

不同种植年限尾巨桉人工林叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征

许宇星, 王志超, 张丽丽, 竹万宽, 杜阿朋*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: [目的] 为了解雷州半岛尾巨桉速生人工林生态系统的 C、N、P 分配格局及化学计量特征。[方法] 采用空间换时间的方法, 选取雷州半岛 4 种不同林龄 (1, 3, 5, 7 a) 的尾巨桉人工林为研究对象, 对尾巨桉叶片、凋落物及土壤的 C、N、P 含量及化学计量特征进行测定分析。[结果] 表明: C、N 含量表现为叶片 > 凋落物 > 土壤, P 含量表现为叶片 > 土壤 > 凋落物, 且 3 个库间差异显著; 土壤的 C 含量随林龄增加而增加, N、P 含量差异不显著, 土壤 C:N 随林龄的增加而增加, 说明土壤有机质分解速率逐渐下降; 凋落物的 C:N 为 54.07 ~ 92.18 (>25), 表明尾巨桉林下凋落物分解速率较慢, N 元素成为主要限制凋落物分解的元素, 凋落物的 C:N 随林龄的增加先增加后下降, 凋落物分解速度先降低后升高; 叶片的 N:P 为 10.80 ~ 12.98, 说明中幼林龄尾巨桉受 N 限制较明显。相关性分析表明: 凋落物养分元素含量受叶片限制, 土壤养分含量受凋落物限制, 表明生态系统内部 C、N、P 元素在植物、凋落物与土壤之间实现了运输和转换。[结论] 雷州半岛尾巨桉中、幼林龄时期土壤有机质及凋落物分解速率较慢; 随林龄的增加, 土壤有机质、凋落物分解速率下降, N 元素成为其主要分解限制性元素, 林分生长受 N 限制明显。

关键词: 尾巨桉人工林; 叶片; 凋落物; 土壤; 化学计量特征

中图分类号: S718.55

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)06-0168-07

The Stoichiometric Characteristics of C, N and P in Leaf-litter-soil of Different Aged *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantations

XU Yu-xing, WANG Zhi-chao, ZHANG Li-li, ZHU Wan-kuan, DU A-peng

(China Eucalypt Research Centre, Zhanjiang 524022, Guangdong, China)

Abstract: [Objective] To understand the distribution pattern of carbon, nitrogen and phosphorus and the stoichiometric characteristics of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* fast-growing plantation ecosystem in the Leizhou Peninsula. [Method] The temporal-spatial method was used to select four *E. urophylla* × *E. grandis* fast-growing plantations with different ages (1, 3, 5, 7a) as the subjects. The contents of C, N, P and their ratio were analyzed in the leaf, litter, and soil. [Result] The results revealed that the C and N contents followed the pattern of leaf > litter > soil, the content of P followed the pattern of leaf > soil > litter and there was an obvious difference among the three warehouses. Soil C content could increase with the raising of plantation age; but N and P differed little. The ratio of soil C:N increased with rising age, indicating that soil decomposition rate declined gradually. The ratio of litter C:N varied in the range of 54.07 - 92.18 (>25), increased at first and then declined. It showed that litter decomposition rate was comparatively low and restricted by N. The ratio of N:P in leaf was between 10.8 and 12.98 which also demonstrated that plant growth was limited by N. The correlation analysis showed that the litter N content was

收稿日期: 2016-07-31 修回日期: 2018-04-11

基金项目: 广东省林业科技创新项目(2014KJCX021-04, 2013KJCX014-03); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站资助(2016-LYPT-DW-126)

作者简介: 许宇星(1987—), 男, 工程师, 主要从事桉树可持续经营研究. E-mail: wsxyx1987@163.com

* 通讯作者: 博士, 副研究员, 主要从事桉树林生态研究. E-mail: dapzj@163.com

limited by the leaf, and the soil N was limited by the litter. Inside the ecosystem, the C, N and P elements had realized the transportation and transformation among the plants, litter and soil. [Conclusion] The decomposition rate of soil organic matter and litter of young and middle aged *E. urophylla* × *E. grandis* plantations on the Leizhou Peninsula is comparatively slow. The soil organic matter and litter decomposition rate decline with age and is restricted by N. The growth of plantation is also limited by N.

