

网络出版时间:2017-12-27 09:55

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2018.03.012

网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20171227.0954.024.html>

# 不同品种桉树林生活叶-凋落物-土壤 碳氮磷化学计量特征

许宇星, 王志超, 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】了解雷州半岛不同品种桉树(*Eucalyptus* spp.)速生人工林生态系统的碳、氮、磷分配格局及化学计量特征,为其科学经营提供依据。【方法】选取雷州半岛赤桉(*E. camaldulensis*)、粗皮桉(*E. pellida*)、托里桉(*E. torelliana*)、尾叶桉(*E. urophylla*)人工林为研究对象,以湿加松(*P. elliottii*×*P. oaribaea*)人工林为对照,对各桉树人工林生活叶、凋落物及土壤(0~20 cm)的碳、氮、磷含量及化学计量特征进行测定分析。【结果】各桉树林分有机碳和全氮含量均表现为生活叶>凋落物>土壤,且其有机碳和全氮含量均存在显著差异;不同桉树品种生活叶全氮含量显著高于湿加松,有机碳含量均显著低于湿加松;托里桉凋落物全氮含量高于或显著高于其他桉树品种,与湿加松无显著差异;湿加松土壤全磷含量显著高于各品种桉树土壤;不同品种桉树人工林凋落物 C/N 为 39.43~63.35,表明研究区人工林凋落物分解速率较慢,氮元素成为限制凋落物分解的主要元素;8 a 生赤桉和 10 a 生粗皮桉土壤 C/N 显著高于 10 a 生托里桉、高于 15 a 生尾叶桉和湿加松,说明 10 a 生托里桉及 15 a 生尾叶桉和湿加松表层土壤具有较快的矿化速率;相关性分析表明,生态系统内部碳、氮、磷元素已在植物、凋落物与土壤之间实现了运输和转换。【结论】雷州半岛不同品种桉树及湿加松人工林下调落物分解速率较慢,氮元素是限制分解的主要元素;相比各桉树品种,湿加松具有较高的植物营养利用效率及固碳能力;不同桉树品种及湿加松生长限制性元素有所不同,建议在雷州半岛人工林种植过程中,及时补充多元素复合肥,充分发挥氮、磷、钾等元素的使用效果。

**【关键词】** 桉树;湿加松;生活叶;凋落物;土壤;化学计量特征

**【中图分类号】** S714.5

**【文献标志码】** A

**【文章编号】** 1671-9387(2018)03-0094-07

## Stoichiometric characteristics of C, N and P in leaf-litter-soil of different *Eucalyptus* varieties

XU Yuxing, WANG Zhichao, ZHU Wankuan, DU Apeng

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

**Abstract:** 【Objective】 This study analyzed the distribution pattern and stoichiometric characteristics of carbon (C), nitrogen (N) and phosphorus (P) in different *Eucalyptus* plantations on the Leizhou Peninsula to provide theoretical basis for scientific management. 【Method】 *E. camaldulensis*, *E. pellida*, *E. torelliana* and *E. urophylla* fast-growing forest stands were selected to measure and analyze contents and stoichiometric characteristics of C, N and P in leaf, litter, and soil (0–20 cm) with *P. elliottii*×*P. oaribaea* as control. 【Result】 Organic C and total N contents of different *Eucalyptus* plantations showed the order of leaf > litter > soil with significant differences. Total N contents of *Eucalyptus* plantations in leaf were significantly higher than the control while organic C had opposite results. Total N content of *E. torelliana* litter was

**【收稿日期】** 2017-02-17

**【基金项目】** “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600505);广东省林业科技创新项目(2014KJJCX021-04, 2013KJJCX014-03);广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站项目(2016-LYPT-DW-126)

