

追施氮肥对桉树各器官养分浓度及贮量的影响^{*}

马 强¹ 宇万太^{1**} 周 桦¹ 徐永刚¹ 陈进宁² 陈桂金² 刘淑英² 邓 力²

(¹ 中国科学院沈阳应用生态研究所, 沈阳 110016; ² 广西南宁国营高峰林场, 南宁 530001)

摘 要 采用田间定位试验的方法,研究了追施氮肥对2年生桉树各器官生物量积累及养分浓度与贮量的影响.结果表明:与对照相比,追施氮肥使桉树生物量增加24.2%,其中树枝增幅最高,为38.2%,树叶最少.追施氮肥显著促进了桉树对养分的吸收,其增幅顺序为P>K>N>Mg>Ca>Si;叶片中N、P、Mg、Si含量最高,K在树干中的贮量最大,树枝部位的养分浓度与贮量增加最为显著.桉树N、P、K养分以内循环为主,叶片凋落前分别有73.8%、79.1%和72.9%的N、P、K养分被转移到植株体内,其外循环量仅为全树贮量的14.8%、7.7%和8.6%;Ca、Mg、Si养分则以外循环方式为主,其中Ca最明显,树叶中89.2%的Ca随叶片凋落,其外循环通量占全树Ca总贮量的25.9%.

关键词 桉树 追施氮肥 生物量 养分浓度 养分贮量

文章编号 1001-9332(2010)08-1933-07 **中图分类号** S725.5 **文献标识码** A

Nutrient concentration and storage in different organs of *Eucalyptus* under effects of nitrogen topdressing. MA Qiang¹, YU Wan-tai¹, ZHOU Hua¹, XU Yong-gang¹, CHEN Jin-ning², CHEN Gui-jin², LIU Shu-ying², DENG Li² (¹*Institute of Applied Ecology, Chinese Academy of Sciences, Shenyang 110016, China*; ²*Nanning Gaofeng Forest Farm of Guangxi, Nanning 530001, China*). -*Chin. J. Appl. Ecol.*, 2010, 21(8): 1933–1939.

Abstract: A field experiment was conducted to study the effects of nitrogen (N) topdressing on the biomass accumulation and nutrient concentration and storage in different organs of two-year-old eucalyptus. Comparing with the control, N topdressing increased the eucalyptus biomass by 24.2%. Branch had the highest increment (38.2%), while leaf had the lowest one. The nutrient uptake under N topdressing was improved significantly, with the order of P>K>N>Mg>Ca>Si. Leaf had the highest contents of N, P, Mg, and Si; trunk had the highest storage of K; while branch had the most significant increase of nutrient concentration and storage. The N, P, and K were recycled mainly through internal flux, with 73.8% of N, 79.1% of P, and 72.9% of K in leaf transferred back to the plant before leaf fallen, and the external flux of these three nutrients only occupied 14.8%, 7.7%, and 8.6% of their total storage in the tree, respectively. The Ca, Mg and Si were the external flux elements, especially for Ca. 89.2% of Ca in leaf was cycled in external flux, accounting for 25.9% of its total storage in the tree.

Key words: *Eucalyptus*; nitrogen topdressing; biomass; nutrient concentration; nutrient storage.

大面积发展人工林是应对人们对木材需求迅速增长的主要手段^[1]. 20世纪80年代以来,世界范围内相继进行了大规模的植树造林,据报道,1980、1990和2000年全球人工林面积分别为1780×10⁴、4360×10⁴和18700×10⁴ hm²,20年间增长了10余倍,中国、美国、俄罗斯、印度和日本等国的人工林面

积均超过1000×10⁴ hm²,其面积总和占世界人工林总面积的65%^[2]. 同时,通过人工林经营增强陆地碳汇功能也是清洁发展机制(clean development mechanism, CDM)中最主要的途径之一,对减缓全球变暖进程具有明显的作用^[3–4],尤其对世界上第二大温室气体排放国的中国在未来环境履约谈判中争取更大的发展空间意义重大^[5].

用于营建速生丰产林的主要树种有桉树(*Eucalyptus* sp.)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、杨树(*Populus* sp.)、松树(*Pinus* sp.)和相思(*Acacia* sp.)

^{*} 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-405)、国家“十一五”科技支撑计划项目(2008BADA7B08)和教育部重点实验室开放基金项目(ERCERR08014)资助.

^{**} 通讯作者. E-mail: wtyu@iae.ac.cn

2010-01-04 收稿,2010-06-08 接受.

