

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.

模拟氮沉降对季风常绿阔叶林凋落物碳氮组分的影响

李登峰¹, 章家恩^{1,2}, 刘自强¹, 王 迟¹, 袁 艾¹, 危 晖^{1,2}
(1 华南农业大学 资源环境学院, 广东 广州 510642; 2 农业部华南热带农业环境重点实验室/
广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】探究季风常绿阔叶林凋落物对氮沉降增加的响应规律。【方法】设置 4 个氮添加水平: 对照、低氮、中氮和高氮, 其年添加氮量分别为 0、35、70 和 105 kg·hm⁻², 分干、湿季收集凋落物样品, 并进行碳、氮组分含量分析。【结果】随氮添加量的上升, 凋落物总有机碳 (TOC) 和水溶性有机碳 (WSOC) 含量显著增加, 且 WSOC/TOC 质量比具有上升趋势。氮添加未显著改变酸不溶组分碳 (AIFC) 含量以及 AIFC/TOC 质量比, 但与对照比较均具有下降趋势。不同的氮添加处理均未显著改变凋落物总氮 (TN)、水溶性氮 (WSN) 和酸不溶组分氮 (AIFN) 含量, 以及 WSN 和 AIFN 占 TN 的比例。短期氮添加对凋落物 C/N 质量比和 AIFC/AIFN 质量比无显著影响, 但显著增加干季的 WSOC/WSN 质量比。【结论】氮沉降促进了季风常绿阔叶林凋落物中可溶性有机碳的积累, 这可能有利于可溶性有机物转入土壤中, 从而影响生态系统中的养分循环。

关键词: 氮沉降; 凋落物养分; 碳组分; 氮组分; 季风常绿阔叶林; 热带森林
中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-411X(2018)06-0070-07

Effects of simulated nitrogen deposition on litterfall carbon and nitrogen fractions in a monsoon evergreen broad-leaved forest

LI Dengfeng¹, ZHANG Jiaen^{1,2}, LIU Ziqiang¹, WANG Chi¹, YUAN Ai¹, WEI Hui^{1,2}
(1 College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China;
2 Key Laboratory of Agro-environment in the Tropics, Ministry of Agriculture/Guangdong Engineering Research
Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】To investigate responses of litterfall carbon (C) and nitrogen (N) fractions to atmospheric N deposition in a monsoon evergreen broad-leaved forest. 【Method】Three levels of N addition, including low N (LN, 35 kg·hm⁻²), medium N (MN, 70 kg·hm⁻²) and high N (HN, 105 kg·hm⁻²), were conducted for two years, with a control without extra N addition (CK). Fresh litterfall samples were collected in the dry and wet seasons, respectively. C and N fraction contents were analyzed. 【Result】N additions significantly increased the contents of total organic carbon (TOC) and water-soluble organic carbon (WSOC) in the wet season, with the WSOC/TOC ratio presenting a rising trend. N additions did not significantly alter acid-insoluble fraction carbon (AIFC) content and its proportion to TOC, although a decreasing trend was observed compared with the control. Different N addition treatments did not significantly change the contents of litterfall total nitrogen (TN), water-soluble nitrogen (WSN) and acid-insoluble fraction nitrogen (AIFN). The proportions of WSN and AIFN to TN were not altered significantly either. The short-term N additions did not significantly

affect litterfall C/N ratio and AIFC/AIFN ratio, but significantly increased WSOC/WSN ratio in the dry season. 【Conclusion】 The atmospheric N deposition promotes labile C accumulation and therefore is beneficial for litterfall decomposition to transfer nutrients into soil, which will further affect nutrient cycling in the tropical forest.

Key words: nitrogen deposition; litter nutrient; carbon fraction; nitrogen fraction; monsoon evergreen broad-leaved forest; tropical forest

受工业、运输等非农业活动以及农业生产中大量施用氮肥和畜牧业发展的影响,近几十年来大气中的活性氮浓度明显上升,导致大气氮沉降严重威胁全球陆地和水生生态系统^[1]。在全球范围内,每年沉降至海洋表面和各类生物群系的活性氮分别达到约 27 和 43.47 t^[2],预计至 2050 年,氮沉降量会进一步上升至目前的 2 倍^[3]。大气氮沉降加剧不仅会提高土壤酸度,使土壤营养元素失衡,还会引起水体富营养化^[4],同时,会使植物应对干旱、病虫害等自然胁迫的风险加剧,给森林生态系统的多样性带来不利影响^[5]。由于我国经济的快速发展,境内大气氮沉降自 1980 年以来持续增加,使我国已成为继欧美之后的全球三大氮沉降热点地区之一^[6],大气氮每年的沉降量从 1980 年的 13.2 kg·hm⁻² 增至 2000 年的 21.1 kg·hm⁻²^[7],在华南地区甚至高达 50 kg·hm⁻²^[8]。大气氮沉降已受到研究者的广泛关注,其生态后果及控制措施在近年来被大量研究。

