

不同梯度氮沉降对亚热带甜槠林凋落物及养分的影响

徐俊¹, 李茂¹, 刘露¹, 田地², 徐小牛¹

(1. 安徽农业大学 林学与园林学院, 安徽 合肥 230036; 2. 北京大学 城市与环境学院, 北京 100083)

摘要: [目的] 分析不同梯度氮沉降作用下亚热带常绿阔叶甜槠 (*Castanopsis eyrei*) 林凋落物量及养分变化规律, 从而为亚热带地区氮沉降研究提供数据参考与理论依据。[方法] 对安徽省仙寓山地区设置不同梯度施氮对照试验, 长期实地监测甜槠林凋落物量及其养分的响应状况。[结果] 凋落物量大小顺序为: 高氮加磷(HN+P) > 低氮(LN) > 高氮(HN) > 对照 CK, 不同处理间的差异未达到显著水平; 但是落叶量 LN 与 CK 之间差异显著 ($p=0.023$)。各处理凋落物量的月变化模式均呈双峰型, 分别在 4 和 11 月达到峰值; 凋落物中各组分所占比例从大到小均为: 叶 > 果 > 枝 > 碎屑 > 花 > 皮; 施肥处理不同程度上改变了落果量的比重: HN+P(27%) > HN(25%) > CK = LN(23%)。甜槠林 C, N, P, K, Ca, Mg 这 6 种大量元素的养分年归还量共计: HN+P 4.62 t/(hm²·a) > CK 4.44 t/(hm²·a) > HN 4.17 t/(hm²·a) > LN 3.96 t/(hm²·a); 不同处理各养分(K 除外)归还量均表现为上述关系, 且 HN+P 与 CK 之间的 N, P 的养分归还量差异显著 ($p=0.047; 0.023$)。对于各组分而言, 落叶的养分归还量占年养分归还量的 52% ~ 58%。[结论] 模拟不同梯度的氮沉降处理在一定程度上改变了甜槠林凋落物总量的大小及其组成比例, 且影响到其他养分的吸收及归还量。

关键词: 常绿阔叶林; 凋落物量; 模拟氮沉降; 养分归还量

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0113-06

中图分类号: S718.5

文献参数: 徐俊, 李茂, 刘露, 等. 不同梯度氮沉降对亚热带甜槠林凋落物及养分的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 113-118. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.027

Effects of Nitrogen Deposition on Litterfall and Its Nutrient in Subtropical Evergreen Broad-leaved *Castanopsis Eyrei* Forest

XU Jun¹, LI Mao¹, LIU Lu¹, TIAN Di², XU Xiaoniu¹

(1. College of Forestry & Landscape Architecture, Anhui Agricultural University, Hefei, Anhui 230036, China;

2. College of Urban and Environmental Sciences, Peking University, Beijing 100081, China)

Abstract: [Objective] This essay provided data reference and theoretical basis for nitrogen deposition in subtropical regions by analyzing effects of nitrogen deposition on litterfall and its nutrient in a subtropical evergreen broad-leaved *Castanopsis eyrei* forest. [Methods] Different gradient nitrogen control experiments were set up in Xianyu mountain area of Anhui Province to monitor *C. eyrei* forest litterfall and nutrient response status for a long time. [Results] The order of the annual litterfall were as follows: high nitrogen and phosphorus(HN+P) > low nitrogen(LN) > high nitrogen(HN) > control check(CK). There was no significant difference among the treatments. There was significant difference in foliar litter between LN and CK treatments ($p=0.023$). The total litterfall showed a bimodal type with the peaks appeared in April and November. The order of the proportion of the different litter components for the four treatments ranked as leaf > fruit > branch > miscellaneous > flower > bark. HN+P and HN treatments changed the fruit percentage to a certain degrees: HN+P(27%) > HN(25%) > CK = LN (23%). The annual amount of total nutrient-returns of the six macro-elements(C, N, P, K, Ca, Mg) was as follows: HN+P 4.62 t/(hm²·a) > CK 4.44 t/(hm²·a) > HN 4.17 t/(hm²·a) > LN 3.96 t/(hm²·a). The similar patterns appeared for C, N, P, Mg, Ca returns

