DOI: 10.5846/stxb201801180137

魏圣钊,赵倩,廖泯权,周世兴,何聪,王雷,黄从德.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微生物生物量的影响.生态学报, 2018,38(22): - .

Wei S Z, Zhao Q, Liao M Q, Zhou S X, He C, Wang L, Huang C D. Effects of simulated nitrogen deposition on microbial biomass during litter decomposition in a natural evergreen broad-leaved forest in the rainy area of West China. Acta Ecologica Sinica, 2018, 38(22): - .

模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落叶分解 过程中微生物生物量的影响

魏圣钊,赵 倩,廖泯权,周世兴,何 聪,王 雷,黄从德*四川农业大学林学院,成都 611130

摘要:为进一步深化氮沉降对凋落物分解影响的研究,2016年3月—2017年3月,在华西雨屏区天然常绿阔叶林内,用凋落叶分解袋法研究了模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量碳(MBC)、微生物生物量氮(MBN)和微生物生物量磷(MBP)的影响。实验设置了对照(0gNm⁻²a⁻¹)、低氮(5gNm⁻²a⁻¹)、中氮(15gNm⁻²a⁻¹)和高氮沉降(30gNm⁻²a⁻¹)4个处理。结果表明:低氮和中氮处理显著增加了凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理对凋落叶分解过程中的MBC和MBN,以低氮处理增加幅度最高;低氮和中氮处理动调落叶分解过程中微生物量碳低了分解过程中的MBC、MBN和MBP。随模拟氮沉降量的递增,凋落叶分解过程中微生物量碳酸比呈现先增加后下降的趋势。研究结果说明,氮沉降影响了华西雨屏区天然常绿阔叶林凋落物分解过程中微生物生物量,进而改变了凋落物的分解过程。

Effects of simulated nitrogen deposition on microbial biomass during litter decomposition in a natural evergreen broad-leaved forest in the rainy area of West China

WEI Shengzhao, ZHAO Qian, LIAO Minquan, ZHOU Shixing, HE Cong, WANG Lei, HUANG Congde * College of Forestry, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China

Abstract: To understand the in-depth impacts of nitrogen deposition on the processes of litter decomposition, a field litterbag experiment was conducted in a natural evergreen broad-leaved forest in the rainy area, West China, from March 2016 to 2017. Microbial biomass carbon (MBC), nitrogen (MBN), and phosphorus (MBP) during litter decomposition were investigated under four levels of simulated nitrogen deposition treatments, including control (CK, 0 g N m⁻² a⁻¹), low nitrogen (LN, 5 g N m⁻² a⁻¹), medium nitrogen (MN, 15 g N m⁻² a⁻¹) and high nitrogen (HN, 30 g N m⁻² a⁻¹) deposition. The results showed that LN and MN treatments significantly increased MBC and MBN during litter decomposition, but a higher increase was observed under LN than under MN treatment. LN and MN treatments did not significantly affect MBP during litter decomposition. However, HN treatment significantly reduced MBC, MBN, and MBP. The microbial biomass C/N decreased gradually with an increase of N deposition levels, although the microbial biomass C/P initially increased and then decreased. The results indicated that nitrogen deposition could play an important role in litter decomposition processes by regulating microbial biomass.

收稿日期:2018-01-18; 网络出版日期:2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: lyyxq100@ aliyun.com

http://www.ecologica.cn

基金项目:长江上游生态安全协同创新中心开放基金项目;国家自然科学基金项目(41201296);国家级大学生创新创业训练计划项目 (201610626012)资助

Key Words; nitrogen deposition; natural evergreen broad-leaved forest; litter decomposition; microbial biomass

氮沉降的增加使许多陆地生态系统氮饱和,改变了森林生态系统的结构和功能,产生了严重的危害,甚至 导致欧美一些区域森林衰退^[1]。目前,中国已成为仅次于欧洲和北美的全球第三大氮沉降区^[2]。氮沉降作 为最为重要的全球变化问题之一,正在改变着人类赖以生存的环境^[3]。