国外自 20 世纪 80 年代开始对氮沉降如何影响森林结构和功能展开了一系列研究,并逐步构建了跨区域的综合观测和研究网络^[9-10]。在中国,莫江明等^[11]在 2002 年 10 月于鼎湖山自然保护区建立了第 1 个氮沉降长期监测样点,并系统研究了氮沉降对该区域地带性植被季风常绿阔叶林生态系统结构和功能的影响。凋落物的产量和养分供应是森林生态系统物质循环和能量流动的重要组成部分^[12],其分解过程会把光合作用固定于植物中的养分逐渐释放出来^[13],进而影响森林生态系统的养分动态和功能稳定性。氮沉降会促进森林凋落物分解^[14-15],本区域相关研究也支持这一研究结果^[16]。然而,以往的研究多集中在氮沉降对凋落物分解过程的影响,而对氮沉降背景下凋落物碳氮组分变化的研究较少,尚无法回答氮沉降是否会引起凋落物的质量变化,进而影响凋落物的分解过程。本研究在季风常绿阔叶林中进行野外模拟氮添加试验,调查凋落物养分含量对氮沉降的响应,为进一步揭示氮沉降如何影响森林碳氮循环过程提供基础数据。

<http://xuebao.scau.edu.cn>

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验的研究对象是位于广东省肇庆市鼎湖山自然保护区 (23°09'21"~23°11'30" N, 112°30'39"~112°33'41" E) 内的季风常绿阔叶林。由于地理位置特殊,受太平洋和印度洋季风的共同作用,本区域雨量充沛,干湿季节分明,年降雨量约为 1 900 mm,全年大部分降雨发生在湿季 (4—9 月),多年平均气温为 20.9 °C,属热带湿润型季风气候^[11]。鼎湖山自然保护区群落结构复杂、物种丰富,主要植被类型为季风常绿阔叶林、针阔叶混交林和马尾松 *Pinus massoniana* 林,其中季风常绿阔叶林为本区域气候顶级植被类型^[17]。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计 依托鼎湖山模拟氮沉降实验平台,采用随机区组设计:在上述森林内,选择坡向一致的林地设置 3 个区组,每个区组内建立 4 个投影面积为 15 m×15 m 的样方,共计 12 个样方,各样方间的缓冲带宽度大于 10 m,防止喷氮后各样方内地表径流或壤中流扩散至邻近样方而影响处理效果。每年氮添加量共设置 4 个水平处理,即空白对照 (CK)、低氮 (LN, 35 kg·hm⁻²)、中氮 (MN, 70 kg·hm⁻²) 和高氮 (HN, 105 kg·hm⁻²),每个区组内各处理和对照随机布置,每处理 3 个重复。自 2014 年 9 月开始实施氮添加处理,每月月底进行喷洒,使用邻近溪水配置对应的硝酸铵溶液,将对应上述氮添加量的溶液 (30 L) 在整个样方内均匀喷洒,全年喷施水量相当于增加 1.6 mm 降雨,空白样方喷洒等量溪水以消除水量增加的影响。

1.2.2 凋落物收集及分析 在上述各样方内,随机安装 3 个面积 1 m² 的凋落物收集框,每月进行凋落物收集以监测凋落物产量,于 2016 年 1 月 (干季) 和 7 月 (湿季) 收集新鲜凋落物进行养分含量测定。将每个样方内收集的凋落物混匀后在 65 °C 条件下烘干,烘干样品研磨,过 100 目筛后,分析其化学组分含量,主要包括总有机碳 (Total organic carbon, TOC)、总氮 (Total nitrogen, TN)、水溶性有

机碳 (Water-soluble organic carbon, WSOC)、水溶性氮 (Water-soluble nitrogen, WSN) 含量和酸不溶组分碳 (Acid-insoluble fraction carbon, AIFC)、酸不溶组分氮 (Acid-insoluble fraction nitrogen, AIFN) 含量。

1.2.3 凋落物养分含量的测定 凋落物碳、氮含量测定: 称取过 100 目筛的凋落物样品 20 μg , 放入铝纸锡舟内, 采用 TOC 分析仪 (multi N/C 2100, analytikjena) 直接测定, 即为凋落物的碳、氮含量。