收稿日期: 2015-11-20

修回日期: 2016-01-04

资助项目: 国家自然科学基金项目“不同林龄序列亚热带常绿阔叶林地下碳氮耦合循环特点”(31370626); 国家“973”计划项目“中国典型生态系统碳循环主要过程及其碳源汇机制”(2010CB950602)

第一作者: 徐俊(1989—), 男(汉族), 安徽省安庆市人, 硕士研究生, 主要从事森林培育、园林植物观赏与园艺方面研究。E-mail: xujunahaq@sina.com。

通讯作者: 徐小牛(1961—), 男(汉族), 安徽省合肥市人, 博士, 教授, 主要从事森林培育、园林植物栽培与养护等方面的研究。E-mail: xnxs2007@ahau.edu.cn。

in the four treatments. There was significant differences in annual returns of N and P between HN+P and CK treatments ($p=0.047$; $p=0.023$). The nutrient return from foliar litter covered 52%~58% of the annual total. [Conclusion] We simulated different gradient of nitrogen settlement and found that it changed the *C. eyrei* forest total litter amount and composition proportion in a certain extent and affected the absorption of other nutrients and return amount.

Keywords: evergreen broad-leaved forest; litterfall production; simulated nitrogen deposition; nutrient return

大气中的氮元素以 NH_x (包括 NH_3 , RNH_2 和 NH_4^+) 和 NO_x 的形式, 降落到水体的过程叫氮沉降, 自工业革命以来, 人口的快速增长、汽车尾气的大量排放、化石燃料的过度使用, 使得全球大气 N 素含量显著增加^[1-2]; 据相关报道称: 欧洲与北美大部分国家的大气氮沉降量比工业革命前增加了 3~10 倍, 如欧洲工业发达地区氮沉降超过了 $25 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (以 N 计), 北某些森林地区大气氮沉降也达到了 $40 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ (以 N 计)^[3-5]; 目前大量数据表明^[6], 中欧及其北美地区的森林大气氮输入量为每年 $25 \sim 60 \text{ kg}/\text{hm}^2$ (以 N 计), 大大超过了森林的年需求量, 已造成水域氮富集和陆地生态系统氮超负荷等一系列严重的生态问题^[7]。与此同时大量研究表明, 氮沉降对生产力有明显的促进作用, 且有利于提高森林生态系统碳积累量, Miller^[8] 研究了不同施肥水平森林生态系统凋落物变化模式, 结果发现相同年龄和密度的森林凋落量随着施 N 量的增加而增加。中国的氮沉降研究起步较晚, 发展相对缓慢; 20 世纪 70 年代末开启了中国对氮沉降的研究进程, 进入 80 年代, 以酸雨为代表的环境问题日益凸显, 局部地区针对大气含氮化合物的定量研究增多; 目前, 大气氮沉降研究受到前所未有的关注, 氮沉降成为全球热点研究内容之一。

森林是陆地生态系统的主体、最重要的碳库; 凋落物作为森林生态系统碳库主要的组成部分, 联系土壤养分与植被养分库的重要“纽带”^[9], 其在维持土壤肥力, 促进森林生态系统正常的物质循环和养分平衡方面起着重要的作用^[10]。因此, 森林凋落物的变化对于陆地生态系统碳储量和全球碳循环有密切的相关性。从国内外氮沉降与凋落物相互关系的研究来看, 针对凋落物分解对氮沉降增加的响应规律开展的研究比较多^[11-13], 但对凋落物产量及养分归还量影响的报道相对较少。本研究基于张赟齐等^[14]对亚热带常绿阔叶林氮沉降长期研究, 得出该地区森林大气氮输入量, 选择亚热带北部有代表性的常绿阔叶老龄林作为研究对象, 并通过野外施 N 模拟氮沉降试验, 探讨不同梯度氮沉降对森林凋落物量及养分归还量的影响, 为研究氮沉降对亚热带森林生态系统生物过程和氮循环的影响提供实地观测数据和理论参考。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于安徽省石台县仙寓山, 地理位置为 $30^\circ 1' 47'' \text{N}$, $117^\circ 21' 23'' \text{E}$, 海拔为 375 m。研究区在大地构造上属江南古陆和南京拗陷的过渡地带, 属于亚热带湿润气候, 光照充足, 四季分明。受太平洋暖空气和北方冷空气的交替影响, 春季温凉多雨, 夏季炎热湿润, 秋季先干后湿, 冬季寒冷少雨。年平均气温为 16°C , 最高气温的历年平均值为 38.8°C ; 历年最低气温的平均值为 -8.9°C 。近 10 a 平均降水量为 1 521 mm, 降水的年际变化显著。一年中降水量主要分布在 4—9 月, 约占全年总降水量的 71%。调查区植被丰富, 森林覆盖率达 85%, 其地带性森林植被类型在海拔 600 m 以下多为亚热带常绿阔叶林, 也分布着大面积的杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林; 在海拔 600 m 以上分布有常绿落叶阔叶混交林、落叶阔叶林及马尾松 (*Pinus massoniana*) 林等。土壤类型为黄棕壤, 质地轻黏, 呈酸性反应。

