

雷州半岛桉树人工林凋落物量和养分循环研究

许宇星^{1,2}, 王志超¹, 竹万宽¹, 杜阿朋^{1*}

(1. 国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站, 广东 湛江 524022; 2. 中南林业科技大学, 长沙 410004)

摘要: 为了解雷州半岛地区桉树人工林凋落物量和养分归还特征, 对不同林龄人工林凋落物量和养分动态连续 12 个月进行监测。结果表明, 桉树人工林的凋落物总量为 5 a>9 a>7 a, 5 a 生桉树人工林的凋落物总量显著高于 7 和 9 a 生林分, 且 7 和 9 a 生林分间没有显著差异。不同林龄桉树人工林凋落物总量具有明显的季节变化, 均呈双峰型, 峰值出现在雨季初期和末期。林分结构因子同凋落物量相关性不显著, 但气候因子中的月均温与凋落物量存在显著正相关关系。不同林龄桉树人工林的养分年循环量由凋落物量和凋落物养分含量共同决定, 氮、磷、钾元素的养分年归还总量为 9 a>7 a>5 a, 且彼此间达到显著差异。凋落物养分元素归还高峰期集中在雨季前后, 以冬季养分归还量较低。因此, 为增加桉树人工林产量且利于人工林地力恢复, 桉树人工林应适当增加种植年限, 且采伐季节选择在冬季。

关键词: 尾巨桉; 林龄; 凋落物; 养分归还量

doi: 10.11926/jtsb.3986

Litterfall and Nutrient Cycling of *Eucalyptus* Plantation with Different Ages on Leizhou Peninsula

XU Yu-xing^{1,2}, WANG Zhi-chao¹, ZHU Wan-kuan¹, DU A-peng^{1*}

(1. China Eucalypt Research Centre, Guangdong Zhanjiang Eucalyptus Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station, Zhanjiang 524022, Guangdong, China; 2. Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: In order to understand the changes in litterfall and nutrient cycling of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations with different ages on Leizhou Peninsula, the litterfall amount and nutrient return of *Eucalyptus* plantations with different ages were surveyed continued for 12 months. The results showed that the annual contents of litterfall of *Eucalyptus* plantations were in the order of 5 a>9 a>7 a, the total litterfall of 5 a plantation was significantly higher than that of 7 a and 9 a plantations, but there was no significant difference between later plantations. The litterfall contents of *Eucalyptus* plantations with different ages showed obvious seasonal changes with bimodal pattern, and the peak values appeared in the early or late rainy season. There was no significant correlation between forest structure factors and amount of litterfall, but there was a significant positive correlation between the monthly average temperature and litterfall amount. The annual nutrient flux of different forest ages was dominated by amount of litterfall and nutrient content. The annual nutrient flux of nitrogen, phosphorus and potassium in *Eucalyptus* plantations was in the order of 9 a>7 a>5 a, and there were significant differences among them. The peak period of nutrient restitution was concentrated around the rainy season, while the amount of nutrient restitution in winter was low. Therefore, in order to increase the yield of *Eucalyptus* plantation and

收稿日期: 2018-08-27 接受日期: 2018-12-04

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600505); 广西科技重大专项(桂科 AA17204087-9); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行项目(2019132141)资助

This work was supported by the National Key Research and Development Program in the 13th Five-Year (Grant No. 2016YFD0600505); the Guangxi Innovation Driven Development Special Fund Project (Grant No. AA17204087-9), and the Operation Project for Guangdong Zhanjiang *Eucalyptus* Forest Ecosystem National Positioning Observation and Research Station (Grant No. 2019132141).

作者简介: 许宇星(1987~), 男, 博士研究生, 助理研究员, 主要从事桉树可持续经营研究。E-mail: wsyx1987@163.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: dapzj@163.com

facilitate the recovery of plantation soil fertility, the planting years of *Eucalyptus* plantation should be increased and the cutting season should be in winter.

Key words: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*; Forest age; Litterfall; Nutrient restitution

森林凋落物被认为是树木生长的养分来源和潜在养分库, 其有机物和养分循环能力, 是评价森林生态系统功能的重要指标^[1]。林分凋落物分解供给土壤的养分占林分生长所需的绝大部分^[2], 同时林分凋落物是土壤微生物区系能量供应和土壤有机质的重要输入来源^[3], 并且凋落物减缓了林地土壤受到降雨的直接冲击, 有效防止土壤侵蚀^[4]。不同林分的凋落物量和养分归还量主要取决于树种、林龄、物候及气候等因素, 不同地区不同林分往往会产生很大差异^[5]。