等,其中桉树以速生丰产、用途广泛和对养分要求低等特点成为人工林发展的最主要树种之一^[6]. 目前我国桉树种植面积已超过 $200 \times 10^4 \text{ hm}^2$,年均增幅在 $13.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$,增速居世界首位^[7]. 同时,随着施肥、耕作和栽培等技术的进步,我国桉树产量逐渐提高,已由 20 世纪 70、80 年代的 $8 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 提高到如今的 $20 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[2],个别经营管理较好的企业可达 $25 \text{ m}^3 \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$. 尽管如此,在大规模桉树种植与生产过程中仍存在养分供给不均衡、肥料品种与施肥时期未优化和轮伐周期不合理等问题^[8-9],导致人工林土壤肥力水平降低,严重制约了桉树人工林产量的进一步提升.

我国桉树引种地区土壤肥力水平偏低,N、P、K 等养分缺乏,且有效性较差^[10-11],施肥对桉树人工林增产作用尤为明显^[12]. 随着引种面积的不断扩大与生产中所出现的实际问题,研究人员已更加关注桉树的人工施肥问题,并在肥料配比^[13]、立地条件^[14]、肥料种类^[15]及施肥方式等^[16]对桉树人工林生产的影响等方面开展研究,结果发现,养分均衡施用的增产效果优于单施^[17],基肥与追肥配合^[18]、适宜的整地与施肥方式^[19]均能更有效地促进桉树生长,同时,应根据种植桉树的品种及土壤、气候条件进行适当调整,以获得更高的经济与环境效益^[20],但有关施肥对桉树各器官中养分的分配与变化的影响及其内、外循环规律等研究较少. 本文以广西高峰林场桉树人工林为对象,通过不同追肥处理田间定位试验,研究了追施氮肥对桉树生物量的积累及各器官主要营养元素浓度与贮量的影响,探讨不同养分供给条件下桉树生长与养分分配的规律,以期为改进桉树人工林经营管理,建立合理的林木施肥制度提供理论依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西高峰林场界牌分厂“广西现代林业科技示范园优良树种展示区”(22°58′ N, 108°22′ E, 海拔 150 m),面积 6.67 hm^2 ,地形为低丘;该地区属南亚热带半湿润气候,年均降雨量 1300 mm,年均气温 21.2 $^{\circ}\text{C}$ ~ 22.3 $^{\circ}\text{C}$,全年 $\geq 10^{\circ}\text{C}$ 积温 7190 $^{\circ}\text{C}$ ~ 7762 $^{\circ}\text{C}$. 供试土壤为砖红壤,0 ~ 20 cm 土壤的基本理化性状为:pH 3.96,土壤有机质 27.9 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 1.1 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 0.2 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 10.3 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 94.78 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效磷 1.65 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 54.8 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量 10.39

$\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$.

1.2 试验设计

2006 年 4 月苗木定植,苗龄为 4 个月,桉树品种为尾巨桉(*Eucalyptus urophylla* × *E. grandis*)无性系广林 9 号,系人工控制授粉杂交成功的桉树杂种. 定植时每株施用基肥(N+P₂O₅+K₂O:4+10+6) 750 g,施肥方式为:将肥料与少量土混匀,施于栽树的明坑中,种树后回填土. 株距 3 m × 4 m,每公顷种植桉树 833 株. 2006 年 6 月每株追施尿素 50 g,9 月每株追施复合肥(N+P₂O₅+K₂O:15+8+7) 200 g. 取其中的 12 棵于 2007 年 4 月每株追施¹⁵N 标记尿素(¹⁵N 原子百分:10.33%) 128.16 g,追肥方式为将尿素溶解于蒸馏水中,均匀浇施于桉树附近. 桉树生长期间无人工灌溉.

2007 年末追施氮肥的统称为对照处理,追施氮肥的为追 N 处理.

1.3 研究方法

2007 年 12 月,选取对照和追 N 处理桉树各 3 株,分别取样,并将追 N 处理的叶柄用红铅油标记. 树木解析为树干、粗枝、细枝、粗根、细根、树桩和树叶 7 部分,除叶片外,其他部位又分为树皮和木质部(材)两部分,分别对各部位进行取样;将树干截为 4 段,测定总鲜质量,并分别取样品圆盘,测水分,计算皮/芯比,叶面积测定方法参见文献[21]. 2007 年 12 月,在树下设置 1 m × 1 m 的竹筐收集落叶,每两个月收集 1 次,至 2008 年 12 月,计算一年落叶量,并挑选出追氮处理落叶,烘干,用于养分分析.