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 2011 年初在试验区选择长期没有人为干扰的甜槠 (*Castanopsis eyrei*) 老龄林分, 设置固定样地 12 块, 面积均为 $20 \text{ m} \times 20 \text{ m}$, 每个样地之间设置 8~10 m 的隔离带, 并进行林分本底调查 (表 1)。

根据王氏家谱资料记载, 调查林分林龄在 200 年生左右, 作为风水林一直受到保护, 没有人为干扰。该林分以甜槠为优势种群, 其优势度为 75%~85%, 调查结果显示: 林分密度 $958 \sim 1\,517 \text{ 株}/\text{hm}^2$ (胸径 $\text{DBH} \geq 5.0 \text{ cm}$), $\text{DBH} \geq 8.0 \text{ cm}$ 的林木数量占样地 70% 以上, 部分样地小树较多 (胸径多集中在 6 cm 左右) 其最大胸径为 79.2 cm, 冠层高度 15~18 m; 主要伴生树种有蓝果树 (*Nyssa sinensis*)、枫香 (*Liquidambar formosana*)、树参 (*Dendropanax denticger*)、杜英 (*Elaeocarpus sylvestris*); 灌木树种主要有山矾 (*Symplocos sumuntia*)、冬青 (*Llex spp.*)、老鼠矢 (*Symplocos stellaris*)、连蕊茶 (*Camellia cuspidata*) 等, 丰富度较高。

表 1 各处理样地的林分和土壤化学特征

处理水平	林分特征				pH 值 (H ₂ O)	表层(0—10 cm)土壤特性				
	密度/ (株·hm ⁻²)	胸高断面面积/ (m ² ·hm ⁻²)	平均胸径/ cm			有机 C/ (g·kg ⁻¹)	全 N/ (g·kg ⁻¹)	全 P/ (g·kg ⁻¹)	NH ₄ -N/ (mg·kg ⁻¹)	NO ₃ -N/ (mg·kg ⁻¹)
CK	1 517	19.8±5.6	13.1±3.3	4.58±0.05	60.7±6.5	3.23±0.37	0.32±0.02	12.23±1.08	2.17±0.56	
低氮(LN)	1 292	20.4±3.5	14.5±2.1	4.69±0.08	67.8±2.7	3.43±0.40	0.30±0.02	10.20±1.07	1.63±0.40	
高氮(HN)	1 167	20.3±5.5	15.1±1.0	4.62±0.13	72.4±11.7	3.70±0.75	0.31±0.04	11.96±1.51	1.68±0.30	
高氮+磷(HN+P)	958	35.3±1.6	24.0±7.6	4.64±0.10	65.3±7.1	3.55±0.51	0.33±0.03	11.86±1.24	1.77±0.30	

