

杉木人工林凋落物量动态对氮沉降增加的响应*

刘文飞¹, 樊后保¹, 袁颖红¹, 沈芳芳^{1,2}, 黄荣珍¹, 李燕燕¹, 廖迎春¹

(1. 南昌工程学院生态与环境科学研究所, 江西 南昌 330099;
2. 江西农业大学园林与艺术学院, 江西 南昌 330045)

摘要: 通过野外模拟试验, 研究了杉木人工林凋落物量对氮沉降增加的响应。试验设计为4种处理(N0, N1, N2, N3), 增加氮量分别为0、60、120和240 kg·hm⁻²·a⁻¹。通过3 a监测发现, 2005年各处理的年凋落量分别是2 427.50、2 238.10、2 286.66和2 599.50 kg·hm⁻², 2006年凋落量分别是1 008.83、1 164.10、1 147.30和976.47 kg·hm⁻², 2007年凋落量分别是1 557.85、1 445.60、1 595.85和1 555.85 kg·hm⁻²。从3 a的试验时间来看, 凋落物总量表现为先下降后上升, 高氮处理(N3)前期提高凋落物量的作用比较明显, 但随后逐渐表现为抑制作用; 中氮处理(N2)逐渐表现为增加凋落物量的作用, 低氮处理(N1)作用不明显。不同水平的氮沉降处理对凋落物各组分存在不同影响, N2处理对增加叶凋落物量有一定的促进作用, 但N1和N3处理表现为抑制作用; 氮沉降处理均表现出降低枝和皮凋落量的作用, 但对落果和碎屑物有显著的增加作用。

关键词: 氮沉降; 杉木人工林; 凋落物

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 0529-6579(2011)04-0106-08

Responses of Litterfall Production in Chinese Fir Plantation to Increased Nitrogen Deposition

LIU Wenfei¹, FAN Houbao¹, YUAN Yinghong¹, SHEN Fangfang^{1,2},
HUANG Rongzhen¹, LI Yanyan¹, LIAO Yingchun¹

(1. Research Institute of Ecology & Environmental Sciences,
Nanchang Institute of Technology, Nanchang 330029, China;

2. College of Landscape and Art, Jiangxi Agricultural University, Nanchang 330045, China)

Abstract: A field simulated experiment was conducted in a Chinese fir plantation to study the effects of nitrogen deposition on the litterfall production. Treatments were designed as N0 (0 kg·hm⁻²·a⁻¹), N1 (60 kg·hm⁻²·a⁻¹), N2 (120 kg·hm⁻²·a⁻¹) and N3 (240 kg·hm⁻²·a⁻¹). According to three years' collection, the annual litterfall production for the four treatments was estimated, respectively, at 2 427.50, 2 238.10, 2 286.66 and 2 599.50 kg·hm⁻² in the year 2005, 1 008.83, 1 164.10, 1 147.30 and 976.47 kg·hm⁻² in 2006, 1 557.85, 1 445.60, 1 595.85 and 1 555.85 kg·hm⁻² in 2007, suggesting that litterfall production firstly showed a decline then an increase. Compared with N0, N3 treatment increased the litterfall production significantly in 2005, but showed some inhibitive effects in the following years. N2 treatment promoted litterfall production after the first year, but N1 had no consistent effects. The various components of litterfall revealed different response to nitrogen deposition, with the annual flux for leaf-fall responding positively to N2 treatments but negatively to N1 and N3. The treatments decreased the litterfall amount for braches and barks but increased the fractions of fruits and mis-

* 收稿日期: 2010-11-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(30370259, 30771714, 31060609); 江西省教育厅青年科学基金资助项目(GJJ11251)

作者简介: 刘文飞(1979年生), 男, 讲师; 通讯作者: 樊后保; E-mail: hbfan@nit.edu.cn

cellanous materials.

Key words: nitrogen deposition; Chinese fir plantation; litterfall

氮沉降作为全球变化热点研究内容之一,研究成果主要集中在大气氮沉降对森林生态系统的负面影响方面^[1-4]。当前,由于氮输入的增加,对森林生态系统的碳平衡产生了巨大的影响^[5-6]。有大量研究表明,氮沉降对生产力有明显的促进作用,从而有利于提高森林生态系统碳积累量,但是也有学者认为氮输入对生态系统碳储存没有明显的作用^[7-8],因此需更多的试验论证。

森林是陆地生态系统的主体,也是最重要的碳库,而森林凋落物是森林生态系统碳库主要的组成部分,对于维持全球碳平衡有非常重要的作用^[9]。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^[10]。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比较多^[11-12],对凋落物量影响的报道较少^[13]。因此,本文选择亚热带地区有代表性的杉木 *Cunninghamia lanceolata* 人工林作为研究对象,探讨氮沉降增加条件下凋落物量的响应规律,以期为亚热带地区碳库和碳循环研究提供基础数据。

1 材料和方法

1.1 试验地概况与样地设置

试验地设在福建沙县官庄国有林场,位于东经117°43'29" E,北纬26°30'47" N,平均海拔200 m,土壤以山地红壤为主。气候属中亚热带季风型气候,年平均气温18.8℃,年平均降水量1628 mm,无霜期为271 d。