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

**【通信作者】** 杜阿朋(1979—),男,河北定州人,副研究员,博士,主要从事桉树林生态研究。E-mail:dapzj@163.com

higher or significantly higher than other *Eucalyptus* plantations, but was not significantly different from that of *P. elliotii* × *P. oaribaea*. Total P content in soil of control was significantly higher than that of the four *Eucalyptus* plantations. The litter C/N ratios were 39.43–63.35, indicating that litter decomposition rate was low and restricted by N. The soil C/N ratios in 8 years old *E. camaldulensis* and 10 years old *E. pellida* were significantly higher than that of 10 years old *E. torelliana*, 15 years old *E. urophylla* and *P. elliotii* × *P. oaribaea*, demonstrating that older plantations soil had faster nitrogen mineralization rate. The correlation analysis showed that the C, N and P in ecosystem realized transportation and transformation among plants, litter and soil. 【Conclusion】 The litter decomposition rates of *Eucalyptus* plantations and *P. elliotii* × *P. oaribaea* on the Leizhou Peninsula were slow and restricted by N element. Compared to the four *Eucalyptus* plantations, *P. elliotii* × *P. oaribaea* had better nutrient utilization efficiency and carbon sequestration capacity. Different *Eucalyptus* types and *P. elliotii* × *P. oaribaea* had different growth restrictive elements. Therefore, balanced fertilization was needed to prevent soil degradation in these fast-growing pine and *Eucalyptus* plantations.

**Key words:** *Eucalyptus*; *P. elliotii* × *P. oaribaea*; leaf; litter; soil; stoichiometry 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(特别是碳、氮、磷)的化学计量特征关系<sup>[1]</sup>。中国人工林面积居世界之首, 因培育制度不健全而造成的水土流失和林分生产力下降等问题日趋严重。目前, 国内对于人工林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方面。陈亚梅等<sup>[2]</sup>对四川省乐山市苏稽镇兴福寺巨桉人工混交林内不同树种生态系统各组分碳、氮、磷的化学计量特征进行了对比分析, 为该区域制定合理的巨桉人工林营林规划提供了理论基础; 曹娟等<sup>[3]</sup>总结了湖南会同不同林龄杉木人工林土壤有机碳、全氮、全磷分配格局及化学计量特征, 对提高杉木人工林养分利用效率及林地生产力具有重要意义; 桉树(*Eucalyptus* spp.)和松树(*Pinus* spp.)是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。但林分结构单一、连栽、过度施肥及其他掠夺式的粗放管理模式, 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。因此, 本研究以雷州半岛4个不同林龄不同品种桉树[赤桉(*E. camaldulensis*)、粗皮桉(*E. pellida*)、托里桉(*E. torelliana*)、尾叶桉(*E. urophylla*)]人工林为研究对象, 以湿加松(*Pinus elliotii* × *Pinus oaribaea*)人工林为对照, 深入研究了雷州半岛不同桉树品种速生林生活叶、凋落物和土壤的碳、氮、磷含量及其C/N、C/P、N/P化学计量比的变化规律, 探讨了影响雷州半岛地区桉树生长的限制性营养元素, 以期雷州半岛桉树速生人工林的科学合理经营提供理

论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究地概况

研究地位于广东省湛江市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, 气候属于海洋性季风气候, 年降雨量1 567 mm, 5—9月为雨季, 其雨量占全年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10 g/kg以上, 偏酸性(pH 4.5~5.3)<sup>[4-6]</sup>。试验林分选取种苗基地内4个不同品种桉树(赤桉、粗皮桉、托里桉、尾叶桉)林分, 各林分苗木均来源于种苗基地培育的生长均一[高度(25±2) cm]的网袋苗; 湿加松为当地购买的长势良好[高度(25±2) cm]的泥袋苗。造林前均施用等量(666 kg/hm<sup>2</sup>)的专业基肥, 造林后未追肥。林分具体特征见表1。

### 1.2 研究方法

2015年6—7月, 在4个桉树林分中分别布设3个20 m × 20 m的标准地, 在每个标准地内进行每木检尺, 根据平均树高及胸径在各样方内选取3株生长良好的个体作为取样对象, 每个林分共选9株样木, 采样时尽量从样木上选取完全伸展、无病虫害的成熟生活叶取样。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, 采集树冠上中下东南西北4个方向的小枝, 获取生活叶的混合样品, 将每个标准地内3株样木所采集生活叶混合作为1个重复, 每个林分共计3个重复<sup>[7]</sup>。同时, 在每个标准地内以“S”形选择1 m × 1 m的5个小样方, 收集地表凋落物(包括凋落物叶、凋落枝

等),同时在小样方中使用土钻钻取土样,取样深度为 20 cm,每 10 cm 一层,充分混合 5 个样方内采集的凋落物及各层次土壤记为 1 个重复,每个林分取样 3 个重复。仔细除去土样中的可见植物残体及土壤动物,风干过筛后待测<sup>[8]</sup>。土壤有机碳含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定,全氮(Total N, TN)含

量采用凯氏法测定,全磷(Total P, TP)含量采用碱熔-钼锑抗比色法测定;生活叶及凋落物中有机碳含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定,全氮含量采用 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 扩散法测定,全磷含量采用钒钼黄比色法测定。