Keywords: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation; leaf; litter; soil; stoichiometric characteristics

化学计量学作为研究化学元素平衡的科学, 主要强调活有机体主要组成元素(特别是 C、N、P) 的化学计量关系。目前, 国内对化学计量学方面的研究越来越多, 主要集中在区域生态化学计量学特征及植物器官的元素生态化学计量研究, 对不同演替阶段、生境下森林生态系统内各组分化学计量特征居多^[1-3], 也有关于草地、草甸及湿地生态系统的化学计量特征的研究^[4-6]。桉树(*Eucalyptus* spp.) 作为中国华南地区最重要的速生丰产树种, 种植面积大, 材质好且生产力高, 已成为我国南方主要战略性树种之一; 然而, 林分结构单一、连栽及其他粗放管理模式使桉树人工林产量逐代下降, 林地土壤理化性质变差等问题日益严重。目前, 国内对桉树速生人工林生态系统内 C、N、P 养分循环方面的研究相对缺乏, 仅有部分学者对桉树人工林林下土壤化学计量特征及养分动态进行研究^[7-9], 而对短轮伐期下桉树人工林植物、凋落物、土壤养分之间的关系及规律方面的报道较少。因此, 本研究利用时空互代的方法, 以 1~7 年生中幼龄尾巨桉为研究对象, 深

入了解不同林龄尾巨桉叶片、凋落物及土壤的 C、N、P 含量及其 C:N、C:P、N:P 化学计量比的变化规律, 以期为雷州半岛桉树速生人工林科学合理经营提供参考。

1 研究地概况及样地设置

研究地位于南方国家级林木种苗示范基地, 属北热带湿润大区雷琼区北缘, 海洋性季风气候, 年降水量 1 567 mm, 5—9 月为雨季, 雨量占全年的 85.5%; 年平均气温 23.1℃, 年相对湿度 80.4%; 土壤类型主要为砖红壤, 有机质含量在 1% 以上, 偏酸性(pH 值 4.5~5.3)^[10-11]。试验林为种苗基地内 4 个不同林龄(1、3、5、7 年生)的尾巨桉林分, 由来源于种苗基地培育的生长均一(苗高:(25±2)cm)的网袋组育苗造林, 初植株行距为 2 m × 3 m, 造林前施等量(666 kg·hm⁻²)专业基肥(N:P₂O₅:K₂O = 7:12:6), 造林后对林分进行定期除杂维护。林分具体特征见表 1。

表 1 试验地林分概况

Table 1 Basic situation of different forest plantations

林龄 Age/a	纬度(N) Latitude	经度(E) Longitude	海拔 Altitude/m	坡度 Slope/(°)	坡向 Aspect	胸径 DBH/cm	树高 Height/m	密度 Density/ (Plant · hm ⁻²)
1	21°15'700"	110°06'110"	122	10	NE	4.70	5.07	1 275
3	21°15'840"	110°05'839"	88	0	-	10.95	12.51	1 200
5	21°15'713"	110°06'085"	128	8	NE	17.33	15.45	1 110
7	21°15'561"	110°06'359"	144	8	E	21.50	20.90	840

2 材料与方

2.1 样地设置与样品采集

2015 年 6—7 月, 在备选的 4 个林分中分别布设 3 个 20 m × 20 m 各方面条件均一的标准地, 每个标准地间距大于 10 m, 对每个样方内的每木进行检尺, 根据平均树高和胸径在各样方内选取 3 株生长良好的个体作为取样对象, 每个林分共计 9 株样木, 尽量选取完全伸展、无病虫害的成熟叶片。具体取样方法: 根据树冠不同层次及方位, 利用高枝剪或人

工爬树的方法采集树冠上中下各东南西北 4 个方向的小枝, 获取叶片的混合样品, 将每个样方内 3 株样木所采集叶片混合作为 1 个重复, 每个林分共计 3 个重复^[12]; 同时, 在每个样方内以 S 形选择 5 个 1 m × 1 m 的小样地收集地表凋落物, 在选取凋落物的小样地下使用土钻法钻取土样, 取样深度 0~20 cm, 每 10 cm 一层, 充分混合 5 个小样地内采集的凋落物及各层次土壤, 并记为 1 个重复, 每个林分取样 3 个重复。仔细除去其中可见植物残体及土壤动物, 风干过筛后待测^[13]。

2.2 样品分析与数据处理

本试验中,土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定,叶片及凋落物全氮含量采用 $H_2SO_4-H_2O_2$ 扩散法测定,土壤全 N 采用开氏法测定,叶片及凋落物全 P 采用钒钼黄比色法测定,土壤全 P 采用碱熔-钼锑抗比色法测定。数据采用 SPSS18.0 软件及 Office 2010 软件进行单因素方差分析和相关性分析,并利用邓肯检验法对相关指标进行多重比较。