微生物生物量既可以代表参与物质循环和能量流动等过程中的微生物数量和活性,又在森林生态系统有 机质和养分循环中具有重要的地位^[45]。在全球氮沉降背景下,大气氮沉降增加可能通过对微生物的影响而 深刻地影响着森林生态系统的物质循环和能量转换过程,进而影响生态系统的稳定^[6]。因此,氮沉降对微生 物生物量的影响引起了国内外生态学家的广泛关注。研究表明,氮沉降对森林土壤微生物的影响有抑制、促 进和无影响三种结果^[4]。Van Diepen^[7]等研究发现,美国北部硬阔林在 12 a 氮沉降后,土壤微生物总量下降 了 24%。周嘉聪^[6]等研究发现,低氮沉降增加了中亚热带米槠天然林土壤微生物生物量。而王晖^[8]等在鼎 湖山自然保护区 3 种森林生态系统中进行的氮沉降实验发现,氮沉降增加并没有对土壤微生物生物量碳产生 显著影响。可见,已有的研究更关注氮沉降对土壤微生物生物量的影响。而凋落物分解过程中微生物量 作为反映凋落物分解过程最为关键的指标之一,相关研究还十分缺乏,这不利于深入理解氮沉降对凋落物分 解影响的内在机制。

华西雨屏区作为我国西部地区阴冷潮湿的罕见气候地理单元,是一个大尺度、复合性的生态过渡带^[9]。 区域内分布的亚热带天然常绿阔叶林,林分结构复杂、多样性高,是我国西部生态屏障的重要组成部分^[10]。 该地区降水量丰富,成都平原工农业产生的 NO_x受其特殊气候和地形的影响而随雨水大量沉降于该区。2010 年华西雨屏区年总 N 沉降量为 9.5 g N m⁻²,氮沉降量水平较高,且有逐年增加的趋势^[11],使其成为研究氮沉 降的理想实验室。基于此,本实验在华西雨屏区天然常绿阔叶林内,采用凋落叶分解袋法,研究了模拟氮沉降 对凋落叶分解过程中微生物量的影响,为揭示氮沉降对凋落物分解的影响机制提供基础数据。本研究主 要回答以下问题:(1)模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中微生物量有何影响?(2) 模拟氮沉降对华西雨屏区常绿阔叶林凋落叶分解过程中微生物量的复称?

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域概况

研究区域位于四川省雅安市碧峰峡风景区(102°59′E,30°04′N),属亚热带季风型气候。年均气温为16. 2℃,最冷月1月,最热月7月。日照长度为1039.6 h,年降水量约1770 mm。实验区内植物丰富,群落复杂。 主要树种有木荷(Schima superba)、总状山矾(Symplocos botryantha)、硬斗石栎(Lithocarpus hancei)、海桐 (Pittosporum tobira)、润楠(Machilus pingii)和肉桂(Cinnamomum cassia)等。土壤类型为黄壤,厚度大于60 cm,立地条件基本一致^[12]。

1.2 研究方法

1.2.1 标准地的设置及氮沉降处理

2016年1月,在碧峰峡景区典型的天然常绿阔叶林内建立12个5m×5m的样方并编号,样方间设>5m 的缓冲带,样方四周用 PVC 板材围起。实验设置对照(CK,0gNm⁻²a⁻¹)、低氮(LN,5gNm⁻²a⁻¹)、中氮 (MN, 15gNm⁻²a⁻¹)和高氮沉降(HN, 30gNm⁻²a⁻¹)4个处理,每个处理3个重复。将年增氮量平均24等 分,从2016年3月中旬起,每15d用NH₄NO₃模拟氮沉降。将NH₄NO₃溶于2L水,用喷雾器均匀喷洒至相应 样地,对照样方则喷施2L水。

1.2.2 凋落叶的收集

2016年2月,在天然阔叶林中收集主要树种的凋落叶,并带回实验室自然风干,在风干过程后将凋落叶充分混匀,保证凋落物组成比例一致。称取15.0g自然风干的凋落叶,装入大小为20 cm×20 cm,孔径为3 mm