表 1 试验地 4 个品种桉树和湿加松林分概况

Table 1 Basic situation of *Eucalyptus* and *P. elliotii* × *P. oaribaea* plantations

树种 Species	海拔/m Elevation	保留密度/ (株·hm <sup>-2</sup> ) Density	林龄/a Age	平均树高/m Tree height	平均胸径/cm DBH	凋落物 厚度/cm Thickness of litter	土壤体积质量/ (g·cm <sup>-3</sup> ) Soil bulk density
赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	98.6	925	8	12.26	10.82	8.60	0.99
粗皮桉 <i>E. pellida</i>	92.1	970	10	16.80	17.25	7.62	1.00
托里桉 <i>E. torelliana</i>	85.5	810	10	18.00	19.6	7.31	1.02
尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	119.6	524	15	25.38	25.56	9.24	1.01
湿加松 <i>P. elliotii</i> × <i>P. oaribaea</i>	104.7	599	15	13.73	20.6	8.24	0.97

注:本试验地均为平地,故林地坡度均为 0°。

Note: The plots were all on the flat land with slope of 0°.

### 1.3 数据处理与分析

采用 SPSS18.0 软件以及 Excel2010 软件进行单因素方差分析和相关性分析,并利用邓肯氏检验法对相关指标进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同桉树林分生活叶-凋落物-土壤的碳、氮、磷含量总体特征

由表 2 可知,各人工林有机碳含量总体表现为

生活叶 > 凋落物 > 土壤,且差异显著。不同桉树品种虽然林龄不同,但其生活叶及凋落物中有机碳含量均无显著差异,生活叶有机碳含量为 444.40~463.21 g/kg,凋落物有机碳含量为 395.00~423.43 g/kg,4 种桉树品种生活叶、凋落物的有机碳含量均显著低于湿加松(分别为 504.18 和 501.68 g/kg);土壤有机碳含量为 20.29~29.07 g/kg,不同品种桉树与湿加松土壤间均无显著差异。

表 2 不同桉树人工林生活叶、凋落物和土壤中的有机碳、全氮和全磷含量

Table 2 Contents of organic C, total N and total P in leaf, litter and soil in different *Eucalyptu* splantations g/kg

元素 Element	组分 Components	赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	粗皮桉 <i>E. pellida</i>	托里桉 <i>E. torelliana</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	湿加松 <i>P. elliotii</i> × <i>P. oaribaea</i>
有机碳 Organic C	生活叶 Leaf	448.44 ± 7.38 Ba	452.04 ± 7.35 Ba	463.21 ± 3.35 Ba	444.40 ± 18.14 Ba	504.18 ± 9.04 Aa
	凋落物 Litter	395.16 ± 11.21 Bb	423.43 ± 9.41 Bb	416.97 ± 19.06 Bb	416.18 ± 23.75 Ba	501.68 ± 6.12 Aa
	土壤 Soil	27.32 ± 2.36 Ac	23.63 ± 3.98 Ac	29.07 ± 3.68 Ac	20.29 ± 0.64 Ab	23.73 ± 1.63 Ab
全氮 Total N	生活叶 Leaf	18.06 ± 1.46 Aa	20.60 ± 2.53 Aa	19.54 ± 0.79 Aa	18.55 ± 3.22 Aa	13.41 ± 0.12 Ca
	凋落物 Litter	8.93 ± 0.12 ABb	9.14 ± 0.75 ABb	10.78 ± 0.99 Ab	6.68 ± 0.44 Bb	10.67 ± 1.22 Ab
	土壤 Soil	1.84 ± 0.20 Ac	1.60 ± 0.21 Ac	2.18 ± 0.34 Ac	1.60 ± 0.10 Ac	1.88 ± 0.06 Ac
全磷 Total P	生活叶 Leaf	1.68 ± 0.24 Aa	1.50 ± 0.10 Aa	0.93 ± 0.02 Ba	1.71 ± 0.13 Aa	0.83 ± 0.10 Bab
	凋落物 Litter	0.67 ± 0.04 ABb	0.81 ± 0.12 ABb	0.64 ± 0.02 ABb	0.85 ± 0.07 Ab	0.53 ± 0.11 Bb
	土壤 Soil	0.71 ± 0.00 BCb	0.79 ± 0.01 Bb	0.75 ± 0.02 BCc	0.67 ± 0.03 Cb	0.89 ± 0.06 Aa