3 结果与分析

3.1 不同林龄叶片、凋落物、土壤的 C、N、P 含量总体特征

表 2 表明:有机 C 含量总体表现为叶片 > 凋落物 > 土壤,叶片和凋落物的有机 C 含量显著高于土壤,其中,不同林龄间叶片的有机 C 含量为 $505.03 \sim 536.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;凋落物的有机 C 含量为 $480.83 \sim 511.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,且第 7 年的大于其他各年限,叶片与凋落物不同林龄间均差异不显著。土壤的有机 C 含量为 $17.70 \sim 28.20 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,1 年生林下土壤的有机 C 含量显著低于其他林龄,说明随着林龄增加,有机质在林分土壤中出现积累。

表 2 不同林龄尾巨桉叶片、凋落物、土壤的平均养分含量

Table 2 The average nutrient content of leaf, litter and soil in different ages of *Eucalyptus urophylla* × *Eucalyptus grandis*

林龄 Age/a	有机 C 含量 Organic C/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			全 N 含量 Total N/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)			全 P 含量 Total P/($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)		
	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil
1	536.80 ± 19.9Aa	497.37 ± 41.8Aa	17.70 ± 2.0Bb	19.69 ± 0.7Aab	9.18 ± 0.4Ba	1.19 ± 0.1Ca	1.67 ± 0.1Aa	0.69 ± 0.1Ba	0.85 ± 0.0Ba
3	505.03 ± 10.5Aa	485.20 ± 14.6Aa	27.47 ± 2.2Ba	20.80 ± 1.8Aa	5.30 ± 0.3Bb	1.76 ± 0.2Ca	1.62 ± 0.1Aa	0.40 ± 0.0Cc	0.93 ± 0.1Ba
5	515.27 ± 17.8Aa	480.83 ± 13.7Aa	27.67 ± 3.7Ba	16.69 ± 1.0Abc	5.28 ± 0.1Bb	1.49 ± 0.1Ca	1.58 ± 0.2Aa	0.44 ± 0.1Bab	0.73 ± 0.0Ba
7	513.43 ± 12.8Aa	511.50 ± 11.3Aa	28.20 ± 1.2Ba	15.51 ± 0.2Ac	6.20 ± 0.7Bb	1.54 ± 0.4Ca	1.34 ± 0.1Aa	0.45 ± 0.1Cab	0.88 ± 0.1Ba

注:同行不同大写字母代表相同林龄不同库间差异显著,同列不同小写字母代表相同库不同林龄间差异显著 ($P < 0.05$),下同。

Note: The different uppercase letters in the same row represent significant difference among different warehouses; the different lowercase letters in the same column represent significant difference between the different forest age. ($P < 0.05$).

3.2 不同林龄叶片-凋落物-土壤生态化学计量比总体特征

尾巨桉叶片的 C:N 为 $24.72 \sim 33.12$,凋落物的 C:N 为 $54.07 \sim 92.18$,土壤的 C:N 为 $14.89 \sim 22.03$ (表 3)。除 1 年生林下凋落物的 C:N 显著低于 3、5、7 年生外,叶片及土壤的 C:N 林龄间均差异不显著。叶片的 C:N 随林龄的增加先减后增,凋落物的 C:N 随林龄的增加先增后减,且 1、7 年生凋落物 C:N 低于或显著低于 3、5 年生凋落物 C:N,说明 1 年生和 7 年生林下凋落物分解速率大于 3 年生和 5 年生;不同林龄土壤的 C:N 随林龄的增加呈增加

全 N 总体表现为:叶片 > 凋落物 > 土壤(表 2),且差异显著。叶片的全 N 含量为 $15.51 \sim 20.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,1 年生和 3 年生叶片全 N 高于或显著高于 5 年生和 7 年生叶片全 N 含量($P < 0.05$)。凋落物的全 N 含量为 $5.30 \sim 9.18 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$;随林龄的增加,叶片的全 N 含量先增后减,凋落物的全 N 含量显著下降后略有回升,土壤的全 N 含量为 $1.19 \sim 1.76 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,不同林龄间差异不显著,3 年生林下土壤的全 N 含量高于其他林龄。