试验林为1992年营造的杉木人工林,选择本底值相似的杉木人工林建立12块样地,样地面积均为400 m²,林下植被以蕨 *Pteridium aquilinum* var. *latiusculum* 和五节芒 *Miscanthus floridulus* 等为主,盖度在3%~5%之间,2003年12月进行了本底值调查,详细结果见参考文献^[6]。

1.2 研究方法

1.2.1 模拟氮沉降方法 根据用氮量,把氮源(CO(NH₂)₂)溶于水,在每个月月初用背负喷雾器在样地内均匀喷洒。施氮量主要考虑到我国氮沉降分布存在很强的时空、地域差异,如江西鹰潭地区氮输入总量为82.8 kg·hm⁻²·a⁻¹^[14],福建漳州氮湿沉降量达到53 kg·hm⁻²·a⁻¹^[15],而在福建南平地区湿沉降量仅为11.4~18.1 kg·hm⁻²·a⁻¹^[16],黑

龙江帽儿山森林定位站降水氮沉降为12.9 kg·hm⁻²·a⁻¹^[17]。随着近几年经济的发展,氮沉降量呈迅速上升趋势,因此设计梯度较大的氮沉降水平能更好地反映和预测我国氮沉降分布情况和对生态系统的影响。

1.2.2 凋落物收集方法 在样地内随机设置10个1 m×1 m的凋落物收集框,每月底收集落在收集器上的凋落物,区分落叶、落枝、树皮、繁殖器官(花、果、种子等)及其碎屑物(包括昆虫残体及鸟类粪便等)等组分,在60℃恒温条件下烘干48 h后称质量。

1.2.3 数据处理 采用DPS软件进行单因素方差分析,以LSD多重检验法检验凋落物量在不同处理间的差异显著性,作图采用Excel软件。

2 结果与分析

2.1 氮沉降对凋落物量及组成的影响

由表1可知,2005年各处理的凋落量分别为2427.50, 2238.10, 2286.66和2599.50 kg·hm⁻², N3处理促进了凋落量的增加,而低氮(N1)和中氮(N2)则表现出抑制的作用,但是各处理差异没有达到显著水平。凋落物的组成中,落叶占总凋落量的绝大部分(70.49%~73.67%),接下来为落枝(19.38%~20.39%)、碎屑(4.98%~7.70%)、落果(1.11%~2.16%)和落皮(0.29%~0.33%)。

2006年,各处理年凋落量分别是1008.83, 1164.10, 1147.30和976.47 kg·hm⁻²,与对照N0相比,低氮(N1)和中氮(N2)处理增加了凋落量,高氮(N3)处理减少了凋落量, N3与N1、N2处理差异显著($P < 0.05$)。各凋落物组分所占总凋落物比例大小分别为落叶(60.52%~65.26%)、落枝(13.84%~16.47%)、碎屑(4.98%~7.70%)、落果(6.98%~10.22%)和落皮(0.75%~1.30%)。

2007年,各处理年凋落量分别是1557.85、1445.60、1595.85和1555.85 kg·hm⁻²,中氮(N2)处理表现出促进作用,低氮(N1)和高氮(N3)表现出一定的抑制作用, N1和其余处理间差异达到显著水平。凋落物组成中,落叶占总凋落量的55.01%~60.98%,其次分别为落枝(17.30%~19.41%)、碎屑物(10.54%~15.72%)、落果(6.91%~9.10%)和树皮(1.53%~1.86%)。

从3 a的试验时间来看,各处理凋落物量的年

平均值分别为 1 664.73、1 615.96、1 676.60 和 1 710.61 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ，凋落物总量表现为先下降后上升，N3 处理在试验初期表现为增加凋落物量的作用，但随着时间的进行，表现为降低凋落物量的作用，N2 处理逐渐表现为增加凋落物量的作用，N1

处理作用不明显。凋落物各组分中，各处理落叶所占凋落物比例逐年下降，落皮、碎屑逐渐上升，落枝先下降后上升，落果先上升后下降。各氮处理凋落物各组分和对照凋落物各组分表现出的节律一致，这说明氮沉降并未改变杉木自身代谢机制。

表 1 氮沉降对杉木人工林凋落物的组成及百分比的影响

Table 1 Effects of increased nitrogen deposition on litter components and its percentage in Chinese fir