桉树各器官元素浓度测定:全氮采用元素分析仪测定(Elementary Vario EL III,德国 Elementar 公司),样品经 HNO₃-HClO₄ 消煮后,全磷采用钼锑钒比色法测定,全钾用火焰光度计测定,Ca、Mg 采用干灰化-EDTA 连续滴定法测定^[22],Si 采用灰分减差法测定.

1.4 数据处理

试验中所有数据均由 Excel 2003 软件进行处理,统计分析采用 one-way ANOVA 方差分析和 LSD 最小显著差异法进行均值比较,计算过程均在 SPSS 13.0 软件上完成.

2 结果与分析

2.1 追施氮肥对桉树生物量的影响

由表 1 可见,与对照处理相比,追 N 处理的全树生物量提高 24.2%,其中树枝增幅最明显,为 38.2%,叶面积、叶片数和叶质量等的增幅在 10%

表 1 施肥对桉树各部位生长的影响
Tab.1 Effect of fertilization on the growing of different parts of eucalyptus

项目 Item	胸径 Diameter of tree (cm)	树高 Height of tree (m)	叶片数 Numbers of leaf	叶面积 Area of leaves (m ² · plant ⁻¹)	叶质量 Leaf mass (g · plant ⁻¹)	干质量 Trunk mass (g · plant ⁻¹)	枝质量 Branch mass (g · plant ⁻¹)	根质量 Root mass (g · plant ⁻¹)	总质量 Total mass (g · plant ⁻¹)
对照 CK	30.50a	11.92a	12728a	44.15a	6459a	16913a	4307a	6000a	33679a
施肥 Fertilization	33.47b	12.47a	14853b	48.46b	7445b	21391b	5953b	7022b	41811b
施肥增长率(%) Increase rate of fertilization	9.74	4.61	16.70	9.76	15.27	26.48	38.22	17.03	24.15

表中主干质量为树干与树桩之和,枝质量为粗枝与细枝之和,根质量为粗根与细根之和 Main trunk mass was sum of the trunk and stake; branch mass was sum of thick branch and thin branch; root mass was the sum of thick root and thin root. 不同小写字母表示各处理间差异显著 ($P<0.05$) Significant difference at 0.05 level between treatments was showed by different small letters. 下同 The same below.

~17%,达到显著水平 ($P<0.05$). 从桉树不同部位生长情况可见,细枝生物量提高 26.8%,粗枝增长了 44.5%,说明树枝增长的主要贡献来自粗枝(表 2). 尽管叶片数与细枝生物量显著相关 ($R^2=0.97$, $P<0.05$),但二者增幅并不同步. 另外,追施氮肥使桉树胸径与树高均有一定幅度增加,且树干部分对全树生物量的增长贡献最大.

由表 2 可见,追 N 与否对桉树各部位占全树比例影响较小,2 年生桉树主干(包括干和桩)约占全树总质量的 50%,其次为树叶、树根及树枝;追施氮肥虽然使叶质量明显提高,但因全树生物量增加,其在全树所占比重却略低于对照处理. 同时,除树桩材与细枝皮外,追 N 处理地上各部位占全树比例均高于对照处理,地下部位则与之相反.

2.2 追施氮肥对桉树养分浓度的影响

由表 3 可见,追 N 处理,与对照处理相比,除粗根材 N 浓度持平外,其他部位 N 浓度均有不同程度的增加,其中粗枝皮、粗枝材和细根皮的增幅最大;

粗枝皮和粗枝材 P 浓度增幅最为显著. 各部位皮层中 N、P 浓度均高于木质部,但与对照相比,追 N 处理地上部分木质部 N、P 浓度的增幅均高于皮层,而地下部分与之趋势相反. 追施氮肥促进了桉树对 K 的吸收,除叶片外,追 N 处理各部位 K 浓度均有所提高,其中以细枝与细根部位最为明显. 其他元素在各部位中的浓度变化趋势则不尽相同,追 N 处理 Si 浓度下降较为明显,Ca 次之,Mg 变化较小.

2.3 追施氮肥对桉树养分贮量的影响

由表 4 可见,桉树各器官养分贮量大小顺序为 $N>Si>K>Ca>Mg>P$. 其中,叶片以不到全树 20% 的生物量储存了全树 60% 的 N 量,表明叶片是 N 的重要贮存库;叶片中 Mg 和 Si 贮量也接近或超过全树总贮量的 40%;Ca 贮量为全树总贮量 30% 左右,在各元素中最低. 追 N 与否对桉树体内养分的分配产生影响,对照处理叶片中各营养元素贮量占全树的比例均高于追 N 处理,P 最高,达 9.4%,其次是 K,在 5.1%.