全 P 含量表现为:叶片 > 土壤 > 凋落物(表 2),且叶片全 P 含量显著高于凋落物和土壤;叶片的全 P 含量为 $1.58 \sim 1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,凋落物的全 P 含量为 $0.40 \sim 0.69 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤的全 P 含量为 $0.73 \sim 0.93 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。单因素方差分析表明:林龄对凋落物的全 P 含量影响显著,对叶片及土壤的全 P 含量影响不显著。多重比较显示,随着凋落物的分解,3 年生尾巨桉林下凋落物的全 P 含量显著低于 1 年生,但 5 年生和 7 年生林下凋落物全 P 含量有所回升,且显著高于 3 年生林下凋落物全 P 含量,这可能与凋落物分解过程中复杂的养分释放状态有关。尾巨桉叶片的全 P 含量随林龄增加呈下降趋势,但差异不显著。

趋势。

尾巨桉叶片的 C:P 为 $311.99 \sim 386.59$,凋落物的 C:P 为 $751.5 \sim 1221.9$,土壤的 C:P 为 $21.00 \sim 38.06$ (表 3)。随林龄的增加,叶片和凋落物的 C:P 变化规律与 C:N 的相同,但林龄对其影响差异不显著;土壤的 C:P 随林龄的增加先增加后有所下降。

尾巨桉叶片的 N:P 为 $10.80 \sim 12.98$,凋落物的 N:P 为 $12.93 \sim 14.18$,土壤的 N:P 为 $1.40 \sim 2.05$,但林龄对叶片、凋落物、土壤的 N:P 影响均差异不显著。随林龄的增加,叶片与土壤的 N:P 先增后减,凋落物的 N:P 先减后增。

表3 不同林龄尾巨桉叶片、凋落物、土壤的碳、氮、磷化学计量比

Table 3 Stoichiometry ration of C, N, P contents in leaf, litter and soil in different ages of

Eucalyptus urophylla × *Eucalyptus grandis*

林龄 Age/a	C:N			C:P			N:P		
	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil	叶片 Leaf	凋落物 Litter	土壤 Soil
1	27.30 ± 1.1a	54.07 ± 3.1b	14.89 ± 1.2a	323.77 ± 21.4a	751.5 ± 116a	21.00 ± 3.2b	11.84 ± 0.4a	13.79 ± 1.7a	1.40 ± 0.1a
3	24.72 ± 2.5a	92.18 ± 6.3a	15.83 ± 1.7a	311.99 ± 8.8a	1 202.4 ± 81a	30.30 ± 3.4ab	12.98 ± 1.8a	13.05 ± 0.2a	1.99 ± 0.4a
5	31.22 ± 2.8a	91.05 ± 2.6a	18.48 ± 1.4a	330.95 ± 28.9a	1 183.8 ± 237a	38.06 ± 4.3a	10.80 ± 1.4a	12.93 ± 2.4a	2.05 ± 0.1a
7	33.12 ± 1.0a	84.88 ± 10.3a	22.03 ± 7.0a	386.59 ± 22.9a	1 221.9 ± 216a	32.29 ± 3.1ab	11.73 ± 1.0a	14.18 ± 1.1a	1.81 ± 0.5a

3.3 叶片-凋落物-土壤的化学计量关系

对比叶片、凋落物、土壤的 C、N、P 及其化学计量比相关关系(表 4)可知:凋落物的 N 含量与凋落物的 P 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),叶片的 C:N 与叶片的 N:P 呈极显著负相关,土壤的 C 含量与土

壤的 N 含量呈显著正相关($P < 0.05$),凋落物的 N 含量与土壤的 N 含量呈极显著负相关,叶片的 C:P 与凋落物的 C:P 呈显著正相关,凋落物的 C:N 与土壤的 C:P 呈现极显著正相关,叶片与土壤各元素及化学计量比相关性均不显著。