桉树是中国华南地区重要的用材树种之一, 为缓解国家木材供需矛盾和协调森林经济利用与生态环境之间的矛盾做出重大贡献, 根据第八次全国森林资源清查结果显示中国桉树人工林面积超过 $4.45 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 顷, 但与其他速生人工林树种相同^[6-7], 桉树人工林地土壤肥力下降问题同样存在, 传统的掠夺式经营模式和近乎全树利用的采伐措施是地力退化的症结所在^[8-9]。目前, 我国桉树人工林采伐年龄多集中在 5 年以下, 因此国内桉树研究多集中于此类短轮伐期林分^[10-11], 对于超过 5 a 生的桉树林分研究较少, 且对桉树大径材林下调落物养分归还状况的研究缺乏, 忽略了增加培育年限并减少土壤人为干扰对土壤修复所产生的作用。本研究在中国桉树传统种植区雷州半岛选择目前种植面积较广的桉树人工林无性系尾巨桉 (*E.*

urophylla × *E. grandis*) 32-29 为对象, 通过对 5、7、9 a 生林分凋落物产量和养分浓度持续监测, 探讨凋落物产量和养分循环规律, 同时结合气象数据及林分结构, 分析影响不同林龄林分凋落物产量的因素, 为我国桉树人工林可持续经营和桉树大径材培育提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

试验林地位于广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站(21°30' N, 111°38' E)内, 最高海拔 220.8 m, 最低海拔 80 m, 为海洋性季风气候, 年均温 23.1℃, 极端最低温为 1.4℃, 极端最高温为 38.1℃, 年降雨量超过 1 500 mm, 土壤类型多为浅海沉积物砖红壤和玄武岩砖红壤, 其次为砂页岩红壤、花岗岩砖红壤, 有机质含量超过 1%, pH 4.5~5.3。土壤肥力属于中等, 符合桉树的生长条件^[12-13]。试验林分选择观测站内立地条件基本相同的 3 个林龄尾巨桉林分, 根据第八次全国森林资源清查结果, 3 个林龄分属幼龄林、中龄林、成熟林和成熟林, 初植密度相同(2 m × 3 m), 造林措施均为炼山+机械挖穴, 炼山后每穴添加 0.25 kg 专用基肥(N:P₂O₅:K₂O=7:12:6), 林分种植后 2 年在穴旁追施桉树专业肥 0.5 kg, 具体林分现状见表 1。

表 1 不同林龄人工林样地基本特征

Table 1 Basic situation of forest plantations with different ages

林龄 Age (a)	土壤类型 Soil type	密度 Density (ind. hm ⁻²)	海拔 (m) Altitude	坡度 (°) Slope	坡向 Aspect	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)
5	砖红壤 Laterite	950	88	0	-	12.73	14.76
7	砖红壤 Laterite	600	128	8	NE	19.97	19.04
9	砖红壤 Laterite	550	113	8	E	22.14	21.93

1.2 样品采集、测定和计算

在试验区内 3 个林龄桉树人工林林分中, 分别设置 20 m × 20 m 的标准样地 3 个, 每个样地 4 角及中心位置各设置 1 个 1 m × 1 m × 0.15 m 的凋落物收集器, 收集器底部固定尼龙网兜, 为防止凋落物分解, 每月中旬收集 1 次, 凋落物收集从 2017 年 5

月 17 日至 2018 年 5 月 17 日, 共计 13 个月。将收回的凋落物按照树叶、树枝、皮果杂物进行分类, 称鲜质量, 放入烘箱 65℃ 烘至恒重后称干质量, 并计算林分总凋落物量。对每月收集的样品用植物粉碎机研磨成粉, 进行养分含量的测定。植物全氮采用硫酸-双氧水消煮-蒸馏滴定法^[14], 全磷采用硫酸-

双氧水消煮-钒钼黄比色法^[15], 全钾采用硫酸-双氧水消煮-火焰原子吸收分光光度法测定^[15]。凋落物养分归还量用凋落物量乘以凋落物中养分含量计算得出。

1.3 数据分析

所有数据均以平均值±标准偏差表示, 并以林分年龄作为因子, 进行单因素方差分析, 同时分析了凋落物各组分产量同气象因子及林分结构因子的相关性。所有数据分析采用 SPSS 18.0 软件包处理, 采用 LSD 法进行显著性检验($P<0.05$), 并采用 Excel 软件进行绘图。

2 结果和分析

2.1 年凋落物总量和组成

由表 2 可知, 不同林龄人工林凋落物量有显著差异,

桉树人工林凋落物总量为 8 745.84~10 877.55 kg hm⁻², 5 a 生桉树林凋落物总量显著高于其余两个林龄, 而 7 和 9 a 生林分的凋落物总量未达显著差异。各林分凋落物不同组分产量也存在一定差异, 其中, 叶凋落物年产量为 4 253.5~5 206.4 kg hm⁻², 7 a 生林分显著低于 5、9 a 生, 5、9 a 生林分间未达显著差异; 5 a 生枝凋落物的年产量为 3 511.7 kg hm⁻², 显著高于 7、9 a 生的(2 312.66、2 397.06 kg hm⁻²), 且后两者没有显著差异; 皮果杂物凋落物的年产量为 1 949.45~2 179.7 kg hm⁻², 3 个林龄间均未达显著差异。