表 2 不同施肥处理桉树各器官平均干物质量
Tab.2 Average dry mass of different organs of tested eucalyptus under different fertilization treatments

器 官 Organ	对照 Control		施肥 Fertilization	
	干质量 Dry mass (g)	占全树百分比 Percent of total tree(%)	干质量 Dry mass (g)	占全树百分比 Percent of total tree(%)
干皮 Trunk bark	2459a	7.30	3303b	7.90
干材 Trunk wood	14056a	41.74	17669b	42.26
粗枝皮 Thick branch bark	434a	1.29	750b	1.79
粗枝材 Thick branch core	2349a	6.97	3270b	7.82
细枝皮 Thin branch bark	441a	1.31	538b	1.29
细枝材 Thin branch core	1083a	3.22	1394b	3.33
粗根皮 Thick root bark	938a	2.79	1067a	2.55
粗根材 Thick root core	3806a	11.30	4679b	11.19
细根皮 Thin root bark	487a	1.45	425a	1.02
细根材 Thin root core	769a	2.28	851a	2.03
树桩皮 Stake bark	64a	0.19	78a	0.19
树桩材 Stake core	334a	0.99	341a	0.82
叶片 Leaves	6459a	19.18	7445b	17.81
全树合计 Total of whole tree	33679a	100.00	41811b	100.00

表 3 不同施肥桉树各器官养分浓度
Tab.3 Nutrient concentrations in different organs of eucalyptus under different fertilization treatments

器官 Organ	处 理 Treatment	养分浓度 Nutrient concentration (g · kg ⁻¹)					
		N	P	K	Ca	Mg	Si
干皮	对照 Control	3.35a	0.45a	5.38a	9.15b	2.69a	8.64a
Trunk bark	施肥 Fertilization	3.86b	0.49a	5.58a	8.46a	2.56a	8.45a
干材	对照 Control	2.00a	0.17a	2.22a	0.73a	0.40a	1.51b
Trunk wood	施肥 Fertilization	2.31b	0.23b	2.62b	0.72a	0.38a	1.33a
粗枝皮	对照 Control	3.59a	0.25a	5.84a	12.87a	1.62a	12.44b
Thick branch bark	施肥 Fertilization	4.36b	0.51b	6.95b	12.99a	2.08b	10.57a
粗枝材	对照 Control	1.54a	0.10a	1.89a	1.26a	0.32a	2.54b
Thick branch core	施肥 Fertilization	1.92b	0.25b	2.12b	1.09a	0.34a	2.02a
细枝皮	对照 Control	6.11a	0.76a	7.94a	12.45a	2.55b	15.28b
Thin branch bark	施肥 Fertilization	6.34a	0.78a	9.41b	12.48a	2.15a	12.17a
细枝材	对照 Control	2.16a	0.37a	2.89a	3.87b	0.81a	2.91b
Thin branch core	施肥 Fertilization	2.43b	0.65b	3.69b	2.35a	0.84a	2.67a
粗根皮	对照 Control	5.69a	0.45a	4.11a	12.47a	1.78a	11.65a
Thick root bark	施肥 Fertilization	6.82b	0.60b	4.68b	13.98b	1.75a	12.01a
粗根材	对照 Control	4.70a	0.31a	2.30a	0.54a	0.56a	1.65b
Thick root core	施肥 Fertilization	4.69a	0.28a	2.48a	0.59a	0.58a	0.96a
细根皮	对照 Control	6.54a	0.52a	4.09a	11.53a	1.50a	15.84a
Thin root bark	施肥 Fertilization	8.15b	0.75b	5.17b	12.08a	1.55a	14.99b
细根材	对照 Control	5.58a	0.38a	1.99a	0.51a	0.36a	2.00b
Thin root core	施肥 Fertilization	6.22b	0.51b	2.49b	0.73b	0.37a	1.12a
树桩皮	对照 Control	3.40a	0.55a	8.01a	15.40b	2.40a	14.70b
Stake bark	施肥 Fertilization	3.47a	0.49a	8.14a	13.72a	2.20a	13.46a
树桩材	对照 Control	1.95a	0.15a	1.84a	0.78b	0.58a	1.27b
Stake core	施肥 Fertilization	2.33b	0.19b	2.11b	0.58a	0.56a	0.53a
叶片	对照 Control	17.68a	0.91a	6.81a	5.16a	2.47a	10.39b
Leaves	施肥 Fertilization	18.89b	0.86a	6.84a	4.88a	2.56a	8.99a

表 4 不同施肥桉树各器官养分贮量
Tab.4 Nutrient storages in different organs of eucalyptus under different fertilization treatments