注:调查样方内林分密度统计时(*DBH≥5.0 cm);部分重复样地小树较多导致密度偏大,但不影响结果的准确性。

1.2.2 试验设计 试验分为 3 个处理,1 个对照,共 4 组,每组 3 个重复。4 个水平分别为:对照(CK),低 N [LN,50 kg/(hm²·a)],高 N [HN,100 kg/(hm²·a)],高 N+P [(HN+P,100 kg/(hm²·a)+50 kg/(hm²·a)]。N 肥为硝酸铵(NH₄NO₃)、P 肥为重过磷酸钙[Ca(H₂PO₄)·H₂O],每月中旬对各处理定量施肥 1 次,具体方法是将各处理水平所需肥料溶于 20 L 溪水,用背式喷雾器在该样方中均匀喷洒,对照样地喷洒等量的溪水。

在各调查样地内设置 5 个边长为 0.75 m×0.75 m 的方形凋落物收集器。收集器为孔径 1 mm 的尼龙网制成的方口盘,网底距地面约 0.5 m。每月收集 1 次。观测期自 2011 年 6 月至今,本文参考数据采集自 2014 年 3 月至 2015 年 2 月。

将收集的凋落物置于 60 °C 干燥箱中烘干至恒重。为研究凋落物组成,将凋落物分为叶、枝、繁殖器官、皮、碎屑等 5 大类,分别称重,分取样品粉碎后过 80 目筛,密封于样品瓶中供养分分析。对每块样地收集框中的凋落物重量取平均值,换算为各月单位面积凋落物产量。

分析其 C,N,P,K,Ca 和 Mg 等主要营养元素的

质量分数,其中 C,N 用 EA 3000 元素分析仪测定;全 P 采用湿式消化法消化后,FIA Star 5000 流动注射仪测定;K,Ca,Mg 用 TAS-990AFG 型原子吸收分光光度计测定。

1.2.3 数据处理 采用 SPSS 软件进行单因素方差分析,以 LSD 多重检验法凋落物量在不同处理间的差异显著性,显著性差异水平为 $p<0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 甜槠林年凋落物总量及各组分比例

通过一个完整年度(2014 年 3 月至 2015 年 2 月)的测定结果,亚热带甜槠林 4 种不同处理年平均凋落物量范围为 7.9~9.47 t/(hm²·a);且低 N 4.88 t/(hm²·a)与 CK 4.18 t/(hm²·a)两组间年落叶量差异显著($p=0.023$)。CK 0.10 t/(hm²·a)与高 N+P 0.23 t/(hm²·a)两处理间落花量差异接近显著水平($p=0.054$) (表 2)。各处理均在一定程度上改变了凋落物的组成比例,落叶占总重的 49.33%~55.06%,落果 23.23%~26.99%,落枝 11.14%~13.28%,不同处理的凋落物的组分大小依次为:落叶>落果>落枝>碎屑>花>皮。

表 2 甜槠林凋落物的组成及其比例

处理	落叶		落枝		落果		花		碎屑		皮	
	数量	比例	数量	比例	数量	比例	数量	比例	数量	比例	数量	比例
CK	4.18±0.09 ^b	52.87	0.99±0.18 ^a	12.52	1.84±0.14 ^a	23.28	0.10±0.01 ^a	1.30	0.74±0.05 ^a	9.39	0.05±0.03 ^a	0.65
LN	4.88±0.04 ^a	55.06	0.99±0.18 ^a	11.23	2.06±0.94 ^a	23.23	0.15±0.06 ^a	1.72	0.67±0.08 ^a	7.60	0.10±0.04 ^a	1.17
HN	4.57±0.33 ^{ab}	54.31	0.94±0.05 ^a	11.14	2.13±0.18 ^a	25.28	0.15±0.09 ^a	1.81	0.60±0.05 ^a	7.18	0.02±0.01 ^a	0.28
HN+P	4.67±0.36 ^{ab}	49.33	1.26±0.26 ^a	13.28	2.56±0.95 ^a	26.99	0.23±0.03 ^a	2.41	0.67±0.11 ^a	7.04	0.09±0.1 ^a	0.94
平均	4.58±0.21	52.89	1.05±0.17	12.04	2.15±0.55	24.70	0.16±0.05	1.81	0.67±0.07	7.80	0.07±0.05	0.76