的尼龙网袋中。于 2016 年 3 月中旬,去除样地表面凋落物层,在每个样方之中均匀放置 18 袋。随后每隔 2 个月在每个样方中随机采集凋落袋 3 袋,除去样品中的泥土和异物后,装入已灭菌的封口聚乙烯袋于 4℃保存,以备测定微生物生物量。

1.2.3 测定方法

凋落叶分解过程中的微生物生物量碳和氮采用氯仿熏蒸-K₂SO₄浸提法制取待测液。分别采用 K₂Cr₂O₇ 氧化-FeSO₄滴定法和半微量凯氏定氮法测定 MBC 和 MBN 含量。MBC 和 MBN 的转换系数分别为 E_c $(0.45)^{[13]}$ 和 $E_N(0.45)^{[14]}$ 。微生物生物量磷采用氯仿熏蒸-NaHCO₃浸提法制取待测液。采用钼锑抗比色法 测定 MBP 含量。MBP 的转换系数为 $E_p(0.5)^{[15]}$ 。以凋落物每单位干重的含量表示分析结果。 **1.2.4**数据分析与处理

使用 Origin 9.3 软件制图, SPSS 20.0 统计分析。用单因素方差分析法(one-way ANOVA)比较各个采样时间时凋落物中微生物生物量在各处理间的差异性,重复测量方差分析法(Repeated-measures ANOVA)比较整个试验期间微生物生物量的差异性,差异性水平设置为α=0.05。

2 结果与分析

2.1 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量碳的影响

由图 1 可知, 凋落叶分解过程中的 MBC 在分解 120 d 时最高,在分解 300 d 时最低。与 CK 相比, LN 处 理的 MBC 在凋落叶分解过程中总体上表现为显著增 加; MN 处理的 MBC 在分解 180 d 前显著增加, 分解 240 d 后显著降低; HN 处理的 MBC 在分解过程中显著降 低。重复测量方差分析表明(表 1), LN 和 MN 处理显 著增加了凋落叶分解过程中 MBC, 以 LN 增加幅度最 高; HN 处理显著降低了分解过程中 MBC。

2.2 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量氮的影响

由图 2 可知, 凋落叶分解过程中的 MBN 与 MBC 具 有相同的变化趋势, 表现为分解 120 d 最高, 分解 300 d 最低。与 CK 相比, LN 处理的 MBN 在凋落叶分解过程中 总体上表现为显著增加; MN 处理的 MBN 在分解 180 d



图 1 不同施氮处理下凋落叶分解过程中的 MBC 动态 Fig.1 Dynamic of microbial biomass C during the decomposition of litters of different N treatment

CK:对照 control;LN:低氮沉降 low nitrogen deposition;MN:中氮沉 降 medium nitrogen deposition; HN: 高氮沉降 high nitrogen deposition;图中不同的字母代表不同施氮处理间存在显著差异

前显著增加,分解 240 d 后显著降低;HN 处理的 MBN 在分解过程中显著降低。重复测量方差分析表明(表 1), LN 和 MN 处理显著增加了凋落叶分解过程中 MBN,以 LN 增加幅度最高;HN 处理显著降低分解过程中 MBN。

表 1 施氮处理对凋落叶分解过程中微生物生物量影响的重复测量方差分析(Repeated-measures AN	NOVA)
---	-------

Table 1 Results of repeated-measures ANOVA for the effects of N treatment on microbial biomass during the decomposition of litters							
MBC	MBN	MBP	MBC/N	MBC/P			
3242±46c	$50.47{\pm}0.26\mathrm{b}$	101.62±1.06a	58.02±0.93a	$33.95 \pm 0.26 \mathrm{b}$			
4455±15a	93.72±0.26a	97.91±1.22a	$45.45{\pm}0.91\mathrm{b}$	41.97±0.42a			
$3913 \pm 85 \mathrm{b}$	86.01±0.85a	$101.28 \pm 1.03a$	$39.99{\pm}0.74{\rm c}$	$31.42 \pm 0.37 c$			
1991±29d	39.75±0.88c	75.71±0.91b	42.50±0.91c	25.67 ± 0.16 d			
	MBC 3242±46c 4455±15a 3913±85b 1991±29d	MBC MBN 3242±46c 50.47±0.26b 4455±15a 93.72±0.26a 3913±85b 86.01±0.85a 1991±29d 39.75±0.88c	MBC MBN MBP 3242±46c 50.47±0.26b 101.62±1.06a 4455±15a 93.72±0.26a 97.91±1.22a 3913±85b 86.01±0.85a 101.28±1.03a 1991±29d 39.75±0.88c 75.71±0.91b	MBC MBN MBP MBC/N 3242±46c 50.47±0.26b 101.62±1.06a 58.02±0.93a 4455±15a 93.72±0.26a 97.91±1.22a 45.45±0.91b 3913±85b 86.01±0.85a 101.28±1.03a 39.99±0.74c 1991±29d 39.75±0.88c 75.71±0.91b 42.50±0.91c			