部位 Parts of tree	处 理 Treatment	养分贮量 Nutrient storage (g)					
		N	P	K	Ca	Mg	Si
干皮	对照 Control	8.24a	1.10a	13.24a	22.49a	6.61a	21.24a
Trunk bark	施肥 Fertilization	12.75b	1.62b	18.43b	27.95b	8.47b	27.92b
干材	对照 Control	28.11a	2.45a	31.15a	10.23a	5.60a	21.25a
Trunk wood	施肥 Fertilization	40.82b	4.04b	46.23b	12.74b	6.69b	23.98b
粗枝皮	对照 Control	1.56a	0.11a	2.53a	5.58a	0.70a	5.39a
Thick branch bark	施肥 Fertilization	3.27b	0.38b	5.22b	9.75b	1.58b	7.93b
粗枝材	对照 Control	3.62a	0.24a	4.43a	2.95a	0.74a	5.98a
Thick branch core	施肥 Fertilization	6.28b	0.82b	6.92b	3.56b	1.11b	6.62b
细枝皮	对照 Control	2.69a	0.33a	3.50a	5.49a	1.13a	6.74a
Thin branch bark	施肥 Fertilization	3.41b	0.42b	5.06b	6.71b	1.17a	6.55a
细枝材	对照 Control	2.34a	0.40a	3.13a	4.19b	0.88a	3.15a
Thin branch core	施肥 Fertilization	3.39b	0.91b	5.14b	3.27a	1.18b	3.73b
粗根皮	对照 Control	5.34a	0.42a	3.86a	11.70a	1.67a	10.92a
Thick root bark	施肥 Fertilization	7.28b	0.64b	4.99b	14.92b	1.87b	12.82b
粗根材	对照 Control	17.89a	1.19a	8.75a	2.06a	2.13a	6.28b
Thick root core	施肥 Fertilization	21.94b	1.33b	11.62b	2.77b	2.71b	4.50a
细根皮	对照 Control	3.18a	0.25a	1.99a	5.62a	0.73a	7.72b
Thin root bark	施肥 Fertilization	3.46b	0.32b	2.20b	5.13a	0.67a	6.36a
细根材	对照 Control	4.29a	0.29a	1.53a	0.39a	0.28a	1.53b
Thin root core	施肥 Fertilization	5.29b	0.44b	2.12b	0.63b	0.32a	0.95a
树桩皮	对照 Control	0.22a	0.04a	0.51a	0.98a	0.15a	0.93a
Stake bark	施肥 Fertilization	0.27a	0.04a	0.63b	1.07a	0.17a	1.05a
树桩材	对照 Control	0.65a	0.05a	0.62a	0.26b	0.19a	0.43b
Stake core	施肥 Fertilization	0.79b	0.07b	0.72b	0.20a	0.19a	0.18a
叶片	对照 Control	114.20a	5.88a	43.99a	33.33a	15.95a	67.11a
Leaves	施肥 Fertilization	140.64b	6.40a	50.92b	36.33b	19.06b	66.93a
全树合计	对照 Control	192.33a	12.75a	119.23a	105.27a	36.76a	158.67a
Total of whole tree	施肥 Fertilization	249.59b	17.43b	160.20b	125.03b	45.19b	169.52a

表 5 施肥处理桉树生长叶与凋落叶中养分浓度与贮量
Tab.5 Concentration and storage of nutrients in living leaf and fallen leaf of eucalyptus

项目 Item	养分浓度 Concentration of nutrients (g·kg ⁻¹)						养分贮量 Storage of nutrients (g)					
	N	P	K	Ca	Mg	Si	N	P	K	Ca	Mg	Si
生长叶 Living leaf	18.89b	0.86b	6.84b	4.88a	2.56a	8.99a	140.64b	6.40b	50.92b	36.33b	19.06b	66.93b
凋落叶 Fallen leaf	7.80a	0.28a	2.92a	6.85b	2.35a	9.06a	36.89a	1.34a	13.81a	32.42a	11.10a	42.83a
内循环量 Internal flux	-	-	-	-	-	-	103.75	5.06	37.11	3.91	7.96	24.10
内循环率 Rate of internal flux (%)	-	-	-	-	-	-	73.77	79.07	72.88	10.77	41.76	36.01