表4 尾巨桉叶片、凋落物、土壤间 C、N、P 的关系

Table 4 The Correlations of C、N、P and their stoichiometry features

项目	叶片 Leaf						凋落物 litter						土壤 soil						
	C	N	P	C:N	C:P	N:P	C	N	P	C:N	C:P	N:P	C	N	P	C:N	C:P	N:P	
叶片 Leaf	N	-0.19	1.00																
	P	0.38	0.22	1.00															
	C:N	0.45	-0.95**	-0.12	1.00														
	C:P	-0.04	-0.38	-0.93**	0.35	1.00													
	N:P	-0.48	0.68*	-0.56	-0.72**	0.37	1.00												
凋落物 litter	C	-0.13	-0.15	-0.46	0.14	0.45	0.19	1.00											
	N	0.48	0.13	0.27	-0.04	-0.13	0.15	0.20	1.00										
	P	0.16	0.09	0.49	-0.09	-0.44	-0.31	-0.08	0.82**	1.00									
	C:N	-0.57	-0.09	-0.44	-0.14	0.26	0.31	0.08	-0.95**	-0.84**	1.00								
	C:P	-0.27	-0.15	-0.65*	0.11	0.59*	0.37	0.30	-0.71**	-0.92*	0.81**	1.00							
土壤 Soil	N:P	0.37	-0.08	-0.51	0.18	0.64*	0.26	0.39	0.02	-0.53	0.08	0.64*	1.00						
	C	-0.57	-0.17	-0.05	0.07	-0.13	-0.05	-0.14	-0.73**	-0.33	0.68**	0.24	-0.50	1.00					
	N	-0.47	0.17	-0.08	-0.22	-0.08	0.25	-0.04	-0.67**	-0.09	0.71**	0.55	0.03	0.60*	1.00				
	P	0.12	0.26	0.09	-0.22	-0.09	0.11	0.12	0.21	0.13	-0.24	-0.25	-0.06	0.08	-0.20	1.00			
	C:N	-0.02	-0.35	-1.12	0.32	0.12	-0.22	-0.05	0.07	0.29	-0.16	-0.34	-0.42	0.26	-0.58	0.35	1.00		
土壤 Soil	C:P	-0.53	-0.29	-0.06	0.18	-0.09	-0.12	-0.22	-0.76**	-0.36	0.72**	0.32	-0.43	0.84**	0.61*	-0.48	0.04	1.00	
	N:P	-0.47	0.01	-0.12	-0.08	-0.02	0.17	-0.11	-0.70**	-0.56	0.74	0.57	0.01	0.51	0.91**	-0.58*	-0.57	0.75**	1.00

注: * 表示 $P < 0.05$; ** 表示 $P < 0.01$ 。

Note: * represents $P < 0.05$; ** represents $P < 0.01$.

4 讨论

4.1 不同林龄尾巨桉林下土壤 C、N、P 生态化学计量特征

土壤养分作为森林生态系统植物体营养元素的主要来源,其 C、N、P 含量及化学计量特征可影响植物体各元素的平衡^[14-15]。本研究中,不同林龄尾巨桉林下土壤 0~20 cm 土层的有机 C 含量为 17.7~28.2 g · kg⁻¹,全 N 含量为 1.19~1.76 g · kg⁻¹,全 P 含量为 0.73~0.93 g · kg⁻¹,其中,有机 C 含量略高于全国土壤有机 C 含量均值(24.56 g · kg⁻¹)^[16]

(除 1 年生林下土壤),与闽南山区 2~6 年生尾巨桉林下土壤的有机 C 含量相似(28.07~28.33 g · kg⁻¹)^[9],低于广西雅长兰科植物自然保护区土壤的有机 C 含量均值(67.14 g · kg⁻¹)^[17];全 N 含量低于闽南山区 2~6 年生尾巨桉林下土壤的全 N 含量(1.80~1.88 g · kg⁻¹)^[9]和广西雅长兰科植物自然保护区土壤的全 N 含量均值(3.22 g · kg⁻¹)^[17],高于大别山东南边缘马尾松纯林土壤的全 N 含量(1.48 g · kg⁻¹)^[18];全 P 含量低于广西雅长兰科植物自然保护区土壤的全 P 含量均值(1.15 g · kg⁻¹)^[17],高于闽南山区 2~6 年生尾巨桉林下土壤

的全 P 含量($0.39 \sim 0.45 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[9],原因可能是本研究样地和闽南山区均属于亚热带地区,温度较高、降雨充沛,有利于凋落物的分解和养分循环,使土壤有机 C 含量略高于全国平均值,而与闽南山区相似,土壤 N、P 含量可能受造林初期施入基肥含量的不同而有所差别;广西雅长兰科植物自然保护区虽属中亚热带季风区,且年均降雨量($1\ 051.7 \text{ mm}$)低于亚热带,但保护区内森林连片分布,原生性较强^[17],有机质积累深厚,因此,土壤的 C、N、P 含量均高于本研究闽南山区土壤。本研究的 4 个林龄中,尾巨桉林下土壤的有机 C 含量随林龄的增加显著增加,7 年生林下土壤的有机 C 含量达到最大值,对土壤 C 已产生累积作用,这与前人研究结果一致^[2,19]。土壤的全 N、全 P 含量随林龄变化不明显,但土壤 N 含量与 C 含量呈极显著正相关($P < 0.01$),而与 P 含量无相关性,这与庞圣江等^[24]研究桂西北不同森林类型土壤养分分布及黄承标等^[17]研究广西雅长兰科植物自然保护区土壤养分分布所得结果相似,原因可能在于土壤 N 含量主要来源于凋落物的分解及大气沉降,不仅受到成土母质的影响,而且决定于凋落物分解速率及植物对元素的吸收利用,因此,空间变异性较大^[14];P 元素主要来源于岩石的风化及凋落物的分解,而岩石的风化作用是一个漫长而稳定的过程,其对土壤的 P 元素含量影响较大,因而存在较小的空间变异性^[14,20]。