 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

年份	处理	叶	枝	果	皮	碎屑物	总计
2005	N0	1 788.07 ± 246.19 (73.67 ± 3.55)	484.30 ± 77.94 (19.95 ± 1.22)	26.87 ± 6.05 (1.11 ± 0.55)	7.47 ± 1.54 (0.31 ± 0.05)	120.80 ± 15.22 (4.98 ± 0.88)	2 427.51 ± 247.28
	N1	1 577.70 ± 217.87 (70.49 ± 3.78)	434.30 ± 93.72 (19.40 ± 2.01)	46.57 ± 5.23 (2.08 ± 1.05)	7.30 ± 1.06 (0.33 ± 0.04)	172.23 ± 36.54 (7.70 ± 0.96)	2 238.10 ± 220.55
	N2	1 675.83 ± 234.59 (73.29 ± 2.55)	443.43 ± 100.18 (19.39 ± 1.87)	33.77 ± 4.58 (1.48 ± 0.89)	7.30 ± 2.07 (0.32 ± 0.06)	126.33 ± 21.75 (5.52 ± 0.95)	2 286.66 ± 244.36
	N3	1 853.67 ± 305.16 (71.31 ± 3.12)	530.03 ± 98.03 (20.39 ± 1.57)	56.07 ± 7.21 (2.16 ± 1.21)	7.40 ± 1.39 (0.28 ± 0.08)	152.33 ± 25.14 (5.86 ± 0.89)	2 599.50 ± 295.14
2006	N0	658.35 ± 159.41 (65.26 ± 3.98)	162.65 ± 52.70 (16.12 ± 0.84)	74.30 ± 6.99 (7.37 ± 1.36)	13.07 ± 2.05 (1.30 ± 0.11)	100.47 ± 23.96 (9.96 ± 1.03)	1 008.83 ± 172.28
	N1	722.80 ± 148.28 (62.09 ± 3.45)	172.37 ± 70.99 (14.81 ± 1.01)	100.65 ± 9.58 (8.65 ± 0.99)	13.18 ± 2.47 (1.13 ± 0.99)	155.10 ± 30.48 (13.32 ± 1.11)	1 164.10 ± 155.47
	N2	739.22 ± 155.16 (64.43 ± 2.85)	160.98 ± 59.91 (14.03 ± 0.87)	80.08 ± 7.15 (6.98 ± 0.85)	8.58 ± 1.48 (0.75 ± 0.07)	158.43 ± 38.17 (13.81 ± 0.99)	1 147.30 ± 150.36
	N3	590.93 ± 132.01 (60.52 ± 1.79)	116.22 ± 34.10 (16.47 ± 1.12)	99.78 ± 6.87 (10.22 ± 1.08)	8.73 ± 1.98 (0.89 ± 0.09)	160.80 ± 33.25 (11.90 ± 0.89)	976.47 ± 139.48
2007	N0	949.98 ± 114.65 (60.98 ± 1.58)	302.35 ± 60.88 (19.41 ± 2.03)	107.69 ± 8.93 (6.91 ± 0.79)	28.94 ± 2.69 (1.86 ± 0.34)	168.90 ± 22.01 (10.84 ± 1.05)	1 557.85 ± 107.25
	N1	812.13 ± 130.12 (56.19 ± 2.01)	271.86 ± 90.85 (18.81 ± 1.14)	109.37 ± 12.25 (7.57 ± 0.63)	24.86 ± 3.58 (1.72 ± 0.78)	227.20 ± 23.69 (15.72 ± 1.25)	1 445.60 ± 122.36
	N2	877.83 ± 137.27 (55.01 ± 3.65)	276.03 ± 78.52 (17.30 ± 2.50)	124.23 ± 9.56 (9.10 ± 0.97)	27.29 ± 4.78 (1.71 ± 0.55)	205.78 ± 21.48 (13.23 ± 1.28)	1 595.85 ± 136.45
	N3	895.48 ± 124.78 (57.56 ± 0.99)	289.49 ± 55.72 (18.61 ± 1.23)	141.23 ± 15.81 (9.08 ± 0.88)	23.86 ± 4.05 (1.53 ± 0.47)	205.78 ± 37.26 (13.23 ± 1.54)	1 555.85 ± 112.14

注：数据为平均值 ± 标准差 ($n=3$)，括号数据为凋落物组分所占百分比

Results were shown with mean value ± S. D; The values in the brackets are percentage of litter composition

2.2 凋落物量的季节动态

图 1 显示，杉木人工林凋落物有大小年现象，总体呈明显的波动性。2005 年，月凋落量动态呈三峰型，N0、N2 和 N3 处理凋落量的极值出现在 2 月，而 N1 的凋落物量在 7 月达到最高。2006 年，在 1 年中的 4 月和 6 月出现 2 个明显的峰型，各处理凋落物量的最大值出现在 4 月。2007 年，各处理月凋落季节动态呈不规则型，N0、N1、N3 均在 2 月份凋落物量达到最大，而 N2 的凋落物量的最大值出现在 11 月。

为了更直观地表现出 3 a 不同氮沉降水平对凋落物量的影响，将 3 a 内各处理月凋落物量取平均值可以得到图 2。N0、N1 处理在 2 月、4 月和 7 月

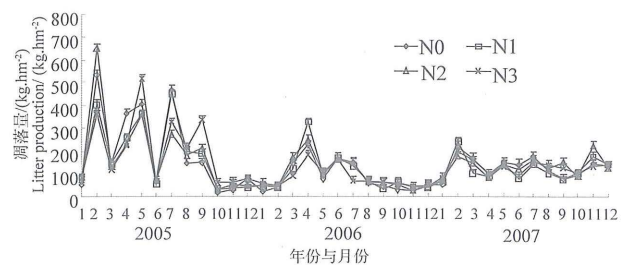


图 1 各处理凋落物量动态变化

Fig. 1 Annual dynamic in litter production of different nitrogen treatments

出现 3 个明显的峰值，最大值均出现在 7 月，分别占了年平均凋落物量的 16.06% 和 15.48%；N2 和 N3 处理在 2 月、5 月和 7 月出现 3 个明显的峰值，