5、7、9 a 生林凋落物中叶和枝分别占凋落物总量的 47.86%、48.63%、53.76%和 32.28%、26.44%、25.5%。可见, 3 个林龄凋落物均以落叶为主, 3 个林分中, 随林龄增加凋落物叶的比例逐渐增加, 而凋落物枝的比例逐渐减少, 皮果杂物没有显著差异, 所占比例未表现出明显规律。

表 2 不同林龄桉树人工林的凋落物量

Table 2 Litterfall in *Eucalyptus* plantation with different ages

林龄 Age (a)	落叶 Leaf (kg hm ⁻² a ⁻¹)	%	落枝 Branch (kg hm ⁻² a ⁻¹)	%	皮果杂物 Bark and fruit (kg hm ⁻² a ⁻¹)	%	总量 Total (kg hm ⁻² a ⁻¹)	%
5	5 206.4 ±109.0a	47.86	3 511.70 ±231.0a	32.28	2 159.5 ±171.0a	19.85	10 877.55 ±373.6a	100
7	4 253.5 ±259.1b	48.63	2 312.66 ±183.8b	26.44	2 179.7 ±277.5a	24.92	8 745.84 ±505.0b	100
9	5 052.7 ±240.8a	53.76	2 397.06 ±223.0b	25.50	1 949.4 ±264.9a	20.74	9 399.14 ±457.3b	100

同列数据后不同字母表示差异显著($P<0.05$)。

Data followed different letters within column indicate significant differences at 0.05 level.

2.2 凋落物量的季节动态及其影响因素

从图 1 可见, 3 个林龄桉树人工林凋落物总量呈现明显的季节变化。各林龄林分的凋落物总量均为双峰型, 第 1 个峰值出现在 4 或 5 月(雨季初期), 此时各林龄凋落物量分别占总量的 12.82%、12.92% 和 12.98%; 第 2 个峰值出现在 9 或 10 月(雨季末期), 此时各林龄凋落物量分别占总凋落物量的 22.25%、23.98% 和 23.04%。

不同组分中, 各林龄叶凋落物产量呈现双峰型曲线, 且两个峰值时间与凋落物总量的基本一致, 证明凋落叶产量主导各林龄桉树人工林凋落物总量。枝凋落物产量没有明显季节变化, 皮果杂物凋落物主要集中在雨季的生长季节及 8-9 月的桉树结实期, 生长季节出现脱皮现象, 因此 4-10 月皮果杂物凋落物量占全年总凋落物量的 88.73%~92.82%。

对 3 个林分的结构因子、气象因子与凋落物量

进行相关性分析, 结果表明(表 3), 林分结构因子中的林龄、树高和胸径与凋落物量呈负相关, 仅落枝量同平均胸径有显著相关, 叶面积指数同凋落物量无显著相关性; 月均温同凋落物总量、落叶、皮果杂物量均呈极显著正相关, 而与落枝量无显著相关性, 可能是落枝多为前期死亡的枯枝, 其凋落与物候没有直接关系。月降雨量同落叶、落枝及总量均没有显著相关性, 而与皮果杂物呈极显著正相关, 可能与雨水增加对树皮的冲刷, 增大脱落机会, 同时桉树结实期(8-9 月)也处于雨季有关。

2.3 凋落物养分归还量

从表 4 可以看出, 不同林龄各组分养分元素的平均含量表现出不同变化规律。5 a 生林分落叶、落枝和皮果杂物的氮含量均显著低于 7、9 a 生林分, 7 和 9 a 生林分间没有显著差异; 5 a 生林分的