注:同行数据后标不同大写字母表示相同组分不同树种间差异显著( $P < 0.05$ ),同列数据后标不同小写字母表示相同树种不同组分间差异显著( $P < 0.05$ )。下表同。

Note: Different uppercase letters in the same row represent significant difference among different species, and different lowercase letters in the same column represent significant difference in same species among different components. The same below

各人工林全氮含量总体表现为生活叶 > 凋落物 > 土壤,且差异显著。不同桉树品种间生活叶全氮含量无显著差异,其含量为 18.06~20.60 g/kg,显著高于湿加松生活叶全氮含量(13.41 g/kg)。各桉树品种凋落物全氮含量为 6.68~10.78g/kg,尾叶桉凋落物全氮含量(6.68 g/kg)显著低于托里桉

(10.78 g/kg)和湿加松(10.67 g/kg),与其他桉树品种无显著差异。土壤全氮含量为 1.60~2.18 g/kg,各品种桉树与湿加松土壤间均无显著差异。

各人工林不同组分全磷含量表现有所不同。桉树生活叶全磷含量显著高于凋落物与土壤全磷含量,但凋落物中全磷含量与土壤间无显著差异(除托

里桉外);湿加松土壤全磷含量显著高于凋落物的全磷含量,与生活叶中全磷含量无显著差异。托里桉和湿加松生活叶全磷含量(分别为0.93和0.83 g/kg)显著低于赤桉、粗皮桉及尾叶桉(1.50~1.71 g/kg),后三者含量无显著差异;不同桉树品种间凋落物全氮含量无显著差异,其含量为0.64~0.85 g/kg,均高于湿加松凋落物全磷含量(0.53 g/kg);而湿加松土壤全磷含量为0.89 g/kg,显著高于4个桉树品种土壤全磷含量(0.67~0.79 g/kg),除尾叶桉与粗皮桉之间土壤全磷含量差异显著外,其余桉树品种土壤间均无显著差异。

## 2.2 不同桉树林分生活叶-凋落物-土壤生态化学计量比的总体特征

由表3可知,各桉树品种生活叶C/N为22.57~25.23,显著低于湿加松生活叶C/N(37.62);15 a生尾叶桉林下凋落物C/N(63.35)显著高于其他各桉树品种(39.43~46.94),但与湿加

松(48.12)无显著差异;托里桉林下土壤C/N为10.08,显著低于赤桉和粗皮桉,与尾叶桉、湿加松无显著差异。

各桉树品种生活叶C/P为264.01~500.44,均显著低于湿加松生活叶C/P(630.65);各桉树品种凋落物C/P为498.45~657.48,不同品种间无显著差异,但均低于或显著低于湿加松凋落物(1060);除托里桉外,其余桉树品种与湿加松林下土壤C/P均无显著差异。

不同品种桉树及湿加松生活叶N/P存在显著差异,其中托里桉(21.07)显著高于其他各桉树品种及湿加松(16.9),其余各品种桉树间生活叶N/P(10.9~13.63)无显著差异;托里桉及湿加松凋落物N/P均高于或显著高于其他3种桉树品种;各品种桉树及湿加松土壤N/P为2.02~2.93,均无显著差异。

表3 不同桉树人工林生活叶、凋落物和土壤中有有机碳、全氮、全磷的化学计量特征

Table 3 Stoichiometry features of organic C, total N and total P in leaf, litter and soil in *Eucalyptus* plantations

指标 Index	组分 Components	赤桉 <i>E. camaldulensis</i>	粗皮桉 <i>E. pellida</i>	托里桉 <i>E. torelliana</i>	尾叶桉 <i>E. urophylla</i>	湿加松 <i>P. elliotii</i> × <i>P. oaribaea</i>
C/N	生活叶 Leaf	25.23 ± 2.55 Bb	22.57 ± 2.59 Bb	23.79 ± 1.03 Bb	24.30 ± 1.90 Bb	37.62 ± 1.00 Ab
	凋落物 Litter	44.31 ± 1.78 Ba	46.94 ± 4.02 Ba	39.43 ± 4.27 Ba	63.35 ± 7.76 Aa	48.12 ± 4.73 ABa
	土壤 Soil	14.93 ± 0.65 Ac	14.84 ± 2.08 Ab	10.08 ± 0.38 Bc	12.71 ± 0.54 ABb	12.58 ± 0.54 ABc
C/P	生活叶 Leaf	276.81 ± 38.73 Cb	303.16 ± 16.66 Cb	500.44 ± 11.87 Bb	264.01 ± 27.16 Cb	630.65 ± 74.46 Aa
	凋落物 Litter	591.24 ± 41.34 Ba	549.06 ± 77.53 Ba	657.48 ± 36.34 ABa	498.45 ± 63.43 Ba	1060.00 ± 280.29 Aa
	土壤 Soil	38.25 ± 3.18 ABc	29.94 ± 4.98 ABc	38.96 ± 4.83 Ac	30.22 ± 0.17 ABc	26.67 ± 1.84 Bb
N/P	生活叶 Leaf	10.90 ± 0.76 Cb	13.63 ± 0.96 BCa	21.07 ± 0.43 Aa	10.90 ± 0.89 Ca	16.90 ± 2.48 Ba
	凋落物 Litter	13.35 ± 0.75 BCa	11.79 ± 1.55 BCa	17.11 ± 2.19 ABa	7.86 ± 0.23 Cb	22.15 ± 5.28 Aa
	土壤 Soil	2.58 ± 0.28 Ac	2.02 ± 0.25 Ab	2.93 ± 0.45 Ab	2.38 ± 0.09 Ac	2.12 ± 0.11 Ab