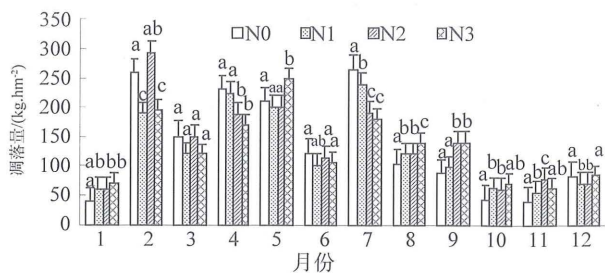


图 2 氮沉降对凋落物量月动态变化的影响 (2005 - 2007 月平均值)

Fig. 2 Effects of increased nitrogen deposition on average monthly dynamic of the litter fall

图中字母如不相同, 表明各处理差异显著 ($P < 0.05$, LSD法)。Values with the various letter are significantly different according to LSD's multiple range test ($p < 0.05$)

N2 处理的最大值出现在 2 月 (占年平均凋落物总量的 17.50%), N3 处理的最大值出现在 5 月 (占年平均凋落物总量的 15.58%)。

2.3 凋落物各组分动态变化

由图 3 可知, 落叶和落枝的月动态变化特征和凋落总量的变化趋势比较吻合, 说明叶和枝凋落物在一定程度上主导杉木人工林的凋落总量, 落皮、落果和碎屑物变化比较复杂, 总体规律如下:

2005 年, 落皮凋落量的极值均出现在 9 月份; N0 处理落果极值出现在 8 月份, N1、N2 处理出现在 2 月份, N3 处理出现在 7 月份; N0 和 N2 处理碎屑极值出现在 5 月份, N1 处理极值出现在 4 月份, N3 处理极值出现在 9 月份。

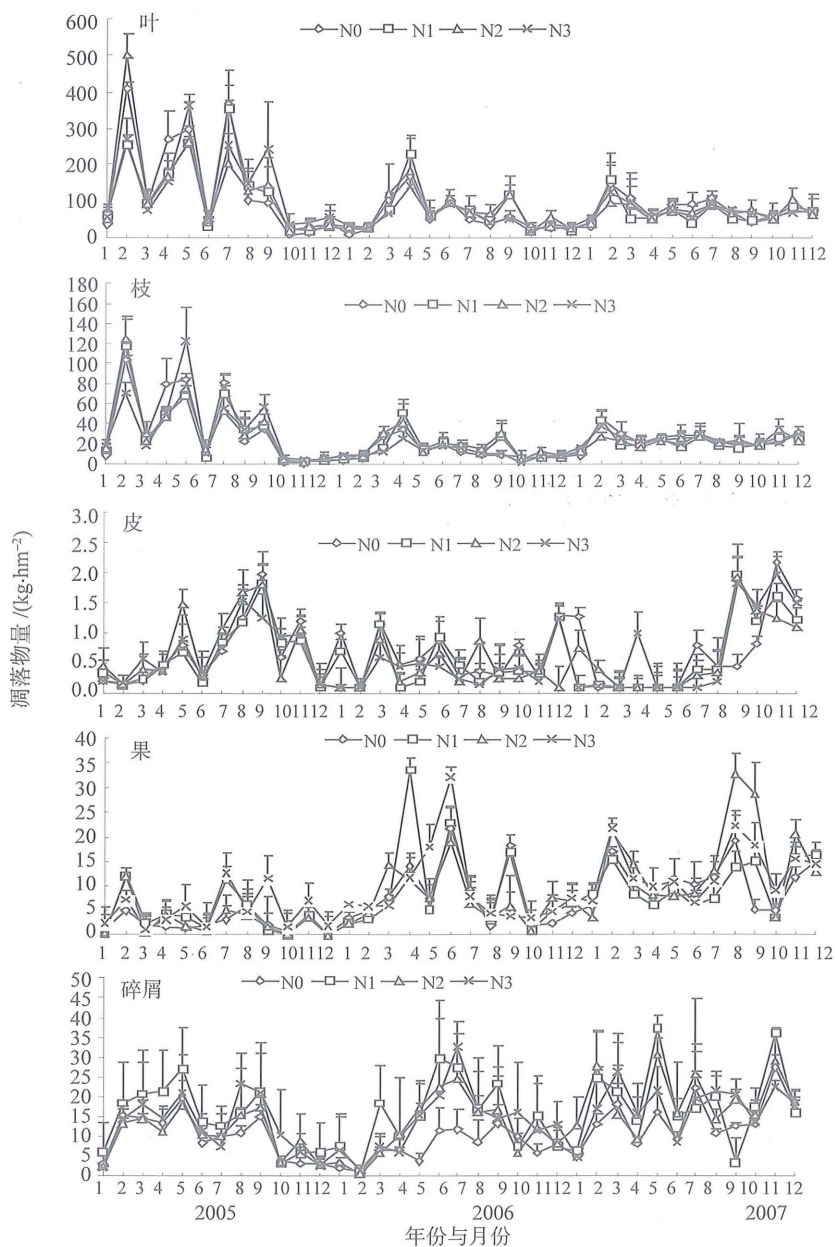


图 3 氮沉降对凋落物各组分的动态变化的影响

Fig. 3 Effects of increased nitrogen deposition on annual dynamic in component of litter fall

