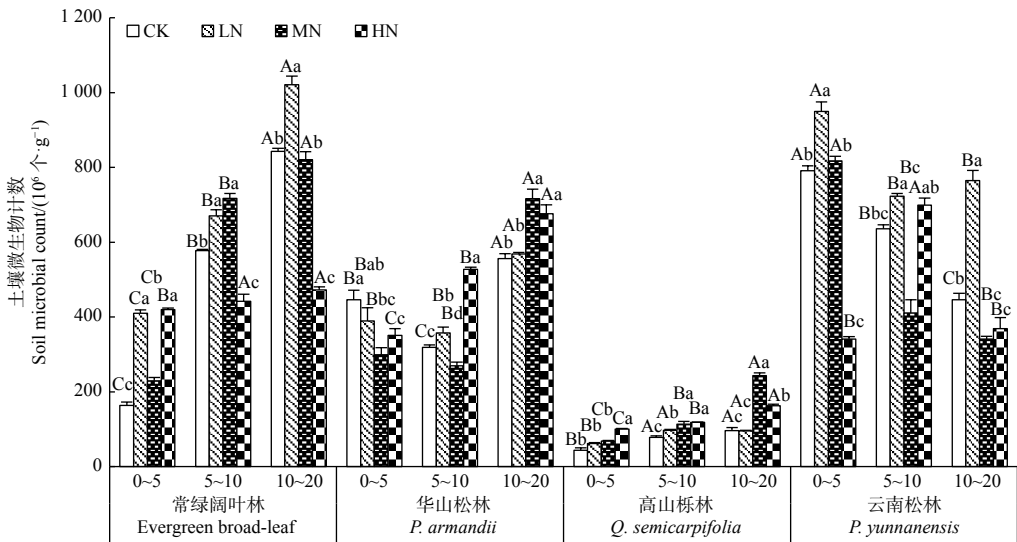


图 5 4 种森林类型土壤微生物数量的变化

Fig. 5 Variation of soil microbial counts in four forest types

## 2.4 凋落物碳氮、土壤微生物量变异分析

如表 2 所示, 森林类型、施 N 水平对凋落叶和枝的 C、N 和 C/N 的影响均影响极显著 ( $P < 0.01$ )。森林类型和施 N 水平的交互作用对凋落叶 C、凋落叶 C/N 和凋落枝 C 均呈极显著影响 ( $P < 0.01$ ), 对凋落叶 N 和凋落枝 C/N 达到显著影响 ( $0.01 < P < 0.05$ ), 对凋落枝 N 影响不显著 ( $P > 0.05$ )。凋落

叶和枝的 C、N 和 C/N 均表现为: 森林类型影响最大, 施 N 水平次之, 森林类型和施 N 水平交互作用最小。森林类型对凋落枝 N 影响最大, 凋落叶 C/N 最小; 施 N 水平对凋落枝 C 影响力最大, 凋落枝 C/N 最小; 交互作用对凋落枝 C 影响力最大, 凋落枝 N 最小。

表 2 凋落叶和枝 C、N 以及 C/N 变异分析

Table 2 Analysis of variations of C, N and C/N in leaf and twig litter

变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	凋落叶 C Leaf litter C		凋落叶 N Leaf litter N		凋落叶 C/N Leaf litter C/N		凋落枝 C Twig litter C		凋落枝 N Twig litter N		凋落枝 C/N Twig litter C/N	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
		森林类型 Forest types	3	292.97	<0.01	77.25	<0.01	66.91	<0.01	218.68	<0.01	398.99	<0.01
施 N 水平 N treatments	3	39.51	<0.01	17.65	<0.01	12.75	<0.01	52.39	<0.01	14.34	<0.01	8.45	<0.01
森林类型 × 施 N 水平 Forest types × N treatments	9	4.48	<0.01	2.64	<0.05	3.65	<0.01	9.54	<0.01	2.03	>0.05	2.91	<0.05

注: " $P > 0.05$ " 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。下同。

Notes: " $P > 0.05$ " indicates no significant effect; " $0.05 > P > 0.01$ " indicates significant influence; " $P < 0.01$ " indicates extremely significant influence. The same below.