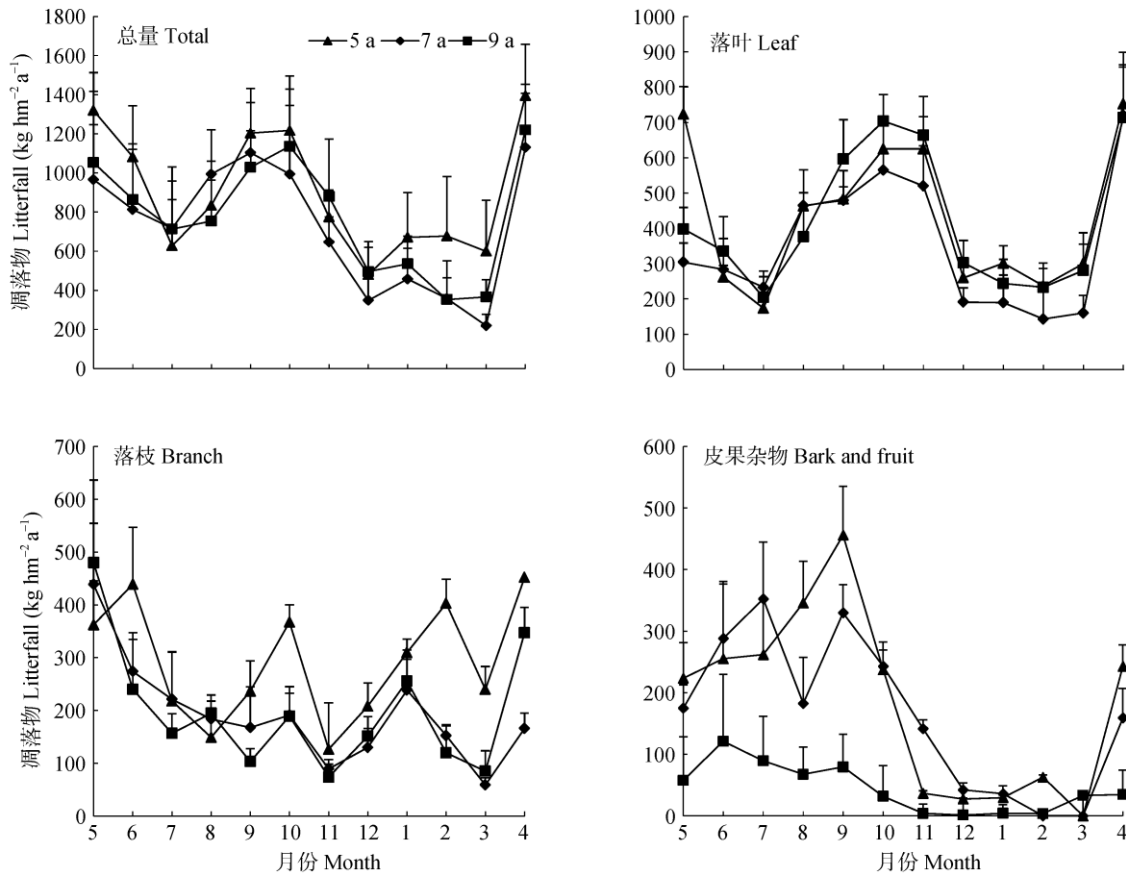


图 1 不同林龄凋落物量随月份变化特征

Fig. 1 Monthly changes in litterfall with different ages

表 3 林分结构因子和气象因子与凋落物量的相关性

Table 3 Correlation between forest structure factors, climate factors and litterfall

凋落物 Litterfall	林龄 Age	平均树高 Mean height	平均胸径 Mean diameter at breast	叶面积指数 Leaf area index	月均温 Monthly mean temperature	月降水量 Monthly precipitation
总量 Total	-0.062	-0.072	-0.087	0.123	0.657**	0.294
叶 Leaf	-0.034	-0.048	-0.071	-0.105	0.467**	0.046
枝 Branch	-0.302	-0.325	-0.355*	0.023	0.196	-0.103
皮果杂物 Bark and fruit	-0.052	-0.048	-0.039	0.326	0.739**	0.585**

表 4 不同林龄凋落物的养分含量(g kg⁻¹)

Table 4 Nutrient concent (g kg⁻¹) of litterfall at different ages

凋落物 Litterfall	元素 Element	林龄 Age (a)		
		5	7	9
叶 Leaf	N	7.10 ± 0.05b	8.11 ± 0.10a	8.15 ± 0.07a
	P	0.36 ± 0.00a	0.33 ± 0.01b	0.34 ± 0.01b
	K	1.83 ± 0.07c	2.30 ± 0.03b	2.57 ± 0.03a
枝 Branch	N	2.67 ± 0.08b	3.12 ± 0.01a	3.04 ± 0.13a
	P	0.26 ± 0.01a	0.20 ± 0.00b	0.20 ± 0.01b
	K	1.18 ± 0.07c	2.04 ± 0.04a	1.71 ± 0.06b
皮果 Bark and fruit	N	4.37 ± 0.04b	6.70 ± 0.17a	6.85 ± 0.22a
	P	0.27 ± 0.00b	0.38 ± 0.00a	0.41 ± 0.02a
	K	1.18 ± 0.01b	2.51 ± 0.04a	2.71 ± 0.22a

同行数据后不同字母表示差异显著(P < 0.05)。

Data followed different letters in the same line indicate significant differences at 0.05 level.

落叶和落枝磷含量显著高于7、9 a生林分, 而皮果杂物则相反, 且7和9 a生各组分磷含量均没有显著差异; 不同林龄凋落物的钾含量同氮元素相似, 均为5 a生的显著低于7、9 a生林分, 且7和9 a生林分的落叶及落枝存在显著差异。各林龄不同组分凋落物的养分元素含量均为 $N > K > P$, 其含量分别为 2.67~8.15、1.18~2.71 和 0.2~0.41 g kg^{-1} 。

根据不同林龄月凋落物量及养分含量计算养分元素的年归还量, 从表5可知, 氮元素的年归还量为

55.48~58.23 kg hm^{-2} , 磷元素为 2.61~3.66 kg hm^{-2} , 钾元素为 16.48~20.37 kg hm^{-2} , 氮、磷、钾总归还量为 9 a (81.35 kg hm^{-2}) > 7 a (77.81 kg hm^{-2}) > 5 a (75.63 kg hm^{-2}), 且均达显著差异。9 a生林分的氮、钾元素的年归还量高于或显著高于7、5 a生林分, 为 9 a > 7 a > 5 a。磷元素的年归还量变化规律与氮、钾元素不同, 表现为 5 a > 9 a > 7 a, 5 a生林分显著高于7和9 a生, 且彼此间差异显著, 说明不同养分元素年累积量由凋落物量及凋落物养分含量共同决定。