2006年, N0、N1和N3处理落皮凋落量的极值出现在12月, N2处理出现在3月份; N0处理落果的极值出现在9月份, N1处理极值出现在4月份, N2和N3处理极值出现在6月份; 除N0处理碎屑极值出现在9月份外, 其余处理极值均出现在7月份。

2007年, N0、N3处理落皮凋落量的极值出现在11月份, N1、N2处理的极值出现在9月份; N0处理落果凋落量的极值出现在2月份, N1处理极值出现在12月份, N2、N3处理的极值出现在8月份; N0、N1处理碎屑凋落量的极值出现在11月份, N2处理极值出现在5月份, N3处理极值出现在3月份。

为了更好地说明凋落物各组分在1a中的变化情况, 将3a里各月份数据取平均值得到图4。各处理落叶的年平均总量分别为1143.41、1071.91、1144.51和1101.07 kg·hm⁻², 说明N2处理对增加叶凋落物有一定的促进作用, 但N1和N3处理表现为抑制作用。由图4可知, N0叶凋落量的最大值出现在2月份, 为194.49 kg·hm⁻²; N1处理叶凋落量的最大值出现在7月份, 达到173.37 kg·hm⁻²; N2处理叶凋落量的最大值出现在2月份, 达到209.11 kg·hm⁻²; N3处理叶凋落量的最大值出现在5月份, 达到164.74 kg·hm⁻²。

各处理落枝的年平均总量分别为309.88、298.66、307.90和295.05 kg·hm⁻², N1、N2和N3处理均表现为抑制落枝凋落的作用, 各处理差异没有达到显著水平。N0、N1、和N2处理落枝的极值均出现在2月份, 分别为52.95、55.84和53.37 kg·hm⁻², N3处理落枝的极值出现在5月份, 达到53.49 kg·hm⁻²。

落皮的年平均总量分别为7.78、7.09、7.06和7.11 kg·hm⁻², 各氮处理均表现出抑制落皮凋落的作用, N0和N1、N2和N3处理差异达到显著水平($P < 0.05$)。除N0处理落皮的极值(1.21 kg·hm⁻²)出现在11月份外, 各水平的氮处理极值均出现在9月份, 分别为1.39、1.33和1.16 kg·hm⁻²。

落果的年平均总量分别为83.53、94.99、99.52和110.35 kg·hm⁻², 相对N0处理, 各氮沉降水平对增加落果凋落的作用显著($P < 0.05$)。N0和N3处理落果的极值出现在6月份, 为11.25和13.48 kg·hm⁻²; N1和N2处理极值分别出现在4月份和8月份, 其值分别为14.75和13.52 kg·hm⁻²。

碎屑物的年均均总量分别为127.90、194.10、168.72和175.39 kg·hm⁻², 各氮沉降水平对增加

碎屑凋落的作用显著($P < 0.05$)。N1和N2处理碎屑的极值出现在5月份, 为26.52和22.00 kg·hm⁻²; N0和N3处理碎屑的极值分别出现在7月份和8月份, 其值分别为14.65和20.61 kg·hm⁻²。

综合3a各凋落物组分的月变化动态来看, 落皮和落果两种组分的月变幅较大, 碎屑物表现的最为稳定, 对于占凋落物总量主要部分的落叶和落枝, 相对N0处理, N2处理的变幅较小, 也在一定程度上说明经N2处理对杉木人工林的生长有一定的调节作用。

3 小结与讨论

本研究通过3a的定位监测发现, 高氮处理(N3)在试验初期表现为增加凋落物量的作用, 但随着时间的进行, 表现出抑制作用, 中氮处理(N2)增加凋落物量的作用逐渐显著, 低氮处理(N1)没有表现出明显的增加或抑制作用。从不同时间凋落物量对氮沉降响应所表现出的差异来看, 生态系统对于氮的输入有一饱和点^[18], 在未达到饱和点前, 氮输入有利提高土壤有效氮的可得性, 从而促进林木生产力^[6], 但如果超过饱和点, 则会产生不利影响。根据课题组生物量调查数据, 经N1、N2处理, 有利于林木生产力的提高, N3处理则表现为抑制林分生产力的作用。从目前本项目所得结果来看, 中氮处理N2(120 kg·hm⁻²·a⁻¹)似乎是杉木人工林的N饱和的临界点, 但需更长时间的验证。本研究还发现, 杉木人工林凋落物量有类似农作物的“大小年”现象, 这和鼎湖山常绿阔叶林凋落物的研究结果相似^[19], 这可能是森林维持稳定生产力的一种调节机制^[20]。