土壤 C:N 是土壤质量的敏感指标,是土壤有机质组成及土壤资源有效性的重要指标^[21]。一般土壤 C:N 与土壤有机质分解速率成反比^[21],C:N 较低,表明有机质矿化作用较快^[3]。本研究中,土壤 C:N 随林龄增加而增加,说明尾巨桉幼龄和中龄期林下土壤 C、N 循环速率降低,随林龄的增加,土壤有机质分解速率下降。

4.2 不同林龄尾巨桉凋落物 C、N、P 生态化学计量特征

森林凋落物作为森林土壤有机质的主要来源,是物质循环和能量流动的主要途径^[22],凋落物分解速率的提高,可促进土壤的营养循环,改善土壤质量^[23]。有研究表明,当凋落物 N 含量升高或 C:N 值降低会加快凋落物分解速率,加速养分循环^[34]。凋落物 C:N > 25 时,对微生物具有氮限制性,影响凋落物的分解^[25]。当 C:N < 40 时,凋落物开始出现矿化分解并释放净 N^[26]。本研究中,凋落物 C:N 为 $54.07 \sim 92.18$,随林龄的增加呈先增加后下降趋势,

表明尾巨桉林下调落物分解速率较慢,N 元素成为主要限制凋落物分解的元素。1 年生和 7 年生林下调落物分解速率大于 3 年生和 5 年生,原因可能是第 1 年为防止杂草影响桉树苗木生长,对林分进行砍杂抚育,7 年生尾巨桉林下已形成明显的垂直结构,凋落物的组分不仅包括尾巨桉枝叶,灌木草本所占比例增大,根据 Hättenschwiler 等^[27]的研究结果,相比单一凋落物,含多种不同组分的凋落物会加速其分解。因此,含较多杂草和灌木成分的 1 年生和 7 年生林下调落物分解速率大于成分相对单一的 3 年生和 5 年生林下调落物。

4.3 不同林龄尾巨桉叶片 C、N、P 生态化学计量特征

不同林龄尾巨桉叶片 C、N、P 含量分别为 $505.03 \sim 536.8$ 、 $15.51 \sim 20.80$ 、 $1.58 \sim 1.67 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其中,叶片的 C 含量高于全球 C 含量平均值($464 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28]及中亚热带针阔混交林乔木层叶片平均 C 含量($460.73 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[29];叶片的 N 含量低于全球植物叶片及我国植物叶片的平均 N 含量(20.6 、 $20.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28,30],高于阿拉善 54 种荒漠植物叶片的平均 N 含量($10.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[31];叶片的 P 含量高于我国植物叶片平均 P 含量($1.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),但低于全球叶片的 P 含量平均值($1.99 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[28]。植物叶片 C 元素和限制性元素 N、P 共同作用,调节植物的生长^[32],叶片 C:P 与 C:N 反映了植物的营养利用效率及对 C 的固定能力^[33]。本研究中,叶片 C:N、C:P 含量分别为 $24.72 \sim 33.12$ 、 $311.99 \sim 386.59$,随林龄变化差异不显著,说明 1 ~ 7 年生尾巨桉林分仍处于生长快速的幼龄和中龄期,生长和固碳速率并未出现显著差异。与同龄林相比,尾巨桉 5 年生和 7 年生叶片的 C:N、C:P 分别为 $31.22 \sim 33.12$ 、 $330.95 \sim 386.59$,C:N 与 5 年生和 10 年生华北落叶松的 C:N ($31.8 \sim 32$) 相近,但 C:P 高于华北落叶松的 C:P (301.8),说明尾巨桉对于 N、P 的利用效率高于华北落叶松。

叶片作为植物的主要光合器官,其 N:P 可作为衡量植物个体或群落养分状况的指标^[34]。Herbert^[35]通过对不同国家桉树人工林研究发现,巨桉叶片的 N:P 低于 $11:1 \sim 18:1$ 这个最佳值范围,则桉树林受 N 限制,如果 N:P 高于这个范围,则受 P 限制。Koerselman 等^[34]对欧洲湿地植物研究认为,当植物的 N:P < 14 时,植物生长表现为受 N 限制;当 N:P > 16 时,表现为受 P 限制;当 $14 < N:P < 16$ 时,