MBC:微生物生物量碳 microbial biomass carbon; MBN:微生物生物量氮 microbial biomass nitrogen; MBP:微生物生物量磷 microbial biomass phosphorus; MBC/N:微生物生物量碳氮比 microbial biomass C/N; MBC/P:微生物生物量碳磷比 microbial biomass C/P; CK; 对照 control; LN: 低氮 沉降 low nitrogen deposition; MN: 中氮沉降 medium nitrogen deposition; HN: 高氮沉降 high nitrogen deposition; 表中数值为平均值±标准误, 同列数据 不同的字母代表不同施氮处理间存在显著差异

38 卷







图 5 不同應氮处理下间洛甲万胜过程中 MBF 切恐 Fig.3 Dynamic of microbial biomass P during the decomposition of litters of different N treatment

2.3 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量磷的影响

由图 3 可知, 凋落叶分解过程中的 MBP 具有明显的变化趋势, 但与 MBC 和 MBN 的变化趋势并不一致, 表现为分解 60 d 最高, 分解 300 d 最低。与 CK 相比, LN 处理的 MBP 在凋落叶分解 120 d 前显著增加, 分解 300 d 后显著降低; MN 处理的 MBP 分解 120 d 前增加, 分解 180 d 后显著降低; HN 处理的 MBP 在分解过程 中显著降低。重复测量方差分析表明(表 1), LN 和 MN 处理对凋落叶分解过程中 MBP 影响不显著; 而 HN 处理显著降低了分解过程中 MBP。

2.4 模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量比的影响

由表 2 可知,模拟氮沉降总体上降低了微生物生物量碳氮比(MBC/N),且随着 N 沉降量的递增,下降幅度增大。重复测量方差分析表明(表 1),LN、MN 和 HN 处理都显著降低了分解过程中 MBC/N。

由表3可知,LN处理的微生物生物量碳磷比(MBC/P)在凋落叶分解过程中总体上增加;MN处理的MBC/P在分解过程中未表现出明显的变化趋势;HN处理的MBC/P在凋落叶分解过程中总体上表现为显著降低。重复测量方差分析表明(表1),LN处理显著增加了凋落叶分解过程中MBC/P;MN和HN处理显著降低分解过程中MBC/P,以HN降低幅度最高。