凋落物水溶性碳氮含量测定: 提前制备好水溶性提取液, 用万分之一天平称取干燥样品 0.200 0 g 置于离心管中, 加入 12 mL 超纯水, 在 25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下低速 (150 $\text{r}\cdot\text{min}^{-1}$) 振荡 2 h, 提取上清液, 并用注射器过 0.45 μm 滤膜, 再抽取 1 mL 滤液, 稀释 10 倍为待测液, 将待测滤液置于冰箱 4 $^{\circ}\text{C}$ 条件下冷藏备用。待测液中的水溶性有机碳、氮含量采用上述 TOC 分析仪测定, 所得结果即为凋落物的水溶性有机碳、氮含量^[18-19]。

酸不溶组分碳、氮含量测定: 采用硫酸消化法。称取 0.3 g 过 100 目筛的凋落物样品, 加入 4.5 mL 体积分数为 72% 的硫酸, 在 20 $^{\circ}\text{C}$ 条件下消化 4 h, 加入蒸馏水稀释硫酸至体积分数为 3%, 放入烘箱, 105 $^{\circ}\text{C}$ 条件下烘 4 h, 用热蒸馏水反复冲洗试剂及残渣于滤纸上过滤, 直至硫酸完全洗净。滤纸过夜沥干, 烘干至恒质量后, 收集酸不溶组分, 其碳氮含量使用上述 TOC 分析仪进行分析, 即为酸不溶组分碳、氮含量^[20]。

1.2.4 数据分析 根据干、湿季凋落物产量和凋落

物碳、氮含量计算观测期产生的凋落物碳氮总量。采用重复测量方差分析 (Repeated measure ANOVA) 检验不同氮沉降水平下调落物养分含量的季节动态特征变化, 并且进一步使用单因素方差分析 (ANOVA) 检验各个采样时间氮处理的效应。采用 Tukey 多重比较对满足正态分布和方差齐性的数据进行组间显著性检验。对不满足正态分布以及方差齐性的数据, 进行对数转换后执行方差分析和多重比较。所有统计分析均在 SPSS 13.0 软件上完成, 显著性水平设定为 $\alpha<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对凋落物不同碳组分含量的影响

重复测量方差分析结果 (表 1) 表明, 氮添加处理不改变凋落物碳组分含量与比例 ($P>0.05$), 且不同季节间未出现明显差异 ($P>0.05$)。对干、湿季凋落物样品进行单因素方差分析, 结果表明: 不同的氮添加处理并未显著改变干季凋落物碳总量及其浓度, 也未明显改变 WSOC 和 AIFC 含量及其占 TOC 的比例 ($P>0.05$, 图 1)。然而, 与对照处理相比, 湿季凋落物 TOC 和 WSOC 含量随着氮添加量的增加而显著增加 ($P<0.05$, 图 1A 和 1C), 其中 CK、LN、MN 和 HN 处理下调落物 TOC 质量分数分别为 397.2、426.4、446.6 和 503.2 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$, WSOC 质量分数分别为 8.9、9.8、11.0 和 11.7 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。相比于 CK, LN、MN 和 HN 导致凋落物 TOC 含量分别增加 7.4%、12.5% 和 26.7%, WSOC 含量分别增加

表 1 凋落物碳、氮组分含量及比例的重复测量方差分析结果
Table 1 ANOVA results of repeated measures of litter carbon and nitrogen fractions and their proportions

分析指标	N 添加		季节		N 添加×季节	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
总有机碳(TOC)	0.602	0.632	1.105	0.324	0.634	0.614
水溶性有机碳(WSOC)	2.111	0.177	2.555	0.149	1.273	0.348
酸不溶组分碳(AIFC)	1.491	0.289	0.188	0.676	0.222	0.878
WSOC/TOC	0.770	0.542	2.335	0.165	0.110	0.952
AIFC/TOC	3.561	0.067	0.633	0.449	0.364	0.781
总氮(TN)	0.471	0.711	0.783	0.402	0.562	0.655
水溶性氮(WSN)	0.273	0.843	3.427	0.101	0.703	0.576
酸不溶组分氮(AIFN)	1.306	0.338	2.945	0.124	0.610	0.627
WSN/TN	0.560	0.656	8.481	0.020	0.268	0.874
AIFN/TN	1.823	0.221	0.172	0.689	0.180	0.907
C/N	0.888	0.488	8.414	0.020	0.886	0.488
WSOC/WSN	1.746	0.235	10.981	0.011	0.171	0.913
AIFC/AIFN	2.104	0.178	6.561	0.034	0.813	0.522