由表 4 还可看出,追 N 处理各器官 N 贮量均有所提高,其中粗枝部位提高最快,树干皮、材次之,细枝材亦有大幅提高,全树 N 贮量总体提高 30.4%。追施氮肥对 P、K 在各器官的贮量影响相似,粗枝皮和材提高幅度最大,其次为细枝材。其中,追施氮肥使粗枝皮和材的 P 贮量提高 2 倍以上,细枝材中 P 贮量提高 1 倍以上,全树 P、K 贮量分别提高 40.7% 和 34.4%。追施氮肥虽然在总体上提高了 Ca、Mg、Si 贮量,但各器官贮量变化不明显,养分贮量提高最多的部位仍为粗枝皮。此外,细根材、粗枝材和树皮作为它们的另一贮存库,细根皮中 3 种养分贮量均有所降低。

2.4 凋落前后桉树叶片养分浓度的变化

由表 5 可见,P 的变化幅度最大,叶片凋落后其浓度降低 67.4%,其次为 N 和 K,N、P、K 内循环率与养分浓度变化趋势相同;落叶与生长叶中 Mg 和 Si 养分浓度基本持平,但贮量却发生了明显变化,主要是由于落叶质量下降所致;与其他养分不同,Ca 在落叶中浓度明显高于生长叶,只有 10.8% 的 Ca 通过内循环机制回输到桉树体内,绝大部分随凋落叶片进入外循环^[23]。

3 讨 论

施肥显著影响桉树生物量的积累。与对照相比,追 N 处理桉树生物量提高近 25%,氮肥作用明显,徐大平等^[24]研究发现,桉树生长初期需 N 量较高,随着树龄的增加,其对 N 的需求量减少。追施氮肥使叶片在全树中所占比例降低,可能是因为 2 年生是短轮伐期桉树生长与养分积累的重要时期^[25],对照处理养分条件较差,树木将更多的干物质集中在叶片,以更有效地竞争光、热资源;追 N 处理根生物量占全树比例低于对照处理,其原因是养分条件改善后主要摄取养分的根部不必再进行过度延展与增殖,造成其在全树中比例降低。

追 N 处理桉树体内 N、K 养分浓度并未因生物量的增加而降低,说明追施氮肥提高了桉树对养分

的吸收能力,改善了桉树的养分状况。林书蓉等^[12]研究也表明,养分供应均衡有利于桉树对养分的吸收;而追施氮肥造成桉树 Si 和 Ca 浓度降低的原因主要是树木生物量增长所带来的稀释效应,及其在树木各部位的分配特征等因素综合作用的结果。同时,追施氮肥影响了养分在树木体内的分配。与对照相比,追施氮肥减少了随落叶进入外循环的养分比例,使更多的养分以内循环方式进行利用,提高了养分的利用效率,部分改变了养分的循环模式^[26];在桉树主干皮和粗枝皮中,养分贮量的增速普遍高于木质部,保证了生长活跃部分的养分供应,提高了树木的生长活力。也有学者指出,在生物量累积阶段,桉树韧皮部和边材中积累了大量的养分;这些养分在木质部形成后从细胞中流出,进入韧皮部和边材贮藏库^[2]。因此,在桉树种植初期追施氮肥对改善桉树体内营养元素循环、提高养分利用效率,促进桉树生物量的积累均具有明显的作用。

与生长叶相比,凋落叶中 N、P、K 养分浓度与贮量大幅降低,表明其中大部分在凋落前已从叶片转移到树体,进入外循环的养分量仅为全树相应养分量的 14.8%、7.7% 和 8.6%,明显低于北方杨树养分外循环比例^[23],说明桉树对养分的利用效率更高;而叶片中 Ca 浓度不降反升,其大部分随叶片凋落,主要是因为 Ca 在叶片中多以有机物或有机络合物等形态存在,较难移动^[27];尽管凋落叶中 Mg、Si、Ca 浓度与生长叶中浓度持平甚至升高,但其在凋落叶中的贮量均有所降低,这是因凋落叶质量下降导致养分浓度相对升高之故^[21]。由此可见,桉树林生态系统中 N、P、K 主要以内循环机制提高养分的利用效率,而 Ca 则主要以外循环的方式进行养分的循环再利用,Mg 和 Si 内、外养分循环通量不等,但以外循环为主。

尽管养分能够以内循环方式提高其利用效率,但仍有相当数量随凋落物进入外循环,因此,应尽量将枝叶归还林地,以提高养分利用效率;且由于树木有很薄的相对富含养分的活性组织包围着活力差的