处理 MBC/N Treatment 60 d 120 d 180 d 240 d 300 d 360 d CK 122.2±11.1a 110.23±6.53a 29.69±2.42a 33.92±3.34a 32.81±0.98a 19.31±1.1a	Table 2 Dynamic of microbial biomass C/N during the decomposition of interest N treatment						
Treatment 60 d 120 d 180 d 240 d 300 d 360 d CK 122.2±11.1a 110.23±6.53a 29.69±2.42a 33.92±3.34a 32.81±0.98a 19.31±1.1a	处理	MBC/N					
CK 122.2±11.1a 110.23±6.53a 29.69±2.42a 33.92±3.34a 32.81±0.98a 19.31±1.1a	Treatment	60 d	120 d	180 d	240 d	300 d	360 d
	СК	122.2±11.1a	110.23±6.53a	29.69±2.42a	33.92±3.34a	32.81±0.98a	19.31±1.1a
LN 99.83±5.60b 70.8±0.38bc 26.83±2.14a 22.47±1.88b 37±6.28a 15.74±1.47b	LN	$99.83{\pm}5.60{\rm b}$	$70.8{\pm}0.38{\rm bc}$	26.83±2.14a	$22.47{\pm}1.88\mathrm{b}$	37±6.28a	$15.74{\pm}1.47\mathrm{b}$
MN 80.62±5.33d 60.46±7.51c 20.95±1.12b 28.72±0.45a 33.57±3.98a 15.64±0.82b	MN	$80.62{\pm}5.33\mathrm{d}$	$60.46{\pm}7.51{\rm c}$	$20.95{\pm}1.12\mathrm{b}$	28.72±0.45a	33.57±3.98a	$15.64{\pm}0.82\mathrm{b}$
HN 89.64±4.70c 74.67±3.06b 22.42±1.48b 22.51±3.66b 28.93±2.45a 16.84±1.77b	HN	$89.64 \pm 4.70c$	$74.67{\pm}3.06{\rm b}$	$22.42{\pm}1.48\mathrm{b}$	22.51±3.66b	28.93±2.45a	$16.84 \pm 1.77 b$

表 2 不同施氮处理下凋落叶分解过程中微生物生物量碳氮比动态

衣う	个问他氮处理	下向洛叶分胜过在中似生物生物重恢解比功念

Table 3 Dynamic of microbial biomass C/P during the decomposition of litters of different N treatment

处理	MBC/P					
Treatment	60 d	120 d	180 d	240 d	300 d	360 d
СК	$43.10 \pm 3.12 \mathrm{b}$	94.60±3.79a	$15.08 \pm 1.20 \mathrm{c}$	15.1±1.5ab	$28.25{\pm}1.99\mathrm{b}$	$7.54 \pm 0.59 \mathrm{b}$
LN	$55.88 \pm 3.22a$	$79.04{\pm}0.94{\rm b}$	38.87±2.82a	17.92±2.1a	44.69±0.3a	15.42±2.17a
MN	49.82±3.18ab	$59.56 \pm 2.24 \mathrm{c}$	$31.72{\pm}1.07\mathrm{b}$	$13.04 \pm 1.04 \mathrm{b}$	$26.18{\pm}0.71\mathrm{b}$	$8.21{\pm}0.48\mathrm{b}$
HN	$32.45{\pm}0.37{\rm c}$	$71.65 \pm 1.17 d$	$12.21 \pm 1.29 d$	$9.33 \pm 1.63 c$	$21.13{\pm}0.62{\rm c}$	$7.25{\pm}1.11\mathrm{b}$

3 讨论

本研究表明,低氮处理显著增加了凋落叶分解过程中 MBC 和 MBN。这是因为一定量的氮输入会增加微 生物的外界氮源,使其不再受氮限制^[16],促进微生物生物量增加。中氮处理的 MBC 和 MBN 在分解 240 d 后 显著降低,这可能是因为进入秋冬季节后,较低的温度限制了微生物的活性,导致微生物对氮的需求量变小。 低氮处理在分解 300 d、中氮处理在分解 180 d 后 MBP 都显著降低。这一方面可能是由于微生物吸收利用 碳、氮、磷等元素的机制差异所致^[17-18];另一方面也可能是因为受环境中磷的限制。Elser^[19]综合分析得出,磷 限制在氮素添加的生态系统中普遍存在。随着分解时间的延长,淋溶和生物吸收等过程会导致环境中磷含量 的减少^[20],从而使微生物生长受到磷限制^[21],降低微生物生物量。高氮处理下,MBC、MBN 和 MBP 都显著降 低。这是因为过量的氮输入后,NH₄ 的硝化、过剩的 NO₃ 的淋溶等过程会导致微生物底物酸化^[22],致使微生 物衰减。另外,外源氮会降低木质素降解酶活性^[23],并与分解过程中产生的木质素降解中间产物如多酚等结 合生成难分解物质^[24-25]。同时,凋落物中纤维素通常受木质素聚合体的保护,木质素降解的减慢会使纤维素 的降解受阻^[26]。木质素和纤维素降解的减慢会使微生物难以利用,导致微生物的碳限制,从而降低微生物生 物量。