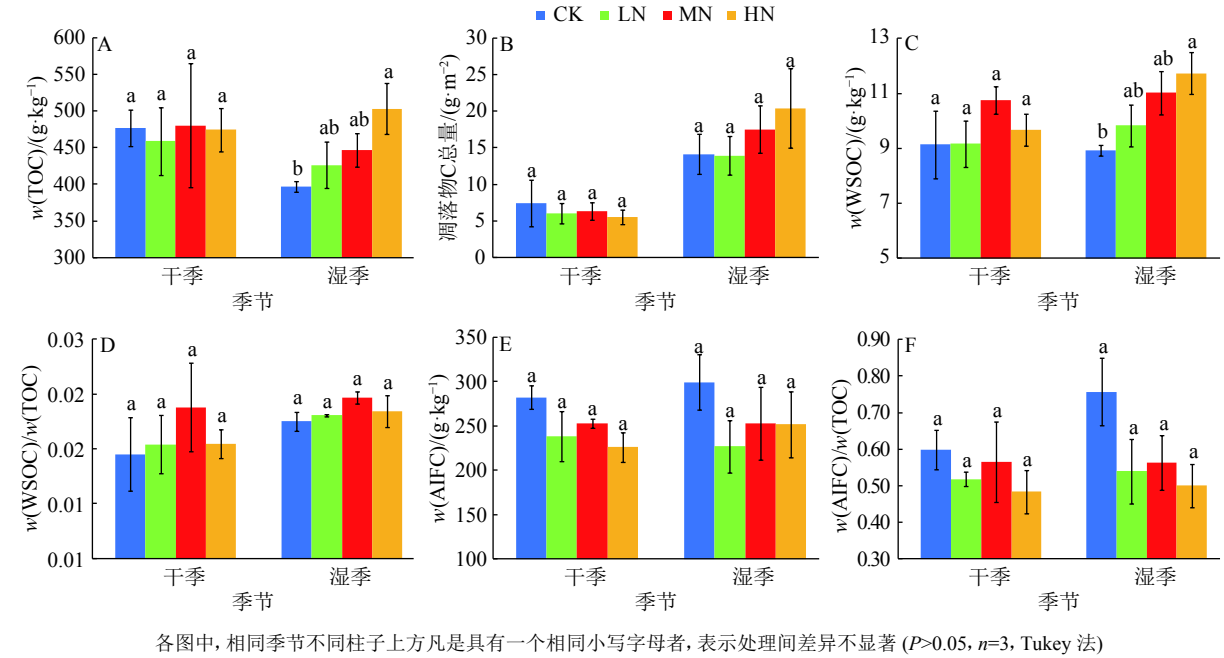


图 1 凋落物不同碳组分含量及比例对氮沉降的响应

Fig. 1 Responses of different litterfall carbon fraction contents and proportions to nitrogen deposition

10.2%、23.5% 和 31.5%, 但 WSOC/TOC 质量比并未发生显著变化 ($P>0.05$, 图 1D)。不同于 TOC 和 WSOC, 不同氮添加处理未显著改变 AIFC 含量以及 AIFC/TOC 质量比 ($P>0.05$, 图 1E 和 1F)。

2.2 氮沉降对凋落物不同氮组分含量的影响

重复测量方差分析表明, 氮添加处理未明显改变凋落物的氮组分含量及比例 ($P>0.05$), 但不同季节的凋落物 WSN/TN 质量比差异显著 ($P<0.05$, 表 1)。由图 2 可见, 与干季相比, 湿季凋落物 TN 未发生有

规律的变化 (图 2A), 而 WSN 含量及其占 TN 的比例出现下降 (图 2C 和 2D)。对干、湿季凋落物样品进行单因素方差分析, 结果表明: 不同的氮添加处理并未显著改变凋落物 TN、WSN、AIFN 含量和凋落物 N 总量, 以及 WSN 和 AIFN 含量占 TN 的质量分数 ($P>0.05$, 图 2)。