方差分析表明 (表 3), 各变异来源及其交互作用对土壤微生物量 C、N 及数量均存在极显著影响, 其中森林类型对三者影响最大 ( $F$  值分别为 304.21、1777、2586.9); 而对于 MNC/MBN, 除

了森林类型和土壤深度交互作用对其无明显影响外, 其余各变异来源也均对其存在显著或极显著影响, 其中土壤深度影响最大 ( $F$  值为 18.18)。

表 3 土壤微生物量碳、氮, 微生物量碳氮比及微生物计数之间多因素方差分析

Table 3 Statistical results of Multi-way ANOVA of MBC, MBN, MBC/MBN and soil microbial quantity

变异来源 Source of variation	自由度 Degree of freedom	土壤微生物量 C MBC		土壤微生物量 N MBN		土壤微生物量碳氮比 MBC/MBN		微生物计数 Soil microbial quantity	
		F	P	F	P	F	P	F	P
		森林类型 Forest types	3	304.21	<0.01	1777	<0.01	3.16	<0.05
土壤深度 Depth of soil	2	275.55	<0.01	958.3	<0.01	18.18	<0.01	352.64	<0.01
施 N 水平 N treatments	3	90.17	<0.01	452.5	<0.01	14.42	<0.01	134.73	<0.01
森林类型 × 土壤深度 Forest types × Depth of soil	6	8.7	<0.01	27.36	<0.01	1.18	>0.05	431.67	<0.01
森林类型 × 施 N 水平 Forest types × N treatments	9	18.09	<0.01	113.2	<0.01	4.22	<0.01	110.31	<0.01
土壤深度 × 施 N 水平 Depth of soil × N treatments	6	15.7	<0.01	70.62	<0.01	3.59	<0.01	32.36	<0.01
森林类型 × 土壤深度 × 施 N 水平 Forest types × Depth of soil × N treatments	18	3.95	<0.01	10.93	<0.01	1.98	<0.05	79.36	<0.01

## 3 讨论

### 3.1 凋落物基质质量对 N 沉降的响应

凋落物分解是森林生态系统 C、N 循环的关键构成部分, 同时也是物质及能量转换的重要衔接<sup>[16]</sup>。本研究中, 模拟 N 沉降下常绿阔叶林和高山栎林凋落枝和叶在分解 1 年后 C 含量均显著增加,

华山松林和云南松林 C 含量在 LN 下减小, HN 下增加。这与鼎湖山自然保护区季风常绿阔叶林<sup>[6]</sup>和内蒙古大兴安岭林场落叶松林 (*Larix gmelinii* Rupr.)<sup>[17]</sup>凋落物 C 含量研究结果一致。而江龙<sup>[18]</sup>的研究发现 HN 处理显著降低了柳杉 (*Cryptomeria fortunei* Hooibrenk.) 凋落物有机 C 含量, 促进了有机 C 的

释放,这可能是该研究试验地位于华西雨屏区,海拔较低(1216 m),其N沉降施用量( $0.5\sim 1.5\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ )远小于本试验( $5\sim 30\text{ g}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ ),未达到凋落物C含量降低的水平。

本研究中,模拟N沉降下4种林分类型凋落物在分解1年后N含量均显著增加,原因可能是随着外源N的持续输入,凋落物中相对比较难分解的成分(如木质素等)与其进一步结合,构成不易分解的物质(如腐殖质等),使N不断富集,导致凋落物N含量升高<sup>[19]</sup>。而4种林分类型凋落物在分解1年后C/N均显著降低,这与瑞典南部地区栎树(*Quercus robur* L.)林<sup>[20]</sup>和福建沙县杉木(*Cunninghamia lanceolata* Lamb.)林<sup>[21]</sup>的研究结果一致;而Zhou等<sup>[22]</sup>在西北地区则发现,施加N素使常绿阔叶林凋落物C/N呈上升趋势。可见,目前国内外N沉降对凋落物基质质量的影响并无统一认识,其差异可能与研究地域环境、植物类型、凋落物分解阶段、外源N素的选择等因素相关,具体原因有待进一步探究。