有研究表明,氮沉降对森林生态系统的影响可能存在着"阈值效应"^[27]。在氮沉降对植物生长和土壤动物等的影响研究中已发现了这一现象。如 Aber 等^[28]研究表明,少量的氮素输入对温带森林生态系统存在利好作用,但过量的氮素输入会降低林木生长量,甚至导致森林退化。青藏高原高寒草甸区的研究表明,地上生物量饱和阈值的氮剂量约为 56.0 g N m⁻² a⁻¹,氮添加剂量超过该阈值后,群落生物量呈降低趋势^[29]。徐国良等^[30]研究表明低氮处理对 3 种林型的土壤动物类群生物量有利,而中氮处理会导致动物类群生物量降低。本研究表明,低氮和中氮处理显著增加 MBC 和 MBN,以低氮处理增加幅度最高;高氮处理显著降低 MBC 和 MBN。这说明模拟氮沉降对凋落叶分解过程中微生物生物量的影响也可能存在着"阈值效应"。这是因为一定限度内的氮沉降促进微生物生物量,但随着外源氮的持续添加,达到系统的"氮饱和"水平后,促进作用逐渐减弱,过量输入后甚至转变成抑制作用。但这一推断还有待于进一步的研究。

本研究还表明,MBC 和 MBN 在分解 120 d 时最高,这一方面可能是因为分解 120 d 时处于夏季,温暖湿润的环境更适于微生物生长繁殖,另一方面可能是因为温暖湿润的环境更利于凋落物易分解物质的大量分解^[31],此时微生物底物有效性较高,更有利于微生物生物量的增加。而 MBP 在分解 60 d 时最高,可能是因为 MBP 周转速度比 MBC 和 MBN 更快,微生物对环境的敏感性体现在 MBP 的迅速增加上^[32-33]。MBC、MBN 和 MBP 在分解 300 d 时最低。这是因为分解 300 d 时寒冷少雨,过低的温度和湿度直接抑制了微生物活性,导致微生物生物量显著下降。曹成有等^[34]也发现,科尔沁沙地土壤 MBC 和 MBN 夏季高秋冬季低,而 MBP 春季高秋冬季低。川西亚高山的研究也发现,高山凋落物分解过程中 MBC 和 MBN 生长季节最高,冻结期最低^[35]。这与本研究的研究结果基本一致。

已有研究发现,MBC/N 能在一定程度上反映真菌和细菌的比例^[36]。本研究中,模拟氮沉降总体上降低 了 MBC/N,且随着模拟氮沉降量的递增,MBC/N 下降越多。这表明随着模拟氮沉降量的增加,微生物的优势 种群向以细菌为主导的结构转变。Frey^[37]等的研究发现,氮沉降抑制了细菌的生长,但不如真菌明显,从而 降低了土壤环境中真菌与细菌生物量比值。这是因为真菌在限制因素是氮的环境中优势明显,随着可利用氮 增加,真菌会逐渐沦为衰退种^[38]。

MBC/P 作为衡量微生物生物量磷有效性的重要指标,MBC/P 较大时,表现出微生物量磷的生物固持潜力;MBC/P 较小时,微生物在周转过程中通过微生物矿化和转化具有较大的释放磷的潜力^[3940]。本研究中,低氮处理的 MBC/P 显著增加,高氮处理的 MBC/P 显著降低。这说明一定量的氮沉降会使微生物同化更多的磷,而过量的氮沉降则会使其更倾向于释放磷。

综上所述,低氮和中氮处理显著增加了凋落叶分解过程中的 MBC 和 MBN,对分解过程中的 MBP 影响不

显著;高氮处理显著降低 MBC、MBN 和 MBP。可见,氮沉降影响了凋落叶分解过程中微生物生物量,进而改 变凋落叶的分解过程。但由于氮沉降过程的漫长而复杂,其对凋落物分解的影响具有长期性和综合性,因此 在今后的研究中应进行长期定位研究,同时结合其他环境因子综合分析其对凋落物分解中微生物生物量的影 响,进一步探索氮沉降对凋落物分解的影响机理。