本研究发现, 不同水平的氮沉降处理对凋落物各组分有不同的影响。N2处理对增加叶凋落物有一定的促进作用, 但N1和N3处理表现为抑制作用。氮沉降处理均表现出降低枝和皮凋落的作用, 但对落果和碎屑物有显著的增加作用。李德军等^[21]研究了模拟氮沉降对南亚热带两种乔木幼苗生物量及其分配的影响, 试验共分5种水平的氮沉降处理, 分别为0、50、100、150和300 kg·hm⁻²·a⁻¹。该研究得出, 150 kg·hm⁻²·a⁻¹的叶质量比最高, 明显提高了叶的生物量, 但300 kg·hm⁻²·a⁻¹的叶质量比最低, 不利用幼苗叶片的生长。该研究成果与本研究有类似之处, N2处理(120 kg·hm⁻²·a⁻¹)促进了杉木叶片的生长, 从而其凋落量也相对会增加, 而N3处理(240 kg·hm⁻²·a⁻¹)不利于叶片的生长, 其叶凋落量也会相应降低。该研究得出,

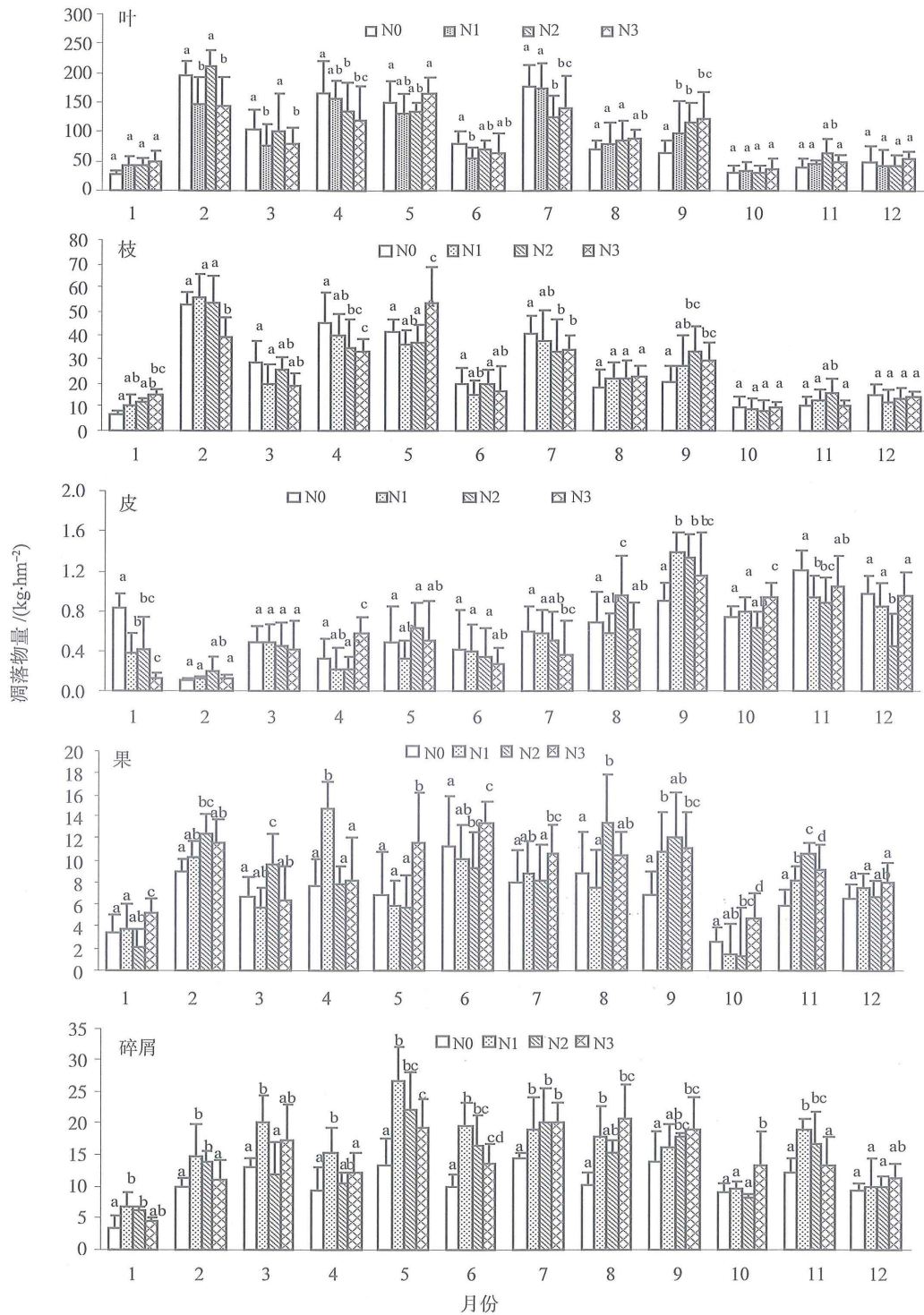


图 4 氮沉降对凋落物各组分月动态变化的影响 (2005 - 2007 平均值)

Fig. 4 Effects of increased nitrogen deposition on average monthly dynamic of the litteral component

氮沉降处理能提高枝重比, 300 kg·hm⁻²·a⁻¹的叶质量比最高, 这和本研究结果有所不同, 可能的原因是, 不同树种对氮沉降响应的机制也会有所差异。

本研究得出, N0、N1、N2 和 N3 处理凋落物的年平均值分别为 1 664. 73、1 615. 96、1 676. 60 和 1 710. 6 1 kg·hm⁻², 和本试验林林龄相当的位