表5 桉树人工林凋落物的养分年归还量($\text{kg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$)

Table 5 Annual nutrition return ($\text{kg hm}^{-2}\text{a}^{-1}$) of litterfall of *Eucalyptus* plantations

元素 Element	林龄 Age (a)	叶 Leaf	%	枝 Branch	%	皮果 Bark and fruit	%	总和 Total
N	5	36.02	64.92	9.30	16.76	10.16	18.32	55.48 ± 0.38b
	7	32.71	58.97	7.29	13.15	15.47	27.89	55.48 ± 0.73b
	9	39.34	67.55	7.23	12.42	11.67	20.03	58.23 ± 0.63a
P	5	1.85	50.49	0.94	25.72	0.87	23.79	3.66 ± 0.02a
	7	1.34	51.24	0.45	17.12	0.83	31.65	2.61 ± 0.01b
	9	1.62	59.18	0.48	17.53	0.64	23.29	2.74 ± 0.07b
K	5	8.94	54.23	4.56	27.66	2.98	18.11	16.48 ± 0.55b
	7	8.94	45.36	4.59	23.30	6.18	31.34	19.71 ± 0.53a
	9	12.26	60.18	4.43	21.74	3.68	18.08	20.37 ± 0.63a
N+P+K	5	46.81	61.89	14.80	19.57	14.02	18.54	75.63 ± 0.16b
	7	43.00	55.26	12.33	15.85	22.48	28.89	77.81 ± 1.2ab
	9	53.22	65.42	12.14	14.92	15.99	19.65	81.35 ± 1.32a

由于落叶量占凋落物总量的 47.86%~53.76% (表2), 且叶片中各元素养分归还总量占养分归还总量的绝大部分(表5), 因此叶片凋落物养分归还动态在一定程度上反映了凋落物总量的养分变化。由图2可知, 不同林龄叶片氮、磷元素归还量呈现较明显的双峰型, 养分归还峰值出现在10月和4月, 与叶凋落物产量保持一致, 而叶片钾元素归还量的波动较大, 在4月有1个较明显峰值。各元素养分返还在冬季(12月至次年3月)均维持较低水平。

3 讨论和结论

3.1 凋落物量及其影响因素

本研究结果表明, 5、7和9 a生桉树人工林的年凋落物量分别为 10 877.55、8 745.84 和 9 399.14 kg hm^{-2} , 5 a生林分的显著高于7、9 a生, 且7和9 a生林分间没有显著差异, 3个林分总凋落物量均处于亚热带湿润区森林年均凋落物量范围内(2 390~13 000 kg hm^{-2})^[16],

与刚果的8 a生尾巨桉林凋落物年产量(10 004 kg hm^{-2})^[3]相似, 但明显高于国内其他研究区尾巨桉人工林的凋落物总量(4 700~6 900 kg hm^{-2})^[10-11,17], 可能与气候因素有关, 雷州半岛多暴雨大风天气, 几乎每年受台风影响数次, 对凋落物的累积产生巨大影响。5、7和9 a生林叶凋落物分别占总凋落物的 47.86%、48.63%和 53.76%, 而枝与皮果杂物等凋落物分别占 25.5%~32.28%和 19.85%~24.92%, 与前人的研究结果^[4,10,16]基本一致, 说明叶凋落物量对林分总凋落物量起主导作用。

本研究区不同林龄桉树人工林凋落物总量随季节变化呈双峰型, 与其他桉属林分^[10,17-19]相似, 高峰期分别出现在雨季初期和末期, 可能是雨季初期处于换叶阶段, 大量新叶萌发, 老叶脱落, 而雨季末期台风影响频繁, 且即将进入旱季, 林木自身为适应干旱少雨季节, 而形成凋落物高峰期^[11,18]。但刘文飞^[11]对3、4、6 a生尾巨桉和刘洋^[18]对7 a生巨桉的研究表明, 凋落物量随季节变化呈单峰型, 这可能是凋落物的季节动态不仅依赖于树种生