参考文献(References):

- [1] 方运霆,莫江明, Gundersen P, 周国逸, 李德军. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [2] 顾峰雪,黄玫,张远东,闫慧敏,李洁,郭瑞,钟秀丽. 1961-2010年中国区域氮沉降时空格局模拟研究. 生态学报, 2016, 36(12): 3591-3600.
- [3] Boxman A W, Blanck K, Brandrud T E, Emmett B A, Gundersen P, Hogervorst R F, Kjønaas O J, Persson H, Timmermann V. Vegetation and soil biota response to experimentally-changed nitrogen inputs in coniferous forest ecosystems of the NITREX project. Forest Ecology and Management, 1998, 101(1/3): 65-79.
- [4] 周世兴, 邹秤, 肖永翔, 向元彬, 韩博涵, 唐剑东, 罗超, 黄从德. 模拟氮沉降对华西雨屏区天然常绿阔叶林土壤微生物生物量碳和氮的 影响. 应用生态学报, 2017, 28(1): 12-18.
- [5] Lavelle P. Ecological challenges for soil science. Soil Science, 2000, 165(1): 73-86.
- [6] 周嘉聪,刘小飞,郑永,纪宇皝,李先锋,徐鹏程,陈岳民,杨玉盛. 氮沉降对中亚热带米槠天然林微生物生物量及酶活性的影响. 生态 学报, 2017, 37(1): 127-135.
- [7] Van Diepen L T A, Lilleskov E A, Pregitzer K S, Miller R M. Simulated nitrogen deposition causes a decline of intra- and extraradical abundance of arbuscular mycorrhizal fungi and changes in microbial community structure in northern hardwood forests. Ecosystems, 2010, 13(5): 683-695.
- [8] 王晖,莫江明,鲁显楷,薛璟花,李炯,方运霆.南亚热带森林土壤微生物量碳对氮沉降的响应.生态学报,2008,28(2):470-478.
- [9] 庄平,高贤明.华西雨屏带及其对我国生物多样性保育的意义.生物多样性,2002,10(3):339-344.
- [10] 龚伟, 胡庭兴, 王景燕, 宫渊波, 罗承德. 川南天然常绿阔叶林人工更新后土壤氮库与微生物的季节变化. 生态学报, 2011, 31(7): 1763-1771.
- [11] Tu L H, Peng Y, Chen G, Hu H L, Xiao Y L, Hu T X, Liu L, Tang Y. Direct and indirect effects of nitrogen additions on fine root decomposition in a subtropical bamboo forest. Plant and Soil, 2015, 389(1/2): 273-288.
- [12] 任小娟, 刘军. 雅安碧峰峡风景区野生观赏植物区系. 四川农业大学学报, 2008, 26(2): 214-217.
- [13] Wu J, Joergensen R G, Pommerening B, Chaussod R, Brookes P C. Measurement of soil microbial biomass C by fumigation-extraction—an automated procedure. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1167-1169.
- [14] Joergensen R G, Brookes P C. Ninhydrin-reactive nitrogen measurements of microbial biomass in 0.5 m K₂ SO₄ soil extracts. Soil Biology and Biochemistry, 1990, 22(8): 1023-1027.
- [15] Brookes P C, Powlson D S, Jenkinson D S. Measurement of microbial biomass phosphorus in soil. Soil Biology and Biochemistry, 1982, 14(4): 319-329.
- [16] 丁雪丽,何红波,李小波,白震,解宏图,张旭东.不同供氮水平对玉米秸秆降解初期碳素矿化及微生物量的影响.土壤通报,2008,39 (4):784-788.
- [17] Larsen K S, Jonasson S, Michelsen A. Repeated freeze-thaw cycles and their effects on biological processes in two arctic ecosystem types. Applied Soil Ecology, 2002, 21(3): 187-195.
- [18] Sulkava P, Huhta V. Effects of hard frost and freeze-thaw cycles on decomposer communities and N mineralisation in boreal forest soil. Applied Soil Ecology, 2003, 22(3): 225-239.
- [19] Elser J J, Bracken M E S, Cleland E E, Gruner D S, Harpole W S, Hillebrand H, Ngai J T, Seabloom E W, Shurin J B, Smith J E. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems. Ecology Letters, 2007, 10 (12): 1135-1142.
- [20] 郑棉海,黄娟,陈浩,王晖,莫江明. 氮、磷添加对不同林型土壤磷酸酶活性的影响. 生态学报, 2015, 35(20): 6703-6710.
- [21] 李洁, 薛立. 氮磷沉降对森林土壤生化特性影响研究进展. 世界林业研究, 2017, 30(2): 14-19.
- [22] 钱琛.亚热带红壤的硝化作用及其对 NO₃-N 淋溶和土水酸化的影响[D].南京:中国科学院南京土壤研究所, 2008.
- [23] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils. Forest Ecology and Management, 2000, 133(1/2): 13-22.
- [24] Kondo R, Iimori T, Imamura H, Nishida T. Polymerization of DHP and depolymerization of DHP-glucoside by lignin oxidizing enzymes. Journal of Biotechnology, 1990, 13(2/3): 181-188.
- [25] Berg B, McClaugherty C, De Santo A V, Johnson D. Humus buildup in boreal forests: effects of litter fall and its N concentration. Canadian Journal