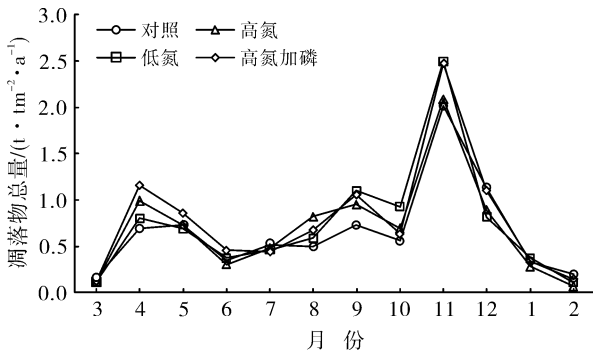
注:同一列不同字母表示处理间差异显著(单因素方差分析,LSD 多重比较法, $n=3,p<0.05$)。数量的单位为:t·hm²/a,比例的单位为:%。

2.2 甜槠林凋落物的月动态

不同处理甜槠林凋落物量均呈现规律性的波动,总量在年周期中呈双峰型曲线,峰值出现在春季 4

月、秋季 11 月,最低值则出现于 2 月,且在图 1 中可见 9 月出现了一个并非十分明显的凋落小高峰(图 1)。在 4 月凋落高峰期,不同处理间凋落物量大小

为:HN+P>HN>LN>CK,由此可见施肥处理促进了春季凋落物量的增加,且随施肥量的增加而增长的趋势;而 11 月凋落高峰期,不同处理间凋落物量大小为:LN>HN+P>HN>CK,因此可见施肥处理均促进了凋落物量。



注:测定时间为 2014 年 3 月至 2014 年 5 月。下同。

图 1 不同处理甜槠林凋落物总量季节动态

2.3 甜槠林凋落物的养分归还

凋落物中营养元素最终归还土壤,对维持林地的长期生产力具有重要意义。各处理甜槠林凋落物 6 种元

素的年养分归还总量为 3 963~4 622.14 kg/(hm²·a),且不同处理凋落物中叶、枝、花、果、碎屑总养分归还量(表 3)的大小,依次为:C>N>Ca>K>Mg>P,其中 C 占归还总量的 90%以上;HN+P 处理与 CK 之间 N($p=0.047$),P($p=0.023$)元素年归还量差异显著;4 种处理间除 K 以外,其他养分归还量均出现同一规律,表现为:HN+P>LN>HN>CK。

2.4 凋落物主要组分的养分归还量季节变化

2.4.1 落叶养分归还量季节变化 不同处理甜槠林落叶养分归还量总体上呈明显的波动性,且在年周期中呈现双峰型曲线(图 2),峰值出现在春季 4 月、秋季 11 月;最低值则出现于 2 月,且在 9 月出现了一个较为明显的凋落小高峰,其变化趋势与年凋落物总量变化模式极为接近;在秋季落叶高峰 LN 处理使得叶的养分归还量显著高于其他几个处理。

2.4.2 落果养分归还量季节变化 甜槠林落果主要集中在秋冬季(图 3),其养分归还量总体上呈明显的单峰型,最低值则出现于冬季的 2 月;峰值主要集中在秋季的 11 月,LN 与 HN+P 处理使得果的养分归还量高于其他 2 处理。

表 3 甜槠林凋落物主要元素的年归还量

处理	养分归还量 kg/(hm ² ·a ⁻¹)						合计
	K	Ca	Mg	P	C	N	
CK	46.87±5.05 ^a	68.88±0.67 ^a	30.67±1.17 ^a	2.90±0.18 ^b	3 729.32±169.64 ^a	84.99±5.17 ^b	3 963.62±175.21 ^a
LN	52.69±6.72 ^a	84.84±5.72 ^a	33.90±3.74 ^a	3.32±0.86 ^{ab}	4 173.69±351.32 ^a	95.86±7.34 ^{ab}	4 444.31±359.86 ^a
HN	53.65±2.02 ^a	71.00±4.61 ^a	32.58±2.81 ^a	3.21±0.30 ^{ab}	3 919.32±227.59 ^a	93.51±4.72 ^{ab}	4 173.29±241.82 ^a
HN+P	52.34±7.60 ^a	84.32±12.23 ^a	35.18±4.79 ^a	4.25±0.29 ^a	4 342.69±622.67 ^a	103.36±11.96 ^a	4 622.14±658.65 ^a