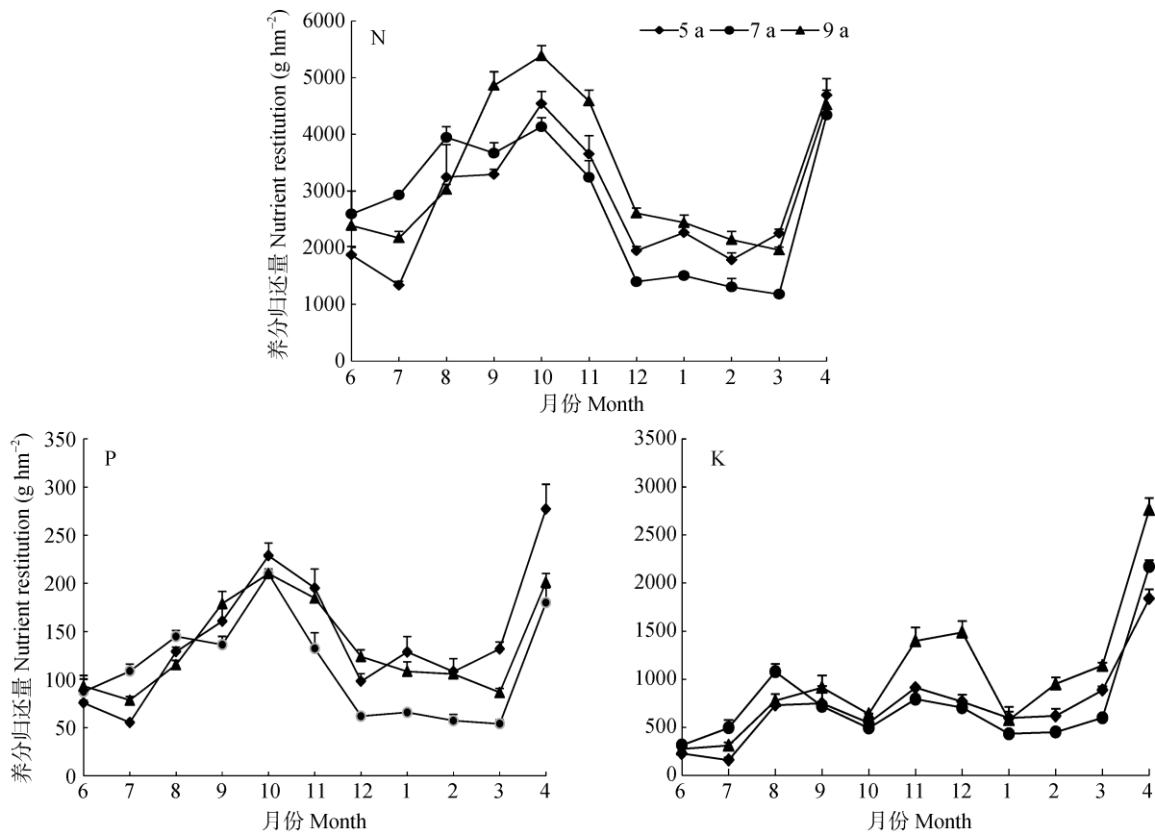


图 2 不同林龄桉树人工林叶片的养分归还量月动态

Fig. 2 Monthly changes in leaf nutrient restitution of *Eucalyptus* plantations with different ages

物和生态学特性, 还同地理位置差异、气候条件及抚育措施密切相关^[20-21]。相关分析表明, 月均温同叶凋落量、皮果杂物量及凋落物总量呈显著正相关 ($P < 0.05$), 除皮果杂物量外, 其余凋落物均同月降雨量无显著相关性, 这与 Erkan^[22]和张新平^[23]等的结果相同, 说明温度是林分凋落物量的主导气象因子, 凋落物量随着温度升高呈增加趋势; 而枝凋落物量全年较为均匀, 无明显变化, 同月均温和月降水量均无显著相关性, 可能是枝条在枯死后不会马上脱落, 一般在暴风骤雨或树干摩擦作用下折断^[24], 受天气影响较大^[25], 而与物候没有直接关系。

3.2 凋落物的养分含量和年归还量

本研究结果表明, 5 a 生林分的凋落物氮、钾平均含量显著均低于 7、9 a 生林分, 即随林龄增加, 这两种元素含量有增加趋势; 而叶和枝凋落物的磷含量表现为 5 a 生林分显著高于 7、9 a 生林分, 皮果杂物凋落物则表现为相反, 说明随林龄增加落叶与落枝的磷元素有增加趋势, 而皮果凋落物中的磷元素有下降趋势, 与赵贵等^[26]认为桉树幼龄期磷元

素主要分布在叶和枝, 随着林龄增加, 干、皮的磷元素有增加趋势的结论相吻合。本研究中, 不同林龄尾巨桉的年氮、磷元素总养分含量分别为 55.48~58.13 和 2.61~3.66 kg hm⁻², 与福建漳州地区的桉树人工林相近(41.04~77.18、1.12~2.58 kg hm⁻²)^[11], 而高于广西南宁地区的桉树人工林(13.996~34.003、0.874~1.389 kg hm⁻²)^[10], 钾元素的年养分含量为 16.48~20.37 kg hm⁻², 高于漳州(4.6~12.44 kg hm⁻²)和南宁(4.722~9.675 kg hm⁻²)。本研究中, 桉树人工林的氮、磷、钾元素养分归还总量表现为 9 a > 7 a > 5 a, 而凋落物总量表现为 5 a > 9 a > 7 a, 说明桉树生长 5 年后, 虽凋落物量有所下降, 但年养分元素总量仍表现为高林龄显著高于低林龄。