of Forest Research, 2001, 31(6): 988-998.

- [26] 周世兴,黄从德,向元彬,韩博涵,肖永翔,唐剑东.模拟氦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.应用 生态学报,2016,27(5):1368-1374.
- [27] Magill A H, Aber J D, Berntson G M, McDowell W H, Nadelhoffer K J, Melillo J M, Steudler P. Long-term nitrogen additions and nitrogen saturation in two temperate forests. Ecosystems, 2000, 3(3): 238-253.
- [28] Aber J D, Nadelhoffer K J, Steudler P, Melillo J M. Nitrogen saturation in northern forest ecosystems. Bioscience, 1989, 39(6): 378-386.
- [29] 宗宁,段呈,耿守保,柴曦,石培礼,何永涛.增温施氮对高寒草甸生产力及生物量分配的影响.应用生态学报,2018,29(1):59-67.
- [30] 徐国良,莫江明,周国逸.氮沉降对三种林型土壤动物群落生物量的影响.动物学研究,2005,26(6):609-615.
- [31] Garcia-Pausas J, Casals P, Romanyà J. Litter decomposition and faunal activity in Mediterranean forest soils: effects of N content and the moss layer. Soil Biology and Biochemistry, 2004, 36(6): 989-997.
- [32] 赵琼,曾德慧.陆地生态系统磷素循环及其影响因素.植物生态学报,2005,29(1):153-163.
- [33] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 王绍强, 王辉民. 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [34] 曹成有,陈家模,邵建飞,崔振波.科尔沁沙地四种固沙植物群落土壤微生物生物量及酶活性的季节动态.生态学杂志,2011,30(2): 227-233.
- [35] 周晓庆,吴福忠,杨万勤,朱剑霄.高山森林凋落物分解过程中的微生物生物量动态.生态学报, 2011, 31(14): 4144-4152.
- [36] Paul E A, Clark F E. Soil microbiology and biochemistry. The Quarterly Review of Biology, 1990, 65(2): 248-254.
- [37] Frey S D, Knorr M, Parrent J L, Simpson R T. Chronic nitrogen enrichment affects the structure and function of the soil microbial community in temperate hardwood and pine forests. Forest Ecology and Management, 2004, 196(1): 159-171.
- [38] 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.生态学报,2011,31(16):4741-4748.
- [39] Cleveland C C, Townsend A R, Schmidt S K. Phosphorus limitation of microbial processes in moist tropical forests: evidence from short-term laboratory incubations and field studies. Ecosystems, 2002, 5(7): 680-691.
- [40] Chen C R, Condron L M, Davis M R, Sherlock R R. Seasonal changes in soil phosphorus and associated microbial properties under adjacent grassland and forest in new Zealand. Forest Ecology and Management, 2003, 177(1/3): 539-557.