### 3.2 土壤微生物特征对N沉降的响应

土壤微生物量受到土壤环境、森林类型及气候等多种生态因子的影响,其中,森林类型是重要的因素之一<sup>[23]</sup>。本研究中,云南松林和常绿阔叶林的MBC和MBN含量均高于华山松林和高山栎林,这可能是由于研究区云南松林和常绿阔叶林腐殖质层较厚、植被密度和物种丰富度均较高。而常绿阔叶林和高山栎林各土层的土壤MBC和MBN含量均随着N沉降的增加呈现减小趋势,华山松林和云南松林则相反。土壤MBC和MBN含量减小可能是由于过量的N素进入土壤致使土壤酸化,盐基离子减少,从而土壤中的 $\text{Al}^{3+}$ 含量上升,破坏微生物细胞,进而降低土壤微生物的活性<sup>[24]</sup>;同时,过量的N抑制了木质素降解酶活性,加强了微生物C限制,从而降低微生物量<sup>[25]</sup>。土壤MBC和MBN含量增加可能与森林生态系统处于N限制有关,此时外源N的添加会提高地表生物的生产量,使凋落物养分归还速率加快,进而提高土壤微生物生物量和活性<sup>[26]</sup>,这与太岳山油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.)林<sup>[27]</sup>的研究结果一致。本研究中,不同N沉降下的MBC和MBN含量均伴随土层的加深呈现减小的趋势,原因可能是土壤真菌数量和有机质随着土层的增加而降低,通

气情况减弱限制土壤微生物的生长和繁殖,从而导致深层土壤微生物量减少。

土壤MBC/MBN可以作为反馈该区域微生物种类变化及土壤N供给状况的一个指标<sup>[28]</sup>。研究表明,MBC/MBN在3~5时,土壤微生物群落中占据优势的为细菌,而在4~15时则为真菌<sup>[29]</sup>。本研究4种森林类型MBC/MBN介于5.31~11.26间,说明滇中亚高山4种森林类型土壤微生物群落中真菌为优势种;本研究中N沉降对不同林分类型不同土层MBC/MBN影响各有差异,HN处理降低了MBC/MBN,使得土壤微生物群落由真菌向细菌群落转变。这可能是由于真菌在N环境受限制中占据主导地位,但随着N素的增加,细菌将逐渐取代真菌的地位<sup>[30-31]</sup>。

本研究中,常绿阔叶林、华山松林和高山栎林土壤微生物数量随着土层深度的增加呈上升趋势,这可能是由于实验样品采集时间为冬季,低温对微生物数量产生了显著影响。张德楠等<sup>[32]</sup>在对十万大山地区典型次生阔叶林土壤微生物的研究中证实了这一点,即低温会在一定程度上限制微生物的活性,减少繁殖,降低数量。本研究4个林分类型中微生物数量总体表现出与MBC和MBN一致的趋势,即低N促进高N抑制,而凋落物C和N含量与土壤微生物量相关分析中也表现出它们之间存在紧密的关系。

### 3.3 森林类型、土壤深度和施N水平对凋落物C、N和土壤微生物量的影响

本研究中,土壤深度、施N水平、森林类型和施N水平交互作用、土壤深度和施N水平交互作用对MBC、MBN、MBC/MBN和微生物计数均具有极显著影响,森林类型对除MBC/MBN外的因子也均呈极显著影响,三因素交互均对各因子呈显著或极显著影响,这与王泽西等<sup>[33]</sup>在川西亚红杉林(*Larix mastersiana* Rehd.)进行N处理实验时所得结果相一致。说明土壤微生物对环境变化极为敏感,养分元素的输入、土壤pH等因素的变化均会影响微生物数量和活性<sup>[29]</sup>。本研究中,森林类型对MBC、MBN和微生物计数影响最高,这可能是由于不同森林类型土壤微生物分布和种类差异较大。本研究中,土壤深度对MBC/MBN影响最高,其原因可能是表层土壤含有大量C源,微生物对C的吸收会加强自身活性,进而使表层土壤



中真菌和细菌种类增多, 亚层及以下土壤中 C 含量减小, 同时氧气流通变差, 导致真菌数量剧减, 致使不同土层下 MBC/MBN 变化较大。本研究通过模拟 N 沉降实验揭示了 4 种不同森林凋落物 C、N 含量、MBC 和 MBN 及土壤微生物数量的响应情况, 但对于 N 沉降增加或降低土壤微生物量是否与针叶林或阔叶林的林型有关, 目前相关论证较少, 仍需进行深入研究。此外, 为了更深入了解 N 沉降对凋落物和土壤微生物量的影响, 今后应以土壤中微生物群落结构和功能特征为研究重心。

## 4 结 论

施 N 1 年后, N 沉降下 4 种林分类型凋落叶和枝 C 含量和 N 含量总体均呈增加趋势, C/N 呈降低趋势; 土壤 MBC/MBN 变化范围在 5.31~11.26 之间; 土壤微生物数量随 N 沉降的增加呈低 N 促进、高 N 抑制的趋势; 相同 N 处理下土壤微生物量随土层加深而降低, N 沉降对垂直分布格局影响不显著。N 沉降对常绿阔叶林和高山栎林的土壤 MBC 和 MBN 呈抑制作用, 且随着 N 沉降的增大, 抑制作用越显著; N 沉降对云南松林和华山松林的土壤 MBC 和 MBN 表现为低 N 促进, 高 N 抑制。