林分在经历快速生长期后, 虽生长速度趋于平缓, 但对生态系统的养分归还却在逐渐增加。然而, 超短轮伐期的经营措施以及全树利用的采伐模式, 造成了大量养分元素的流失, 致使人工林地力日渐下降, 因此采用合理的人工林采伐方式和凋落物管理模式并适当增加人工林种植年限, 是提高桉树人工林土壤质量的关键。同时, 为增加桉树人工林产

量且利于人工林地力恢复, 采伐季节选择在冬季。

参考文献

- [1] TURNER J, LAMBERT M J. Litterfall and forest floor dynamics in *Eucalyptus pilularis* forests [J]. *Austr Ecol*, 2002, 27(2): 192–199. doi: 10.1046/j.1442-9993.2002.01170.x.
- [2] POLGLASE P J, ATTIWILL P M, ADAMS M A. Nitrogen and phosphorus cycling in relation to stand age of *Eucalyptus regnans* F. Muell: II. N mineralization and nitrification [J]. *Plant Soil*, 1992, 142(2): 167–176. doi: 10.1007/BF00010963.
- [3] BERNHARDREVERSAT F. Litterfall, litter quality and decomposition changes with eucalypt hybrids and plantation age. [J]. *Thermochim Acta*, 1982, 53(2): 175–182. doi: 10.1016/0040-6031(82)85006-5.
- [4] da SILVA C F, do CARMO É R, MARTINS M A, et al. Deposition and nutritional quality of the litter of pure stands of *Eucalyptus camaldulensis* and *Acacia mangium* [J]. *Biosci J*, 2015, 31(4): 1081–1091. doi: 10.14393/BJ-v31n4a2015-26297.
- [5] OYEDEJI S, ANIMASAUN D A, OGUKUNLE C O, et al. Influence of tree characters and climate on litter characteristics in *Daniellia oliveri* (Rolfe) Hutch. & Dalziel [J]. *J Appl Sci Environ Manag*, 2014, 18(1): 85–90. doi: 10.4314/jasem.v18i1.12.
- [6] YANY C D. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of plantation in China [J]. *Sci Silv Sin*, 2016, 52(12): 1–12. doi: 10.11707/j.1001-7488.20161201.
杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子 [J]. *林业科学*, 2016, 52(12): 1–12. doi: 10.11707/j.1001-7488.20161201.
- [7] BAI X F, XU F L, WANG W L. Research advance on soil degradation and fertilization of larch plantations in China [J]. *World For Res*, 2016, 29(1): 75–79. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.01.009.
白小芳, 徐福利, 王渭玲. 我国落叶松人工林地力衰退与施肥研究综述 [J]. *世界林业研究*, 2016, 29(1): 75–79. doi: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2016.01.009.
- [8] XIE Y J. Primary studies on sustainable management strategy of eucalyptus plantation in China [J]. *World For Res*, 2003, 16(5): 59–64. doi: 10.3969/j.issn.1001-4241.2003.05.013.
谢耀坚. 中国桉树人工林可持续经营战略初探 [J]. *世界林业研究*, 2003, 16(5): 59–64. doi: 10.3969/j.issn.1001-4241.2003.05.013.
- [9] LIAO G R. Review of researches on soil problems of eucalyptus plantation sites in China [J]. *Ecol Environ*, 2003, 12(1): 119–121. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2003.01.029.
廖观荣. 我国桉树人工林立地土壤问题研究概况 [J]. *生态环境学报*, 2003, 12(1): 119–121. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2003.01.029.
- [10] RONG Y. Study on dynamics of litter production, quality and decomposition of *E. urophylla* × *E. grandis* and *Acacia crassicaarpa* plantations [D]. Nanning: Guangxi University, 2009. doi: 10.7666/d.y1599336.
荣薏. 尾巨桉和厚荚相思人工林凋落物产量、性质及其分解动态的研究 [D]. 南宁: 广西大学, 2009. doi: 10.7666/d.y1599336.
- [11] LIU W F, FAN H B, GAO C F, et al. Litter production and its nutrient fluxes in an age sequence of *Eucalyptus plantations* [J]. *Chin J Ecol*, 2009, 28(10): 1928–1934.
刘文飞, 樊后保, 高春芬, 等. 连续年龄序列桉树人工林凋落物量及养分通量 [J]. *生态学杂志*, 2009, 28(10): 1928–1934.
- [12] XU Y X, WANG Z C, ZHU W K, et al. Ecological stoichiometric characteristics of soil C, N, P, and K in three types of plantations on the Leizhou Peninsula [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2018, 35(1): 35–42. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2018.01.005.
许宇星, 王志超, 竹万宽, 等. 雷州半岛 3 种速生人工林下土壤生态化学计量特征 [J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(1): 35–42. doi: 10.11833/j.issn.2095-0756.2018.01.005.
- [13] WANG Z C, DU A P, CHEN S X. Tree growth and soil organic matter characteristics under different soil preparation methods in young *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* stands [J]. *Eucalypt Sci Technol*, 2014, 31(4): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2014.04.008.
王志超, 杜阿朋, 陈少雄. 3 种整地措施下尾巨桉幼林生长及土壤有机质变化特征研究 [J]. *桉树科技*, 2014, 31(4): 38–42. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2014.04.008.
- [14] TSIKNIA M, TZANAKAKIS V A, OIKONOMIDIS D, et al. Effects of olive mill wastewater on soil carbon and nitrogen cycling [J]. *Appl Microbiol Biotechnol*, 2014, 98(6): 2739–2749. doi: 10.1007/s00253-013-5272-4.
- [15] LU R K. Soil Agrochemistry Analysis Protocoecs [M]. Beijing: China Agriculture Science Press, 1999.
鲁如坤. 土壤农业化学分析方法 [M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [16] LIU C J, HANNU I, BJÖRN B, et al. Aboveground litterfall in Eurasian forests [J]. *J For Res*, 2003, 14(1): 27–34. doi: 10.1007/BF02856758.
- [17] LIN Y, ZHANG Y, HUANG X Y, et al. Litterfall and decomposition of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation in coastal sandy soil [J]. *J NE For Univ*, 2014, 42(3): 11–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.03.003.
林宇, 张勇, 黄秀勇, 等. 滨海沙地尾巨桉人工林凋落物及其分解 [J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(3): 11–14. doi: 10.3969/j.issn.1000-5382.2014.03.003.
- [18] LIU Y, ZHANG J, FENG M S. Dynamics of litter production, nutrient