2.3 氮沉降对凋落物碳氮比的影响

重复测量方差分析表明, 氮添加处理未明显改变凋落物不同组分间的碳氮比 ($P>0.05$), 但不同季

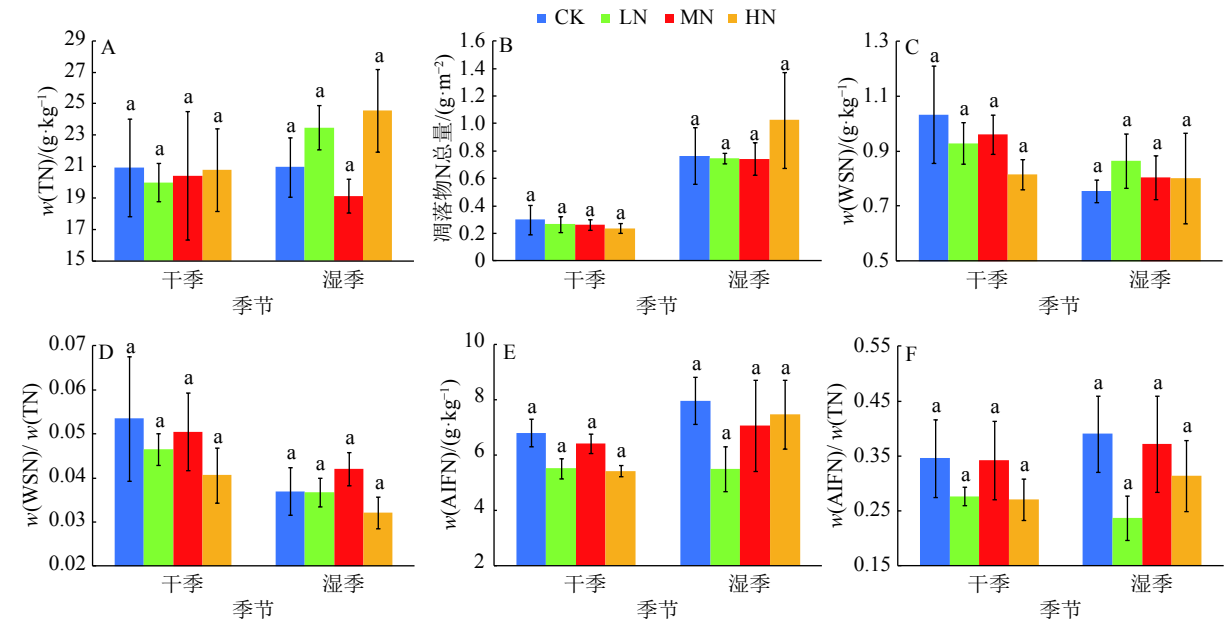
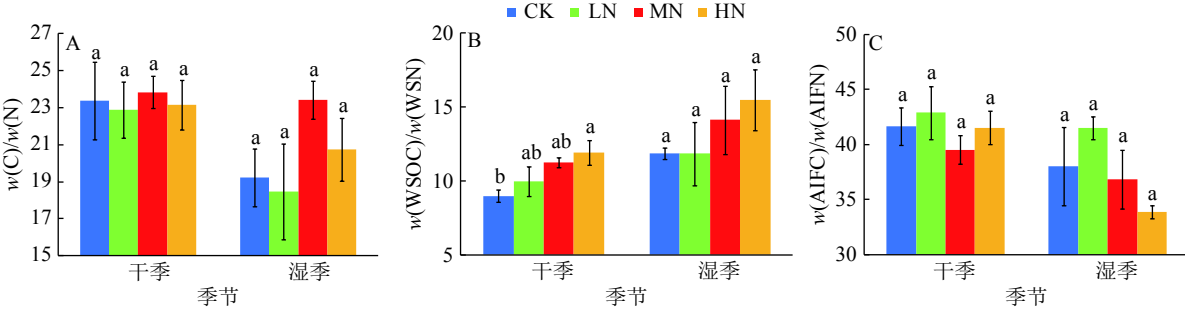


图 2 凋落物不同氮组分含量及比例对氮沉降的响应

Fig. 2 Responses of different litterfall nitrogen fraction contents and proportions to nitrogen deposition

节的凋落物碳氮比差异显著 ($P<0.05$, 表 1)。对干、湿季凋落物样品进行单因素方差分析, 结果表明: 不同的氮添加处理并未显著改变干季凋落物 C/N 质量比和 AIFC/AIFN 质量比 ($P>0.05$, 图 3A 和 3C), 但在干季, WSOC/WSN 随着氮添加量增加而显著升高 ($P<0.05$, 图 3B), 其中 CK、LN、MN 和 HN 处

理下的凋落物 WSOC/WSN 质量比分别为 9.0、10.0、11.2 和 12.0。相比于 CK, LN、MN 和 HN 导致凋落物 WSOC/WSN 质量比分别增加 10.9%、25.0% 和 32.6%。然而, 湿季凋落物不同组分间的碳氮比均未发生显著变化 ($P>0.05$)。



各图中, 相同季节不同柱子上方凡是具有一个相同小写字母者, 表示处理间差异不显著 ($P>0.05$, $n=3$, Tukey 法)

图 3 凋落物不同组分间碳氮比对氮沉降的响应

Fig. 3 Responses of C/N ratios of different litterfall components to nitrogen deposition