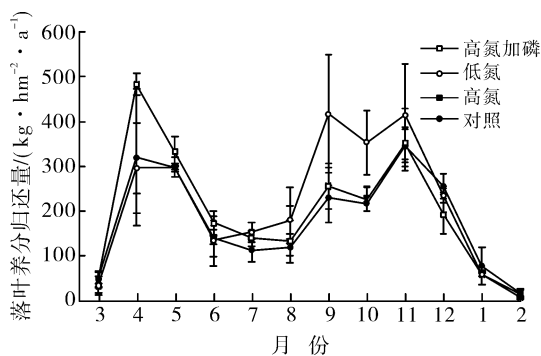


图 2 不同处理甜槠林落叶养分归还量季节动态

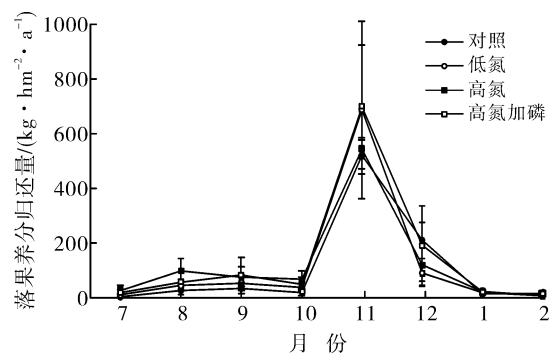


图 3 不同处理甜槠林落果养分归还量季节动态

2.4.3 落枝养分归还量季节变化 不同处理甜槠林落枝养分归还量主要集中在秋冬季,春季养分归还量最低,由于降雨、台风等外界不定因素的干扰,导致落枝的养分归还量没有相对明显的峰值,显得无规律性(图 4)。

3 结论与讨论

3.1 凋落物量

结果显示;模拟不同梯度的氮沉降处理在一定程度上改变甜槠林凋落物总量的大小及其组成比例。

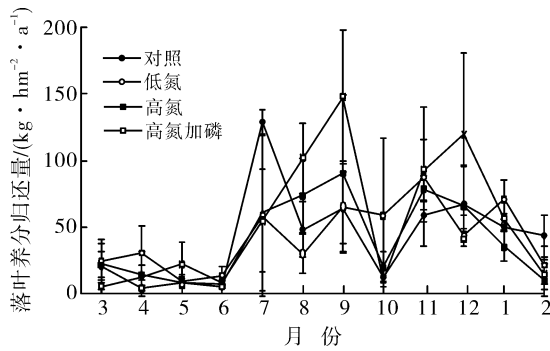


图4 不同处理甜槠林落枝养分归还量季节动态

亚热带北部甜槠林凋落物量因不同氮沉降处理出现了一定的波动,2014—2015年凋落物量大小:HN+P>LN>HN>CK;其变动范围7.90~9.47 t/(hm²·a),与安徽肖坑亚热带常绿阔叶林的凋落物量6.91~9.85 t/(hm²·a)^[15]、广东鼎湖山南亚热带常绿阔叶林9.06 t/(hm²·a)相仿^[16]。施肥处理在一定程度上改变了凋落物的组成比例,HN+P使得落果在凋落物中所占比例提高了近4%,虽然凋落物量有所提高,但不同处理间并没有显著性差异,这可能与植物本身的机理有关,树木养分是处于一个相对平衡的动态中,短期的N沉降处理可能不会对植物新鲜器官生产量产生十分显著的影响,且施肥对森林生产力的初期影响有限^[17]。Kozovits等^[18]在巴西萨瓦拉热带森林进行的相关研究表明,N沉降处理对森林凋落物量的影响具滞后现象。因此要想探明这一机理,需要长期监测。