## 2.3 不同桉树林分生活叶-凋落物-土壤的化学计量关系

对比不同桉树品种生活叶、凋落物和土壤有机碳、全氮、全磷及其化学计量比相关关系(表4)可知,生活叶有机碳含量与生活叶及凋落物全磷含量均呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与土壤全磷含量呈显著正相关( $P < 0.05$ );生活叶全磷含量与土壤全磷

含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与生活叶及凋落物全氮含量分别呈显著和极显著正相关;凋落物有机碳及全氮含量与土壤全磷含量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ );土壤有机碳含量与其全氮含量呈极显著正相关( $P < 0.01$ );生活叶、凋落物、土壤C/P与其自身N/P均呈极显著正相关( $P < 0.01$ )。

表4 不同桉树人工林生活叶、凋落物及土壤中碳、氮、磷的相关关系

Table 4 Correlations of C, N, P and their stoichiometry features of different components in leaf, litter and soil in *Eucalyptus* plantations

组分 Ingredient	指标 Index	生活叶 Leaf					
		C	TN	TP	C/N	C/P	N/P
生活叶 Leaf	C	1.000					
	TN	-0.411	1.000				
	TP	-0.640*	0.528*	1.000			
	C/N	0.705**	-0.927**	-0.627*	1.000		
	C/P	0.707**	-0.551**	-0.938**	0.689**	1.000	
	N/P	0.406	0.018	-0.805**	0.113	0.786**	1.00

表 4(续) Continued table 4

组分 Ingredient	指标 Index	生活叶 Leaf					
		C	TN	TP	C/N	C/P	N/P
凋落物 Litter	C	0.655**	-0.576*	-0.604*	0.725**	0.69**	0.325
	TN	0.410	-0.105	0.658**	0.242	0.723**	0.762**
	TP	-0.557*	0.301	0.430	-0.437	-0.504	-0.338
	C/N	-0.086	-0.177	0.317	0.095	-0.340	-0.534*
	C/P	0.649**	0.452	-0.469	0.614**	0.546*	0.241
	N/P	0.627*	-0.347	-0.605*	0.515*	0.686**	0.505
土壤 Soil	C	-0.092	-0.008	-0.258	-0.074	0.164	0.322
	TN	0.086	0.100	-0.303	-0.067	0.295	0.484
	TP	0.566*	-0.336	-0.617*	0.519*	0.770**	0.545*
	C/N	-0.243	-0.265	0.301	0.123	-0.347	-0.598*
	C/P	-0.355	0.140	0.039	-0.307	-0.189	0.060
	N/P	-0.213	0.213	0.013	-0.322	-0.089	0.203
组分 Ingredient	指标 Index	凋落物 Litter					
		C	TN	TP	C/N	C/P	N/P
凋落物 Litter	C	1.000					
	TN	0.240	1.000				
	TP	0.421	-0.394	1.000			
	C/N	0.248	-0.842**	0.196	1.000		
	C/P	0.665*	0.294	-0.848**	-0.013	1.000	
	N/P	0.499	0.672**	-0.856**	-0.437	0.889**	1.000
土壤 Soil	C	0.072	0.232	-0.233	-0.281	0.172	0.247
	TN	0.200	0.280	-0.378	-0.248	0.268	0.330
	TP	0.660**	0.650**	-0.375	-0.380	0.514*	0.607*
	C/N	0.004	-0.321	0.318	0.234	-0.102	-0.253
	C/P	-0.239	-0.063	-0.047	-0.101	-0.088	-0.049
	N/P	-0.135	-0.400	-0.171	-0.058	-0.007	0.015
组分 Ingredient	指标 Index	土壤 Soil					
		C	TN	TP	C/N	C/P	N/P
土壤 Soil	C	1.000					
	TN	0.836**	1.000				
	TP	0.110	0.189	1.000			
	C/N	0.106	-0.351	-0.025	1.000		
	C/P	0.889**	0.705**	-0.353	0.102	1.000	
	N/P	0.752**	0.875**	-0.307	-0.331	0.855**	1.000