3 讨论与结论

气候条件、土壤养分状况以及植物的生物学特征是植物养分含量和动态的重要影响因子^[21]。本研究表明, 在干季, 季风常绿阔叶林凋落物碳、氮含量未受到外源氮添加的影响, 但湿季凋落物碳含量随施氮量的增加而上升, 且凋落物碳总量也具有上升趋势。这表明大气氮沉降对凋落物碳含量具有一定的正效应, 但可能受季节和植物生长状况的影响: 干季 (非生长季) 植物生长缓慢, 对养分需求量有限, 因此对外源氮添加没有产生显著响应; 在湿季 (生长季) 植物生长旺盛, 对养分需求量大, 因此外源氮添加有利于植物生长, 促进植物碳元素在植物体内的积累^[22]。相关研究表明, 氮沉降使植物的呼吸作用和光合作用增强, 刺激植物生长, 从而增加植物生物量, 促进植物碳的净固定^[23]。Xia 等^[24]对于不同陆地植物对氮输入的响应进行了整合分析, 结果表明氮输入不仅显著增加植物生物量, 同时也增加了植物氮含量。大气氮沉降物包括大量无机氮和活性有机氮, 能有效地促进土壤有效态氮的供应, 碳氮耦合作用进一步影响植物-土壤系统中的碳氮循环过程, 从而改变土壤有效碳、氮含量及其可利用性^[25], 改变植物体内养分含量。另外, 大气氮沉降能增加土壤微生物量, 土壤微生物胞外酶活性增强, 进而导致土壤微生物活性增加^[26], 从而加快植物-土壤系统中养分循环过程。这些过程都有可能增加植物生长所需养分的供应, 从而增加凋落物中碳、氮含量^[27]。而本研究并未观测到外源氮沉降

会导致凋落物的碳、氮含量明显增加, 这可能与氮沉降处理时间短、植被类型和土壤环境等因素有关。

凋落物质量在特定尺度上作为主导因素影响凋落物分解, 以前的研究表明碳氮比和木质素含量能有效地指示凋落物的质量状况, 即作为凋落物质量的代表性指标^[28]。本研究表明, 由于处理时间较短, 氮添加处理对凋落物氮含量和氮总量的效应不显著, 但凋落物在氮添加处理下的碳、氮含量均具有上升趋势, 因而, 导致凋落物碳氮比变化不显著。本试验中, 阔叶林处于演替后期, 属于富 N 成熟林, 土壤可利用性氮含量大于处于演替较早阶段的森林类型^[29], 其根系吸收利用氮能力饱和^[29], 从而在氮饱和的季风林中, 氮添加处理不会显著改变凋落物碳氮比。Ma 等^[30]模拟氮沉降研究结果显示, 林龄 (11、20 和 45 年) 越大, 凋落物碳氮比越高。Zhou 等^[31]以中国西部常绿阔叶林为研究对象, 发现氮添加处理显著提高了凋落物碳氮比。而其他地区的相关研究结果表明, 樟树 *Cinnamomum camphora* 人工林在氮沉降下的凋落物碳含量无显著变化, 但氮含量均有所上升, 因此降低了凋落物的碳氮比^[32]。这些研究结果与本试验结果不一致, 说明在不同森林类型或植被条件下, 氮添加对植物凋落物的影响可能存在差异。与成熟林不同, 当森林类型处于演替早期阶段时, 土壤对氮沉降极其敏感, 土壤全氮含量的增长与氮沉降量呈正相关关系^[33], 植物对氮素的吸收率也相应增加, 从而导致不同林型的凋落物碳氮比出现不同的变化趋势。

本研究结果显示, 在湿季水溶性有机碳含量随

氮添加量的增加而显著增加, 且水溶性碳组分比例比干季有所上升, 这表明施氮在一定程度上促进了凋落物中水溶性有机碳的积累, 从而有利于为土壤提供大量可利用性碳形态。另一方面, 酸不溶组分作为凋落物中不容易降解的组分, 其降解过程对凋落物分解起着重要作用, 在分解初期, 凋落物可溶性组分逐渐减少, 而难分解的酸不溶组分也随凋落物的质量损失支配后期分解过程^[34]。本研究发现, 氮添加处理下的酸不溶组分碳、氮含量及其比例与对照组相比均有所下降。李巧玲等^[35]研究表明, 较高的酸不溶组分碳含量可能会减缓凋落叶分解速率。本研究针对氮沉降对新鲜凋落物碳氮组分的影响, 发现氮添加处理在湿季会增加水溶性有机碳含量和比例, 降低酸不溶组分碳、氮含量和比例, 说明氮沉降能改善季风常绿阔叶林凋落物质量。凋落物质量的变化可能会促进凋落物在土壤中的分解^[36], 从而改变整个系统内的碳氮循环过程^[37]。