于湖南会同的 14 ~ 16 年生杉木人工林凋落物量为 1 168. 65 ~ 1 241. 93 kg·hm⁻²[22], 福建三明 27 年生杉木人工林凋落物为 5 666 kg·hm⁻²[23], 福建建瓯杉木人工林凋落物量为 4 630 kg·hm⁻²[24]。大量研究表明, 凋落物量与纬度、海拔、气温、降水量、土壤等密切相关[25-29], 对森林凋落量与气温、降

水量、及生长季长度等气候因子间的关系研究表明,影响森林凋落量的主导气候因子是年平均温度^[30]。本试验地年平均气温为 18.8 °C,高于湖南会同的 16.8 °C,凋落物量也相于高于该地区杉木林,略低于福建建瓯和福建三明的 19.4 °C 和 19.1 °C,凋落物量相对也更低,在热带森林当中,温度的降低也会使凋落物量减少^[31-32]。由此可见,年平均温度变化对于凋落物的产量有非常显著的影响。

林波^[33]认为,森林月凋落量,具有明显的季节变化规律,其季节动态模式可以是单峰型,双峰型或不规则类型,而大多数常绿森林,其月凋落量的季节动态模式呈双峰型^[33]。从本试验来看,各处理凋落物表现出明显的季节变化规律,2005 年季节动态模式呈三峰型,2006 年呈双峰型,2007 年则呈不规则型,不同年份凋落物的节律也有所不同。

参考文献:

- [1] NIHLGARD B. The ammonium hypothesis-an additional explanation to the forest dieback in Europe [J]. *Ambio*, 1985, 14: 2-8.
- [2] STEVENS C J, DUPRÈ C, Dorland E, et al. Nitrogen deposition threatens species richness of grasslands across Europe [J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158: 2940-2945.
- [3] HÖGBERG P, Fan H B, QUIST M, et al. Tree growth and soil acidification in response to 30 years of experimental nitrogen loading on boreal forest [J]. *Global Change Biology*, 2006, 12: 489-499.
- [4] 涂利华,胡庭兴,张健,等.模拟氮沉降对华西雨屏区苦竹林细根特性和土壤呼吸的影响[J].*应用生态学报*,2010,21(10):2472-2478.
- [5] MACK M C, SCHUUR E A C, BRET-HARTE M S, et al. Ecosystem carbon storage in arctic tundra reduced by long-term nutrient fertilization [J]. *Nature*, 2004, 431: 440-443.
- [6] 樊后保,刘文飞,李燕燕,等.亚热带杉木(*Cunninghamia lanceolata*)人工林生长与土壤养分对氮沉降的响应[J].*生态学报*,2007,27(11):4630-4641.
- [7] VEJRE H, CALLESEN I, VESTERDAL L, et al. Carbon and nitrogen in Danish forest soils-Contents and distribution determined by soil order [J]. *Soil science society of America Journal*, 2003, 67: 335-343.
- [8] KORNER C. Biosphere responses to CO₂ enrichment [J]. *Ecology Application*, 2000, 10: 1590-1619.
- [9] AERTS R. The freezer defrosting: global warming and litter decomposition rates in cold biomes [J]. *Journal of Ecology*, 2006, 94: 713-724.
- [10] FANG H, Mo J M. Effect of nitrogen deposition on forest litter decomposition [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26 (9): 3127-3136
- [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] MICKS P, DOWNS M R, MAGILL A H. Decomposition litter as a sink for ¹⁵N-enriched additions to an oak forest and a red pine plantation [J]. *Forest Ecosystem and Management*, 2004, 196: 71-87
- [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] 樊建凌,胡正义,庄舜尧,等.林地大气氮沉降的观测研究[J].*中国环境科学*,2007,27(1):7-9.
- [15] 肖健.漳州市氮湿沉降量异常的形成及危害[J].*能源与环境*,2005,2:59-61.
- [16] 樊后保,苏兵强,林德喜,等.杉木人工林生态系统的生物地球化学循环 II:氮素沉降动态[J].*应用与环境生物学报*,2000,6(2):133-137.
- [17] 刘世荣.兴安落叶松人工林生态系统营养元素生物地球化学循环特征[J].*生态学杂志*,1992,11:1-6.
- [18] ABER J D, McDOWELL W, NADELHOFFER K J, et al. Nitrogen saturation in Northern forest ecosystems Hypotheses revisited [J]. *Bioscience*, 1998, 48: 921-934.
- [19] 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 20 年动态研究[J].*植物生态学报*,2004,28(4):445-456.
- [20] 张佑倡,孔国辉,余清发,等.鼎湖山演替系列中代表性森林凋落物研究[J].*生态学报*,2000,6:938-944.
- [21] 李德军,莫江明,方运霆,等.模拟氮沉降对亚热带两种乔木幼苗生物量及分配的影响[J].*植物生态学报*,2005,29(4):543-549.
- [22] 方晰,田大伦,项文化,等.杉木人工林凋落物量及其分解过程中碳的释放率[J].*中南林学院学报*,2005,25(6):12-16.
- [23] 何宗明,陈光水,刘建斌,等.杉木林凋落物产量、分解率与储量的关系[J].*应用与环境生物学报*,2003,9(4):352-356.
- [24] 郭剑芬,陈光水,钱伟,等.万木林自然保护区 2 种天然林及杉木人工林凋落量及养分归还[J].*生态学报*,2006,26(12):4091-4098.
- [25] 程伯容,丁桂芳,许广山,等.长白山红松阔叶林的生物养分循环[J].*土壤学报*,1987,24(2):160-169.