## 参 考 文 献:

- [1] 胡峻崧, 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.
- [2] 邓娇娇, 朱文旭, 张 岩, 等. 辽西北风沙区不同人工林土壤真菌群落结构及功能特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33 (1): 44-54.
- [3] 张乃莉, 郭继勋, 王晓宇, 等. 土壤微生物对气候变暖和大气 N 沉降的响应[J]. 植物生态学报, 2007, 31 (2): 252-261.
- [4] 袁颖红, 樊后保, 李辉信, 等. 模拟氮沉降对杉木人工林土壤微生物的影响[J]. 林业科学, 2012, 48 (9): 56-62.
- [5] 韩 雪, 王春梅, 蔺照兰. 模拟氮沉降对温带森林凋落物分解的影响[J]. 生态环境学报, 2014, 23 (9): 1503-1508.
- [6] 李登峰, 章家恩, 刘自强, 等. 模拟氮沉降对季风常绿阔叶林凋落物碳氮组分的影响[J]. 华南农业大学学报, 2018, 39 (6): 70-76.
- [7] 魏圣钊, 赵 倩, 廖浪权, 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微生物生物量的影响[J]. 生态学报, 2018, 38 (22): 8001-8007.
- [8] Van Diepen L T A, Lilleskov E A, Pregitzer K S, et al. Simulated nitrogen deposition causes a decline of intra-and extraradical abundance of arbuscular mycorrhizal fungi and changes in microbial community structure in northern hardwood forest[J]. Ecosystems, 2010, 13(5): 683-695.
- [9] Thakur M P, Milcu A, Manning P, et al. Plant diversity drives soil microbial biomass carbon in grasslands irrespective of global environmental change factors[J]. Global Change Biology, 2015, 21(11): 4076-4085.
- [10] 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.
- [11] Wright R F, Rasmussen L. Introduction to the NITREX and EXMAN projects[J]. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1-3): 1-7.
- [12] 钟晓兰, 李江涛, 李小嘉, 等. 模拟氮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.
- [13] 吴金水, 林启美, 黄巧云, 等. 土壤微生物生物量测定方法及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 2006: 54.
- [14] 林启美. 土壤微生物量研究方法综述[J]. 中国农业大学学报, 1997, (S2): 1-11.
- [15] Zhao H, Sun J, Xu X, et al. Stoichiometry of soil microbial biomass carbon and microbial biomass nitrogen in China's temperate and alpine grasslands[J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 83: 1-8.
- [16] 徐小锋, 宋长春. 全球碳循环研究中“碳失汇研究进展”[J]. 中国科学院研究生院学报, 2004, 21 (2): 145-152.
- [17] 陈 翔. 模拟氮沉降对兴安落叶松凋落物养分释放动态的影响研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2014.
- [18] 江 龙. 柳杉人工林凋落物分解对模拟氮沉降和凋落物组成的响应[D]. 雅安: 四川农业大学, 2013.
- [19] 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.
- [20] Mansson K F, Falkengren G U. The effect of nitrogen deposition on nitrification, carbon and nitrogen mineralisation and litter C: N ratios in oak (*Quercus robur* L.) forests[J]. Forest Ecology and Management, 2003, 179: 455-467.
- [21] 樊后保, 刘文飞, 徐 雷. 氮沉降下杉木(*Cunninghamia lanceolata*) 人工林凋落叶分解过程中 C、N 元素动态变化[J]. 生态学报, 2008, 28 (6): 2543-2553.
- [22] Zhou S X, Huang C D, Xiang Y B, et al. Response of carbon and nitrogen release to simulated nitrogen deposition in natural evergreen broad-leaved forests in a rainy area in Western China[J]. Acta Ecol Sin, 2017, 37(4): 258-264.
- [23] 王娟娟, 朱 莎, 靳士科, 等. 上海市 3 种森林类型土壤微生物生物量碳和氮的时空格局[J]. 生态与农村环境学报, 2016, 32 (4): 615-621.
- [24] Pietri J C A, Brookes P C. Relationships between soil pH and microbial properties in a UK arable soil[J]. Soil Biology & Biochemistry, 2008, 40(7): 1856-1861.
- [25] 周世兴, 黄从德, 向元彬, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物木质素和纤维素降解的影响[J]. 应用生态学报, 2016, 27 (5): 1368-1374.
- [26] 涂利华, 胡庭兴, 张 健, 等. 模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林土壤