对凋落物组分进行差异性分析显示:CK与LN处理之间年落叶量差异显著($p=0.023$);CK与HN+P两处理间花屑量差异极端接近显著水平 $p=0.054$ 。这可能与植物不同器官对N,P的需求量不同所致。通常,植物吸收的氮绝大多数被分配到同化和吸收器官中,其他器官中的氮含量相对较低。一般来说,硝酸盐的吸收与根系密度、根系生长量以及根系形态密切相关^[19],¹⁵N标记研究证明,生长在沙地并施肥后的巴伦西亚橙树体内的氮,有49.7%和19.2%分别被分配于叶片和根系中,枝条和树干、花、果中的氮含量分别占总量的14.3%,10.6%和6.1%^[20]。温带地区开展的研究表明,N饱和早期阶段,随着N输入量的增加,叶片和细根中N的有效性增加,从而提高了森林生产力。Zottl等^[21]和樊后保等^[22]发现N施肥处理5a后,4个物种叶片N浓度平均增加25%,由于光合能力和叶片N含量存在显著的相关关系,所以N的增加将直接促进林木生长和生产力的提高,这可能是导致显著差异的原因。

甜槠林不同处理凋落物量在年周期中均呈现双峰型曲线,峰值出现在4和11月。相关研究发现春季凋落高峰主要是由气温回升、降雨量增加,常绿树种进入换叶期导致^[16]。春季凋落高峰期,其凋落量有随施肥量的增加而增大的趋势,表明氮肥的增加促进了林分生长,提高了生产力。秋季11月凋落高峰主要是由于气温下降和叶片衰老导致^[16],本试验中除上述原因外,还有大量落果导致秋季的高峰(11月落果占该月总量的44.8%~68.9%)。

3.2 凋落物的养分归还量

试验表明:不同梯度的N添加在一定程度上会改变其他养分的吸收量及归还量。3种处理,凋落物的6种元素(C,N,P,K,Ca,Mg)的养分总归还量除K外均出现以下规律HN+P>LN>HN>CK。CK与HN+P两处理间凋落物N,P归还量差异均达到了显著水平。不同梯度的氮添加均提高了养分归还量,但HN处理相对于LN处理,其养分归还量有明显的减少趋势,可磷添加很大程度上扭转了这一趋势。这可能是高氮使得土壤中N处于饱和状态。生态系统对氮添加存在饱和现象,过量的氮输入,不仅造成环境问题,而且还会引起森林衰退和森林生产力下降^[23],磷添加可以减缓氮饱和的负面影响,提高森林生产力^[24]。

落叶养分归还量的季节动态趋势同凋落物总量变化模式极为接近,具有明显的双峰型,落枝养分归还量主要集中在秋冬季,没有相对明显的峰值,这是由于落枝量动态较为复杂,与气象条件特别是降雨、雨季末期强风干扰以及冬季积雪有关^[25]。

综上所述,不同梯度氮磷添加在一定程度上提高了常绿阔叶林凋落物量及其养分归还量,由于森林生态系统对氮沉降存在饱和现象,过量的氮输入,不仅造成环境问题,而且还会引起森林衰退和森林生产力下降。磷添加可在一定程度上减缓氮饱和的负面影响,提高森林生产力。氮沉降对森林生态系统的影响是一个长期过程,要想深入了解氮沉降对亚热带常绿阔叶林凋落物的影响还需要进行长期的监测。

[参 考 文 献]

- [1] Galloway J N, Dentener F J, Capone D G, et al. Nitrogen cycles: past, present, and future[J]. *Biogeochemistry*, 2004,70(2):153-226.
- [2] Holland E A, Dentener F J, Braswell B H, et al. Contemporary and pre-industrial global reactive nitrogen budgets[M]// *New Perspectives on Nitrogen Cycling in the Temperate and Tropical Americas*. Springer Nether-