则受 N、P 共同限制。本研究中,不同林龄尾巨桉叶片的 N:P 为 10.80 ~ 12.98,若按照 Herbert 和 Kerselman 等的标准,该地区中幼林龄尾巨桉均受 N 元素限制,这与 He 等^[36]研究发现的我国南亚热带生物生长受 P 限制较为明显的结论相悖,原因可能是桉树人工林栽植前期,为保证成活率会投放少量磷肥作为基肥,从而导致尾巨桉中幼林龄不受 P 元素限制,但随着林龄的增加,这种现象可能发生改变。因此,在人工林抚育过程中,特别是桉树中幼林时期,建议合理施用 N、P 肥以改变土壤养分状况,防止因为一种元素的施用而导致另一种元素受限的现象发生。

4.4 叶片-凋落物-土壤 C、N、P 生态化学计量的关系

根据叶片、凋落物及土壤的 C、N、P 相关性分析结果可知,叶片、凋落物、土壤间的 C、N、P 含量及比值均存在不同程度的相关性,叶片的 C:P 与凋落物的 C:P 呈显著正相关($P < 0.05$),凋落物的 C:N 与土壤的 C、N、C:P 均呈现极显著正相关($P < 0.01$),说明凋落物养分元素含量受叶片限制,土壤养分含量受凋落物限制,生态系统内部 C、N、P 元素的循环在植物、凋落物与土壤之间实现了运输和转换^[37]。植物从土壤中吸收养分供其生长,叶片通过光合作用合成有机物质,植物在完成自身生活史后以凋落物分解的形式将养分归还于土壤或损失^[21],这也造就了不同林龄 C、N 元素叶片 > 凋落物 > 土壤的养分格局,但本研究发现,不同林龄尾巨桉的 P 元素出现叶片 > 土壤 > 凋落物的养分格局,可能因为中幼林龄时期尾巨桉受 N 限制,从而造成对 P 元素的暂时性积累,随着林龄增加,N、P 元素的分配格局可能发生变化。后续研究将结合尾巨桉近熟林及成熟林对这一问题进行进一步探讨。

5 结论

雷州半岛尾巨桉中、幼林龄时期对于 N、P 元素利用率较高,但林下土壤有机质及凋落物分解速率较慢;随林龄的增加,土壤有机质、凋落物分解速率下降,N 元素成为其主要分解限制性元素。在本研究的 4 个林龄中,林下土壤 C 含量随林龄的增加显著增加,7 年生林下土壤 C 含量达到最大值,对土壤 C 已产生累积作用。本试验区内中、幼林龄人工林土壤 P 元素相对充足,林木生长均受 N 元素限制;因此,建议雷州半岛速生人工林种植过程中,及时补

充林木生长的限制性营养元素,在提高人工林产量的同时,也可避免土壤养分的过度消耗。

参考文献:

- [1] 周丽,张卫强,唐洪辉,等. 南亚热带中幼龄针阔混交林生态化学计量特征[J]. 生态环境学报,2014,23(11): 1732-1738.
- [2] 郑德祥,蔡杨新,杨玉洁,等. 闽北闽粤栲天然林主要树种幼树器官碳氮化学计量特征分析[J]. 林业科学研究,2017,30(1): 154-159.
- [3] 曹娟,闫文德,项文化,等. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征[J]. 林业科学,2015,51(7): 1-8.
- [4] 陈奶寿,张秋芳,陈坦,等. 退化红壤恢复过程中芒萁的 N、P 化学计量特征[J]. 林业科学研究,2016,29(5): 735-742.
- [5] 王维奇,徐玲琳,曾从盛,等. 河口湿地植物活体-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 生态学报,2011,31(23): 7119-7124.
- [6] 陈军强,张蕊,侯尧宸,等. 亚高山草甸植物群落物种多样性与群落 C、N、P 生态化学计量的关系[J]. 植物生态学报,2013,37(11): 979-987.
- [7] 张利丽,杜阿朋,刘国粹,等. 不同整地方式尾巨桉林地土壤生态化学计量学特征[J]. 桉树科技,2015,32(3): 28-33.
- [8] 李桃祯,谭长强,陶世红,等. 不同肥料处理对尾巨桉土壤和叶片化学计量的影响[J]. 福建农业学报,2016,31(5): 491-496.
- [9] 樊后保,袁颖红,廖迎春,等. 闽南山区连续年龄序列桉树人工林土壤养分动态[J]. 应用与环境生物学报,2009,15(6): 756-760.
- [10] 钟继洪,李淑仪,蓝佩玲,等. 雷州半岛桉树人工林土壤肥力特征及其成因[J]. 水土保持通报,2005,25(3): 44-48.
- [11] 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.
- [12] 宋广艳,何念鹏,侯继华. 中国不同地带性森林乔木叶片热值特征及其影响因素[J]. 林业科学研究,2016,29(1): 133-139.
- [13] 朱秋莲,邢肖毅,张宏,等. 黄土丘陵沟壑区不同植被区土壤生态化学计量特征[J]. 生态学报,2013,33(15): 4674-4682.
- [14] 庞圣江,张培,贾宏炎,等. 桂西北不同森林类型土壤生态化学计量特征[J]. 中国农学通报,2015,31(1): 17-23.
- [15] 陈亚梅,刘洋,张健,等. 巨桉混交林不同树种 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学杂志,2015,34(8): 2096-2102.
- [16] 赵维俊,刘贤德,金铭,等. 祁连山青海云杉林叶片-枯落物-土壤的碳氮磷生态化学计量特征[J]. 土壤学报,2016,53(2): 477-489.
- [17] 黄承标,冯昌林,李保平,等. 广西雅长兰科植物分布区土壤理化性质[J]. 东北林业大学学报,2010,38(1): 56-59.
- [18] 秦娟,孔海燕,刘华. 马尾松不同林型土壤 C、N、P、K 的化学计量特征[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2016,44(2): 68-76,82.
- [19] Zhou G, Liu S, Li Z, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. Science, 2006, 314(5804): 1416-1417.
- [20] 刘万德,苏建荣,李帅锋,等. 云南普洱季风常绿阔叶林演替系

- 列植物和土壤 C、N、P 化学计量特征[J]. 生态学报, 2010, 30(23): 6581–6590.
- [21] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, 28(8): 3937–3947.
- [22] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils[J]. *Forest Ecology & Management*, 2000, 133(1–2): 13–22.
- [23] 葛晓改, 肖文发, 曾立雄, 等. 不同林龄马尾松凋落物基质质量与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2012, 32(3): 852–862.
- [24] Aerts R, Chapin F S. The Mineral Nutrition of Wild Plants Revisited; A Re-evaluation of Processes and Patterns[J]. *Advances in Ecological Research*, 2000, 30(8): 1–67.
- [25] 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.
- [26] Parton W, Silver W L, Burke I C, *et al.* Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition[J]. *Science*, 2007, 315(5810): 361–364.
- [27] Stephan H, Helene B J. Carbon quality rather than stoichiometry controls litter decomposition in a tropical rain forest[J]. *Journal of Ecology*, 2010, 98(4): 754–763.
- [28] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, *et al.* Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs[J]. *Nature*, 2000, 408(6812): 578–580.
- [29] 宫 超, 汪思龙, 曾掌权, 等. 中亚热带常绿阔叶林不同演替阶段碳储量与格局特征[J]. 生态学杂志, 2011, 30(9): 1935–1941.
- [30] Han W X, Fang J Y, Guo D L, *et al.* Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005, 168(2): 377–385.
- [31] 张 珂, 何明珠, 李新荣, 等. 阿拉善荒漠典型植物叶片碳、氮、磷化学计量特征[J]. 生态学报, 2014, 34(22): 6538–6547.
- [32] Elser J J, Acharya K, Kyle M, *et al.* Growth rate – stoichiometry couplings in diverse biota[J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936–943.
- [33] Herbert D A, Mathew W, Edward B R. A Model Analysis of N and P Limitation on Carbon Accumulation in Amazonian Secondary Forest after Alternate Land-Use Abandonment[J]. *Biogeochemistry*, 2003, 65(1): 121–150.
- [34] Willem K, Arthur F M. Meuleman. The vegetation N:P ratio: a new tool to detect the nature of nutrient limitation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 1996, 33(6): 1441–1450.
- [35] Herbert M A. Fertilizer and eucalypt plantations in South Africa [M]//Attwill P M, Adams M A. Nutrition of Eucalypts. Collingwood; CSIRO Publishing, 1996: 303–325.
- [36] He Y Q, Zhu Y G, Smith S E, *et al.* Interactions between soil moisture content and phosphorus supply in spring wheat plants grown in pot culture[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2002, 25(4): 913–925.
- [37] Megrodoy M E, Tanguy D, Lars O H. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide; implications of terrestrial redfield-type ratios[J]. *Ecology*, 2008, 85(9): 2390–2401.

(责任编辑:徐玉秀)