通过对可溶性组分和酸不溶组分的进一步分析可以看出, 随着氮添加量的增加, 干季 WSOC/WSN 质量比明显升高, 但湿季 AIFC/AIFN 质量比出现下降趋势, 这 2 种不同组分间的氮碳比变化强度在一定程度上决定了凋落物的氮碳比。本研究结果表明, 不同季节的凋落物氮碳比差异显著。当某区域氮沉降率较高时, 部分氮被植物根系和树冠直接吸收和利用, 而多余的大部分氮进入细胞后转化为自由氨基酸, 特别是以精氨酸的形式储存在植物体内^[38], 自由氨基酸参与植物细胞内的许多生物化学过程, 其累积量使植物酚类和木质素的含量发生变化^[39], 而这些不同的化合物可以被归类于不同的有机碳组分, 从而导致不同组分间的氮碳比出现不同的变化。土壤有效氮水平在一定程度上受氮沉降影响而上升, 并改变土壤微生物群落结构以及碳氮分解的关键酶活性, 进而影响凋落物的分解过程和土壤有机质生成, 植物和微生物以土壤作为养分转化交换平台, 从而使森林凋落物不同组分间的氮碳比发生变化^[40]。

在湿季短期的氮添加处理对季风常绿阔叶林凋落物 TOC 和 WSOC 含量具有显著的正效应, 但与对照比较, AIFC 含量以及 AIFC 占 TOC 的比例均有所下降。不同于凋落物碳组分含量的变化趋势, 氮添加处理对凋落物 TN、WSN 和 AIFN 含量, 以及 WSN 和 AIFN 占 TN 的比例影响不显著。干季凋落物 WSOC/WSN 质量比随氮添加量增加而明显上升, C/N 质量比和 AIFC/AIF 质量比并未随氮添加量增加而发生显著变化。整体而言, 氮添加处

理会增加凋落物水溶性有机碳含量和比例, 降低酸不溶组分碳氮含量和比例, 说明氮沉降可能对季风常绿阔叶林凋落物质量具有一定的改善作用, 从而有利于凋落物在土壤中的分解和养分释放。受到氮添加处理时间、森林类型以及土壤状况的综合影响, 氮素并不是凋落物养分变化的唯一控制因素。后续的研究重点将放在长期与短期研究相结合, 进一步探讨氮沉降对植被养分的有效利用以及土壤养分间的动态转移关系方面。

致谢: 本研究依托中国科学院华南植物园申卫军研究员在鼎湖山建立的氮沉降试验平台, 黄峰博士在样方维护和样品收集过程中提供极大帮助, 在此一并致谢!

参考文献:

[1] LIU X J, DUAN L, MO J M, et al. Nitrogen deposition and its ecological impact in China: An overview[J]. *Environ Pollut*, 2011, 159(10): 2251-2264.

[2] 谢迎新, 张淑利, 冯伟, 等. 大气氮素沉降研究进展[J]. *中国生态农业学报*, 2010, 18(4): 897-904.

[3] GALLOWAY J N, DENTENER F J, CAPONE D G, et al. Nitrogen cycles: Past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004, 70(2): 153-226.

[4] GALLOWAY J N, ABER J D, ERISMAN J W, et al. The nitrogen cascade[J]. *Bioscience*, 2003, 53(4): 341-356.

[5] 鲁显楷, 莫江明, 董少峰. 氮沉降对森林生物多样性的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5532-5548.

[6] MARKLEIN A R, HOULTON B Z. Nitrogen inputs accelerate phosphorus cycling rates across a wide variety of terrestrial ecosystems[J]. *New Phytol*, 2012, 193(3): 696-704.

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

[8] FANG Y T, GUNDERSEN P, MO J M, et al. Input and output of dissolved organic and inorganic nitrogen in subtropical forests of South China under high air pollution[J]. *Biogeosciences*, 2008, 5(2): 339-352.

[9] SPARKS J P, WALKER J, TURNIPSEED A, et al. Dry nitrogen deposition estimates over a forest experiencing free air CO₂ enrichment[J]. *Global Change Biol*, 2008, 14(4): 768-781.

[10] FAGERLI H, AAS W. Trends of nitrogen in air and precipitation: Model results and observations at EMEP sites in Europe, 1980-2003[J]. *Environ Pollut*, 2008, 154(3): 448-461.

[11] 莫江明, 薛璟花, 方运霆. 鼎湖山主要森林植物凋落物分解及其对 N 沉降的响应[J]. *生态学报*, 2004, 24(7): 1413-1420.