木质部,成熟林或原始林被砍伐得到可用的干材后,应尽量将养分含量较高的韧皮部及边材归还林地,以减少养分流失^[28],保持林地养分平衡^[29]。此外,覆盖凋落物后,地表径流、蒸散会明显减少,有利于桉树林地土壤涵养水源,减少因径流和渗漏流失养分^[27];徐大平等^[2]研究表明,若能保持桉树凋落物归还土壤,并配以适宜的种植制度和轮伐周期,可基本保持桉树林地养分平衡^[30]。然而,在许多种植桉树地区,桉树凋落物被用作薪材,使养分不能归还林地,正常的养分循环过程被破坏,加上疏伐、运输、放牧等活动使林地表土裸露,水土流失加剧,土壤养分状况进一步恶化^[11]。因此,在采伐以主干材为经营目标的桉树时,不应采用全树砍伐,应保留枝、叶、皮与根等非目标产品,将其归还林地,并根据树种、土壤养分状况和林木生长阶段均衡施肥,以实现桉树速生林的可持续发展。

4 结 论

追施 N 肥可以显著提高 2 年生桉树各器官生物量的积累,使生物量总体提高 24.2%,其中,树枝部分增长最为明显,树叶与树根最少;追肥对桉树各器官生物量占全树比例影响不明显,但对照处理树叶与根生物量比例高于追肥处理。

追施氮肥促进了桉树对养分的吸收,全树 Ca、Mg、Si 养分总贮量有所增加。追施氮肥降低了树叶中养分贮量的比例,以 P 最明显,使更多养分以内循环方式再利用,提高了养分利用效率。

桉树叶片在凋落前已将大部分 N、P、K 回输到树体,而叶片中 89.2% 的 Ca 随叶片凋落。总体上,桉树林生态系统中 N、P、K 养分以内循环方式为主, Ca、Mg、Si 主要以外循环方式对养分进行再利用。

参考文献

- [1] Fox TR. Sustained productivity in intensively managed forest plantations. *Forest Ecology and Management*, 2000, **138**: 187–202
- [2] Xu D-P (徐大平), Zhang N-N (张宁南). Research progress of ecological effect of *Eucalyptus* plantation. *Guangxi Forestry Science* (广西林业科学), 2006, **35** (4): 179–187 (in Chinese)
- [3] Lal R. Forest soils and carbon sequestration. *Forest Ecology and Management*, 2005, **220**: 242–258
- [4] Marland G, Garten CT, Poat WM, *et al.* Studies on enhancing carbon sequestration in soils. *Energy*, 2004, **29**: 1643–1650
- [5] Feng R-F (冯瑞芳), Yang W-Q (杨万勤), Zhang J (张健). Artificial forest management for global change mitigation. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26** (11): 3870–3877 (in Chinese)
- [6] Carnus JM, Parrotta J, Brockerhoff E, *et al.* Planted forests and biodiversity. *Journal of Forestry*, 2006, **104**: 65–77
- [7] Qian G-Q (钱国钦). Ecological problem and development countermeasure of *Eucalyptus*. *Hunan Forestry Science and Technology* (湖南林业科技), 2007, **34** (2): 67–70 (in Chinese)
- [8] DeLuca TH, Zackrisson O, Nilsson MC, *et al.* Quantifying nitrogen-fixation in feather moss carpets of boreal forests. *Nature*, 2002, **419**: 917–920
- [9] Embaye K, Weih M, Ledin S, *et al.* Biomass and nutrient distribution in a highland bamboo forest in southwest Ethiopia: Implications for management. *Forest Ecology and Management*, 2005, **204**: 159–169
- [10] Ma F (马涪), Gu Y-Y (谷宜园), Xi G-Q (奚国强), *et al.* Studies on soil nutrients and fertilization of *Eucalyptus* plantation in Guangxi. *Soils and Fertilizers* (土壤肥料), 2005 (2): 53–54 (in Chinese)
- [11] Qi Z-P (漆智平), Chen Y (陈勇), Yu W-M (余伟敏). Soil fertility regime of *Eucalyptus*-forested land and farming land in the tropical area. *Chinese Journal of Tropical Crops* (热带作物学报), 2003, **24** (3): 73–77 (in Chinese)
- [12] Lin S-R (林书蓉), Li S-Y (李淑仪), Liao G-R (廖观荣), *et al.* Effect of fertilization on *E. urophylla* growth and plant nutrition. *Tropical and Subtropical Soil Science* (热带亚热带土壤科学), 1998, **7** (3): 184–187 (in Chinese)
- [13] Niu Y-Q (牛永强), Zhou W-L (周文龙), Wen M-Y (温茂元), *et al.* Experiment of fertilization and planting density of *Eucalyptus*. *Tropical Forestry* (热带林业), 2000, **28** (3): 86–91 (in Chinese)
- [14] Wu J-P (吴建平), Wu T-L (吴天乐), Yao M (姚敏). Effects of fertilizing on young *Eucalyptus* stand. *Hunan Agricultural Sciences* (湖南农业科学), 2006 (2): 92–94 (in Chinese)
- [15] Hua Y-G (华元刚), Cha Z-Z (茶正早), Lin Z-M (林钊沐), *et al.* Nutrient and fertilization of *Eucalyptus* plantations in Hainan Island. *Tropical Forestry* (热带林业), 2005, **33** (1): 35–38 (in Chinese)
- [16] Yang C-J (杨曾奖), Zheng H-S (郑海水), Weng Q-J (翁启杰). The effect of site preparation and fertilization on growth of *Eucalyptus urophylla*. *Guangdong Forestry Science and Technology* (广东林业科技), 1996, **12** (2): 10–13 (in Chinese)
- [17] Bai F-M (柏方敏), Chen X-P (陈晓萍), He Y-J (何友军), *et al.* Study on effect of fertilizing on young *Eucalyptus* stand. *Central South Forest Inventory and Planning* (中南林业调查规划), 2004, **23** (3): 55–56 (in Chinese)
- [18] Li B-F (李宝福). Studies on the experiment of applying various fertilizer varieties of the same nutrient content on *Eucalyptus*. *Hebei Journal of Forestry and Orchard Research* (河北林果研究), 2001, **16** (3): 219–225 (in Chinese)