- return and decomposition of four *Eucalyptus grandis* plantation [J]. *Sci Silv Sin*, 2006, 42(7): 1–10. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.07.001.
- 刘洋, 张健, 冯茂松. 巨桉人工林凋落物数量、养分归还量及分解动态 [J]. *林业科学*, 2006, 42(7): 1–10. doi: 10.3321/j.issn:1001-7488.2006.07.001.
- [19] CIZUNGU L, STAELENS J, HUYGENS D, et al. Litterfall and leaf litter decomposition in a central African tropical mountain forest and *Eucalyptus* plantation [J]. *For Ecol Manag*, 2014, 326: 109–116. doi: 10.1016/j.foreco.2014.04.015.
- [20] WENG H, LI Z A, TU M Z, et al. The production and nutrient contents of litter in forests of Ding Hu Shan mountain [J]. *Acta Phytocol Geobot Sin*, 1993, 17(4): 299–304.
- 翁轰, 李志安, 屠梦照, 等. 鼎湖山森林凋落物量及营养元素含量研究 [J]. *植物生态学与地植物学学报*, 1993, 17(4): 299–304.
- [21] LIN B, LIU Q, WU Y, et al. Advances in the studies of forest litter [J]. *Chin J Ecol*, 2004, 23(1): 60–64.
- 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.
- [22] ERKAN N, COMEZ A, AYDIN A C, et al. Litterfall in relation to stand parameters and climatic factors in *Pinus brutia* forests in Turkey [J]. *Scand J For Res*, 2018, 33(4): 338–346. doi: 10.1080/02827581.2017.1406135.
- [23] ZHANG X P, WANG X P, ZHU B, et al. Litter fall production in relation to environmental factors in northeast China's forests [J]. *J Plant Ecol*, 2008, 32(5): 1031–1040. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.05.008.
- 张新平, 王襄平, 朱彪, 等. 我国东北主要森林类型的凋落物产量及其影响因素 [J]. *植物生态学报*, 2008, 32(5): 1031–1040. doi: 10.3773/j.issn.1005-264x.2008.05.008.
- [24] LI X F, HAN S J, LI Y W, et al. Litterfall in main forest ecosystems of northeast China [J]. *Chin J Appl Ecol*, 2005, 16(5): 783–788.
- 李雪峰, 韩士杰, 李玉文, 等. 东北地区主要森林生态系统凋落量的比较 [J]. *应用生态学报*, 2005, 16(5): 783–788.
- [25] XU W M, YAN W D, LI J B, et al. Amount and dynamic characteristics of litterfall in four forest types in subtropical China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(23): 7570–7575. doi: 10.5846/stxb201102210194.
- 徐旺明, 闫文德, 李洁冰, 等. 亚热带 4 种森林凋落物量及其动态特征 [J]. *生态学报*, 2013, 33(23): 7570–7575. doi: 10.5846/stxb201102210194.
- [26] ZHAO G, DING X D, WANG R P, et al. Phosphorus absorption of two different *Eucalyptus* cultivars at different tree ages in the Leizhou Peninsula [J]. *J Zhejiang Agric For Univ*, 2012, 29(3): 407–411. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.03.013.
- 赵贵, 丁效东, 王荣萍, 等. 雷州半岛桉树不同品种和树龄对磷吸收的影响 [J]. *浙江农林大学学报*, 2012, 29(3): 407–411. doi: 10.3969/j.issn.2095-0756.2012.03.013.