- [2] 胡娅敏,宋丽莉,刘爱君,等. 近58年登陆我国热带气旋的气候特征分析[J]. 中山大学学报:自然科学版, 2008, 47(5): 115-121.
- [3] 陈敏,郑永光,陶祖钰. 近50年(1949-1996)西北太平洋热带气旋气候特征的再分析[J]. 热带气象学报, 1999, 15(1): 10-16.
- [4] 曹楚,彭加毅,余锦华. 全球气候变暖背景下登陆我国台风特征的分析[J]. 南京气象学院学报, 2006, 29(4): 455-461.
- [5] 杨绮薇,黄增明,林爱兰. 华南登陆台风频数的变化及其与 ENSO 事件的关系[J]. 气象, 2001, 27(3): 12-16.
- [6] 吴兴国. 五十年来影响广西的热带气旋统计特征分析[J]. 广西气象, 1998, 19(4): 28-31.
- [7] 张容焱,吴滨,宋德众. 影响福建热带气旋的若干基本气候特征[J]. 台湾海峡, 2000, 19(1): 65-69.
- [8] 高建芸,江志红,游立军,等. 百余年来影响福建热带气旋的变化特征[J]. 应用气象学报, 2007, 18(2): 211-218.
- [9] 龚龔,陆维松,陈东升. 浙江省登陆热带气旋气候特征初探[J]. 南京气象学院学报, 2003, 26(6): 773-779.
- [10] 俞燎霓,雷媛,曹美兰,等. 近58年来影响和登陆浙江的热带气旋统计特征分析[J]. 台湾海峡, 2007, 26(2): 213-219.
- [11] 贺海晏,简茂球,宋丽莉,等. 近50 a 广东登陆热带气旋的若干气候特征[J]. 气象科学, 2003, 23(4): 401-409.
- [12] CHAN J C L, SHI J E. Frequency of typhoon landfall over Guangdong province of china during the period 1470-1931[J]. Int J Cli, 2000, 20: 183-190.
- [13] 谢炯光,纪忠萍. 登陆广东省热带气旋的奇异谱分析[J]. 热带气象学报, 2003, 19(2): 163-168.
- [14] 刘春霞. 广东热带气旋年际变化的小波分析[J]. 热带气象学报, 2001, 17(4): 381-390.
- [15] 黄静. 影响广东的热带气旋与 ENSO 的关系[J]. 气象, 2006, 9(6): 55-59.
- [16] 胡娅敏,宋丽莉. 登陆中国热带气旋台风季参数的气候特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2009, 5(2): 90-94.
- [17] 王秀萍,梁军. 近52年北上热带气旋的若干气候特征[J]. 气象, 2006, 32(10): 76-80.
- [18] 杨玉华,应明,陈葆德. 近58年来登陆中国热带气旋气候变化特征[J]. 气象学报, 2009, 67(5): 689-696.
- [19] WU L G, WANG B. Assessing impacts of global warming on tropical cyclone tracks[J]. J Climate, 2004, 2004, 17: 1686-1698.

(上接第112页)

- [26] DRAY J R, GORHAM E. Litter production in forests of the world [J]. Advance in Ecological Research, 1964, 2: 101-157.
- [27] FYLES J W, FYLES I H. Interaction of Douglas-fir with red alder and salal foliage litter during decomposition [J]. Canadian Journal of Forest Research, 1993, 23: 358-361.
- [28] KIKUZAWA K, ASAI T, FUKUCHI M. Leaf-litter production in a plantation of *Alnus inokumae* [J]. Journal of Ecology, 1977, 72: 993-999.
- [29] REINERS W A, LANG G E. Changes in litterfall along a gradient in altitude [J]. Journal of Ecology, 1987, 75: 629-638.
- [30] VITOUSEK P M, TURNER D R, PARTON W J, et al. Litter decomposition on the Mauna Loa environmental matrix, Hawaii: patterns, mechanisms, and models [J]. Ecology, 1994, 75: 418-429.
- [31] RAICH J W, RUSSELL A E, VITOUSEK P M. Primary productivity and ecosystem development along an elevational gradient on Mauna Loa, Hawaii [J]. Ecology, 1997, 78: 707-721.
- [32] KITAYAMA K, AIBA S. Ecosystem structure and productivity of tropical rain forests along altitudinal gradients with contrasting soil phosphorus pools on Mount Kinabalu, Borneo [J]. Journal of Ecology, 2002, 90, 37-51.
- [33] 林波,刘庆,吴彦,等. 森林凋落物研究进展[J]. 生态学杂志, 2004, 23(1): 60-64.
- [34] 王凤友. 森林凋落量研究综述 [J]. 生态学进展, 1989, 6(2): 82-89.