- [19] Yang C-J (杨曾奖), Zheng H-S (郑海水), Weng Q-J (翁启杰), *et al.* Effect of land preparation and fertilization on growth of *Eucalyptus urophylla* and soil properties. *Tropical and Subtropical Soil Science* (热带亚热带土壤科学), 1996, **5**(2): 74–79 (in Chinese)
- [20] Zang G-C (臧国长), Ma X-Q (马祥庆), Cai L-P (蔡丽平). Research progress on fertilization of *Eucalyptus* plantations in China. *Journal of Fujian Forestry Science and Technology* (福建林业科技), **34**(4): 253–258 (in Chinese)
- [21] Zhou H (周 桦), Yu W-T (宇万太), Ma Q (马强), *et al.* Effects of nitrogen fertilizer on concentration and storage of major nutrients in *Eucalyptus* leaves. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2010, **29**(8): 1488–1492 (in Chinese)
- [22] Lu R-K (鲁如坤). Analytical Methods of Soil Agrochemistry. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999 (in Chinese)
- [23] Shen S-M (沈善敏), Yu W-T (宇万太), Zhang L (张 璐), *et al.* Internal and external nutrient cyclings of poplar tree. II. Transferring and cycling of nutrients in and out of the tree before and after leaf fallen. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 1993, **4**(1): 27–31 (in Chinese)
- [24] Xu D-P (徐大平), He Q-X (何其轩), Yang C-J (杨曾奖), *et al.* Above-ground primary productivity and nutrient cycling of *Eucalyptus grandis* × *E. urophylla* plantation. *Forest Research* (林业科学研究), 1997, **10**(4): 365–372 (in Chinese)
- [25] Yu X-B (余雪标), Bai X-Q (白先权), Xu D-P (徐大平), *et al.* Nutrient cycle of *Eucalyptus* plantations with different continuous-planting rotations. *Chinese Journal of Tropical Crops* (热带作物学报), 1999, **20**(3): 60–66 (in Chinese)
- [26] Scott DA, Burger JA, Kaczmarek DJ, *et al.* Nitrogen supply and demand in short-rotation sweetgum plantations. *Forest Ecology and Management*, 2004, **189**: 331–343
- [27] Liao G-R (廖观荣), Zhong J-H (钟继洪), Li S-Y (李淑仪), *et al.* The nutrient cycling and balance of *Eucalyptus* plantation ecosystem. II. The nutrient cycling of *Eucalyptus* plantation ecosystem. *Ecology and Environment* (生态环境), 2003, **12**(3): 296–299 (in Chinese)
- [28] Florence RG. Cultural-problems of *Eucalyptus* as exotics. *Commonwealth Forestry Review*, 1986, **65**: 141–163
- [29] Hopmans P, Stewart HTL, Flinn DW. Impacts of harvesting on nutrients in a eucalypt ecosystem in South-eastern Australia. *Forest Ecology and Management*, 1993, **59**: 29–51
- [30] McLaughlin DL, Chiu M, Durigon D, *et al.* The Ontario hardwood forest health survey: 1986–1998. *Forestry Chronicle*, 2000, **76**: 783–791

作者简介 马 强,男,1978 年生,助理研究员. 主要从事生态系统水分、养分循环研究,发表论文 30 余篇. E-mail: qma@iae.ac.cn

责任编辑 李凤琴