[12] 郑金兴, 杨智杰, 凌华, 等. 楠木人工林凋落物的产量与月动态[J]. *福建师范大学学报(自然科学版)*, 2011,

- 27(1): 88-92.
- [13] HE Z M, CHEN G S, LIU J B, et al. Relationships among litter production, decomposition and accumulation in Chinese fir plantation[J]. Chin J Appl Environ Biol, 2003, 9(4): 352-356.
- [14] LIMPENS J, BERENDSE F. How litter quality affects mass loss and N loss from decomposing *Sphagnum*[J]. Oikos, 2003, 103(3): 537-547.
- [15] VESTGARDEN L S. Carbon and nitrogen turnover in the early stage of Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) needle litter decomposition: Effects of internal and external nitrogen[J]. Soil Biol Biochem, 2001, 33(4/5): 465-474.
- [16] 徐国良, 莫江明, 周国逸, 等. 氮沉降下鼎湖山森林凋落物分解及与土壤动物的关系[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 901-907.
- [17] 鲁显楷, 莫江明, 李德军, 等. 鼎湖山主要林下层植物光合生理特性对模拟氮沉降的响应[J]. 北京林业大学学报, 2007, 29(6): 1-9.
- [18] 吕国红, 周广胜, 周莉, 等. 土壤溶解性有机碳测定方法与应用[J]. 气象与环境学报, 2006, 22(2): 51-55.
- [19] 周美珩, 龚建美, 段文标, 等. 林隙与凋落物对天然红松混交林土壤水溶性有机碳的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(2): 232-237.
- [20] RYAN M G, MELILLO J M, RICCA A. A comparison of methods for determining proximate carbon fractions of forest litter[J]. Can J Forest Res, 1990, 20(2): 166-171.
- [21] LI D J, MO J M, PENG S L, et al. Effects of simulated nitrogen deposition on elemental concentrations of *Schima superba* and *Cryptocarya concinna* seedlings in subtropical China[J]. Acta Ecol Sin, 2005, 25(9): 2165-2172.
- [22] KOZOVITS A R, BUSTAMANTE M M C, GARO-FALO C R, et al. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna[J]. Funct Ecol, 2007, 21(6): 1034-1043.
- [23] LI D D, TIAN M Y, CAI J, et al. Effects of low nitrogen supply on relationships between photosynthesis and nitrogen status at different leaf position in wheat seedlings[J]. Plant Growth Regul, 2013, 70(3): 257-263.
- [24] XIA J Y, WAN S Q. Global response patterns of terrestrial plant species to nitrogen addition[J]. New Phytol, 2008, 179(2): 428-439.
- [25] LU X K, MO J M, GILLIAM F S, et al. Nitrogen addition shapes soil phosphorus availability in two reforested tropical forests in Southern China[J]. Bio tropica, 2012, 44(3): 302-311.
- [26] MERON D, ATIAS E, KRUH L I, et al. The impact of reduced pH on the microbial community of the coral *Acropora eurystroma*[J]. Isme J, 2011, 5(1): 51-60.
- [27] 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等. 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[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1337-1346.
- [28] PENG S L, LIU Q. The dynamics of forest litter and its responses to global warming[J]. Acta Ecol Sin, 2002, 22(9): 1534-1544.
- [29] 全权, 张震, 何念鹏, 等. 短期氮添加对东灵山三种森林土壤呼吸的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(3): 797-804.
- [30] MA Y C, ZHU B, SUN Z Z, et al. The effects of simulated nitrogen deposition on extracellular enzyme activities of litter and soil among different-aged stands of larch[J]. J Plant Ecol, 2014, 7(3): 240-249.
- [31] 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.
- [32] 赵晶, 闫文德, 郑威, 等. 樟树人工林凋落物养分含量及归还量对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2016, 36(2): 350-359.
- [33] FAN H B, YUAN Y H, WANG Q, et al. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon and total nitrogen beneath Chinese fir plantations[J]. J Fujian College Forestry, 2007.
- [34] BERG B, MCCLAUGHERTY C. Plant litter: Decomposition, humus formation, carbon sequestration[M]. Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2014.
- [35] 李巧玲, 曾辉. 美国南卡罗来纳州森林湿地十种典型植物凋落叶的分解特征[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2342-2351.
- [36] CARTER D O, YELLOWLEES D, TIBBETT M. Cadaver decomposition in terrestrial ecosystems[J]. Naturwissenschaften, 2007, 94(1): 12-24.
- [37] 向元彬. 模拟氮沉降和降雨量改变对华西雨屏区常绿阔叶林土壤碳氮特征的影响[D]. 雅安: 四川农业大学, 2016.
- [38] BOXMAN A W, VEN P J M, ROELOFS J G M. Ecosystem recovery after a decrease in nitrogen input to a Scots pine stand at Ysselsteyn, the Netherlands[J]. Forest Ecol Manag, 1998, 101(1): 155-163.
- [39] 李德军, 莫江明, 方运霆, 等. 氮沉降对森林植物的影响[J]. 生态学报, 2003, 23(9): 1891-1900.
- [40] HESSEN D O, AGREN G I, ANDERSON T R, et al. Carbon, sequestration in ecosystems: The role of stoichiometry[J]. Ecology, 2004, 85(5): 1179-1192.

【责任编辑 李晓卉】