- 有机碳和养分的影响[J]. 植物生态学报, 2011, 35 (2): 125-136.
- [27] 郭依秋, 范秀华, 汪金松, 等. 太岳山油松林土壤微生物量对模拟氮沉降的响应[J]. 应用与环境生物学报, 2013, 19 (4): 605-610.
- [28] Foote J A, Boutton T W, Scott D A. Soil C and N storage and microbial biomass in US southern pine forests: Influence of forest management[J]. *Forest Ecology & Management*, 2015, 355: 48-57.
- [29] 戴允泽, 王会荣, 李爱琴, 等. 亚热带常绿阔叶林土壤微生物量动态变化及其对氮磷添加的响应[J]. 生态环境学报, 2018, 27 (8): 1395-1404.
- [30] 曹志平, 李德鹏, 韩雪梅. 土壤食物网中的真菌/细菌比率及测定方法[J]. 生态学报, 2011, 31 (16): 4741-4748.
- [31] Wallenstein M D. Effects of increased nitrogen deposition on forest soil nitrogen cycling and microbial community structure[D]. Durham: Duke University, 2004.
- [32] 张德楠, 徐广平, 张中峰, 等. 十万大山地区典型次生阔叶林土壤微生物数量及酶活性的季节动态[J]. 广西植物, 2016, 36 (2): 200-207.
- [33] 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量碳氮对施氮的响应[J]. 生态学报, 2019, 39 (19): 7197-7207.

## Effects of Simulated Nitrogen Deposition on Litter Decomposition and Soil Microorganisms of Typical Subalpine Forests in Central Yunnan, China

PAN Yu, SONG Ya-li, WANG Ke-qin, ZHANG Yu-jian, ZHENG Xing-rui

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

**Abstract:** [Objective] To study the relationship between litter decomposition and soil microbial characteristic under simulated nitrogen (N) deposition so as to provide references for studying the response mechanism of carbon and nitrogen cycles under N deposition in forest ecosystem. [Method] In this study, the litter of four typical subalpine forests (evergreen broadleaved forest, *Pinus armandii* forest, *Quercus semicarpifolia* forest, *Pinus yunnanensis* forest) in central Yunnan were taken as the research objects. From February 2018 to January 2019, through simulating the nitrogen deposition and *in-situ* decomposition experiments, the litter bag method was used to study the variations of litter carbon and nitrogen, soil microbial biomass carbon (MBC), microbial biomass nitrogen (MBN) and soil microbial quantity under different simulated N depositions. Four treatment levels of N deposition were applied, i.e., low nitrogen (LN,  $5 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), medium nitrogen (MN,  $15 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ), high nitrogen (HN,  $30 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ) and the control (CK,  $0 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ). [Result] Under different N deposition treatments for one year, the C content in the litter of evergreen broadleaved forest and *Quercus semicarpifolia* forest increased significantly (0.40%~8.16%), while that of *Pinus armandii* forest and *Pinus yunnanensis* forest decreased by 2.67% under LN but increased by 4.09% under HN. The N content of litter of all these forests increased significantly (1.45%~69.01%), while the C/N ratio decreased significantly (0.34%~37.92%). Under the same N deposition, the soil microbial biomass decreased with the depth of soil layer, and the influence of N deposition on the vertical distribution pattern was not significant. The effect of N deposition on soil MBC and MBN in evergreen broadleaved forest and *Quercus semicarpifolia* forest was inhibited, and the effect of N deposition on *Pinus armandii* forest and *Pinus yunnanensis* forest was promoted with low N and inhibited with high N. The soil MBC/MBN ratio ranged from 5.31 to 11.26 in the four forests. The effects of N deposition on MBC/MBN ratio of different soil layers in different forests were different, but all of them was inhibited by high N treatment. [Conclusion] Litter decomposition in typical subalpine forests in central Yunnan is mainly affected by forest types, followed by N deposition. The soil microbial biomass and quantity are mainly affected by forest types, followed by soil depth, while the effect of N deposition is the smallest.

**Keywords:** nitrogen deposition; litter decomposition; microbial biomass carbon and nitrogen; subalpine of central Yunnan