- lands, 1999:7-43.
- [3] Hall S J, Matson P A. Nutrient status of tropical rain forests influences soil N dynamics after N additions[J]. Ecological Monographs, 2003,73(1):107-129.
- [4] Binkley D, Son Y, Valentine D W. Do forests receive occult inputs of nitrogen? [J]. Ecosystems, 2000, 3(4):321-331.
- [5] Lovett G M, Reiners W A, Olson R K. Cloud droplet deposition in subalpine balsam fir forests: hydrological and chemical inputs [J]. Science, 1982, 218(4579): 1303-1304.
- [6] Kazda M. Indications of unbalanced nitrogen nutrition of Norway spruce stands[J]. Plant and Soil, 1990,128(1):97-101.
- [7] 樊后保,刘文飞,杨跃霖.杉木人工林凋落物分解对模拟氮沉降增加的响应[J].北京林业大学学报,2008,20(2):8-13.
- [8] Miller H G, Cooper J M, Miller J D, et al. Nutrient cycles in pine and their adaptation to poor soils[J]. Canadian Journal of Forest Research, 1979,9(1):19-26..
- [9] 吴承祯,洪伟,姜志林.我国森林凋落物研究进展[J].江西农业大学学报,2000,22(3):405-410.
- [10] Likens G E, Bromann F H. Biogeochemistry of a Forested Ecosystem [M]. Berlin, New York: Springer,1977
- [11] 樊后保,刘文飞,徐雷,等.氮沉降下杉木人工林(*Cunninghamia lanceolata*)凋落叶分解过程中C,N元素动态变化[J].生态学报,2008,28(6):2546-2553.
- [12] Nadelhoffer K J, Downs M R, Fry B. Sinks for¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation[J]. Ecological Applications, 1999,9(1):72-86.
- [13] 樊后保,刘文飞,裘秀群,等.杉木人工林凋落物量对氮沉降增加的初期响应[J].生态学杂志,2007,26(9): 1335-1338.
- [14] 张贇齐,王陆军,丁正亮,等.安徽老山亚热带常绿阔叶林降雨中氮和可溶性有机碳的动态变化[J].水土保持学报,2010,24(2):146-164.
- [15] 王陆军,张贇齐.安徽肖坑亚热带常绿阔叶林4优势树种叶养分动态及其利用效率[J].东北林业大学学报, 2010,38(7):10-12.
- [16] 官丽莉,周国逸,张德强,等.鼎湖山亚热带常绿阔叶林凋落物量 20a 动态研究[J].植物生态学报,2004,28(4):445-456.
- [17] 王文君,杨万勤,谭波,等.四川盆地亚热带常绿阔叶林土壤动物对几种典型凋落物分解的影响[J].生态环境学报,2013,22(9):1488-1495.
- [18] Kozovits A R, Bustamante M M C, Garofalo C R, et al. Nutrient resorption and patterns of litter production and decomposition in a Neotropical Savanna[J]. Functional Ecology, 2007,21(6):1034-1043.
- [19] Lambers H, Szaniawski R K, Visser R. Respiration for growth, maintenance and ion uptake. An evaluation of concepts, methods, values and their significance [J]. Physiologia Plantarum, 1983,58(4):556-563.
- [20] Mattos D, Graetz D A, Alva A K. Biomass distribution and nitrogen-15 partitioning in citrus trees on a sandy entisol[J]. Soil Science Society of America Journal, 2003,67(2):555-563.
- [21] Zöttl H W. Remarks on the effects of nitrogen deposition to forest ecosystems[J]. Plant and Soil, 1990,128(1):83-89.
- [22] 樊后保,黄玉梓,裘秀群,等.模拟氮沉降对杉木人工林凋落物氮素含量及归还量的影响[J].江西农业大学学报,2007,29(1):43-47.
- [23] Emmett B A. Nitrogen saturation of terrestrial ecosystems: Some recent findings and their implications for our conceptual framework[J]. Water, Air, & Soil Pollution: Focus, 2007, 7(1/3):99-109.
- [24] Solberg S, Dobbertin M, Reinds G J, et al. Analyses of the impact of changes in atmospheric deposition and climate on forest growth in European monitoring plots: A stand growth approach [J]. Forest Ecology and Management, 2009,258(8):1735-1750.
- [25] Xu X, Hirata E, Shibata H. Effect of typhoon disturbance on fine litterfall and related nutrient input in a subtropical forest on Okinawa Island, Japan[J]. Basic and Applied Ecology, 2004,5(3):271-282.