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

Note: \* Represents  $P < 0.05$ ; \*\* Represents  $P < 0.01$ .

### 3 讨论与结论

#### 3.1 不同品种桉树及松树林生活叶碳、氮、磷的生态化学计量特征

不同品种桉树生活叶有机碳、全氮、全磷含量分别为 444.40~463.21, 18.06~20.60 和 0.93~1.71 g/kg, 其中生活叶有机碳含量与全球植物生活叶有机碳含量平均值(464 g/kg)<sup>[1]</sup>相近, 低于我国中亚热带地区巨桉生活叶有机碳含量(497.7 g/kg)<sup>[2]</sup>; 生活叶全氮含量与全球植物生活叶及我国植物生活叶的平均氮含量(分别为 20.6 和 20.2 g/kg)<sup>[1,9]</sup>相近, 高于阿拉善 54 种荒漠植物生活叶的平均氮含量(10.65 g/kg)<sup>[10]</sup>; 不同桉树品种(除托里桉外)生活叶全磷含量(1.50~1.71 g/kg)略高

于我国植物生活叶平均磷含量(1.46 g/kg), 但低于全球植物生活叶磷含量的平均值(1.99 g/kg)<sup>[1]</sup>。植物叶片碳元素和限制性元素氮、磷共同作用, 可调节植物的生长, 生活叶 C/P 与 C/N 反映了植物的营养利用效率及对碳的固定能力<sup>[11]</sup>。本研究中, 各桉树品种生活叶有机碳含量显著低于对照湿加松生活叶有机碳含量(504.18 g/kg), 全氮和全磷(除托里桉外)含量显著高于对照湿加松生活叶两元素含量(分别为 13.41 和 0.83 g/kg)。其中, 各桉树品种生活叶有机碳和全氮含量无显著差异, 而托里桉(0.93 g/kg)生活叶全磷含量显著低于赤桉、粗皮桉及尾叶桉(1.50~1.71 g/kg), 后三者无显著差异。不同桉树品种生活叶的 C/N(22.57~25.23)和 C/P(264.01~500.44)显著低于湿加松 C/N(37.62)

和 C/P(630.65),据此推断,本研究区内湿加松相较于不同林龄桉树品种具有较高的植物营养利用效率及碳固定能力。

生活叶作为植物的主要光合器官,其 N/P 可以作为衡量植物个体或群落养分状况的指标<sup>[12]</sup>。Herbert<sup>[13]</sup>通过对不同国家桉树人工林的研究发现,巨桉生活叶的 N/P 低于(11:1)~(18:1),则桉树林生长受氮限制,如果 N/P 高于这个范围,则受磷限制。Koerselman 等<sup>[12]</sup>对欧洲湿地植物的研究认为,当植物 N/P<14 时,植物生长受氮元素的限制;当 N/P>16 时,生长受磷元素的限制;当 14<N/P<16 时则生长受氮、磷元素共同限制。本研究中,8 a 生赤桉、10 a 生粗皮桉及 15 a 生尾叶桉生活叶的 N/P 为 10.9~13.63,10 a 生托里桉及 15 a 生湿加松生活叶的 N/P 分别为 21.07 和 16.9,若按照上述标准,该地区 8 a 生赤桉、10 a 生粗皮桉及 15 a 生尾叶桉的生长受氮元素限制,10 a 生托里桉和 15 a 生湿加松受磷元素限制。但根据前人研究结论判断,本研究区林分的养分限制情况存在缺陷,要准确测定植物在特定环境下的生长限制性养分元素,还需针对研究对象、研究环境及生态系统类型,并配合相应的施肥试验作进一步诊断。

### 3.2 不同品种桉树及松树林凋落物碳、氮、磷的生态化学计量特征

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<sup>[14]</sup>,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<sup>[15]</sup>。有研究表明,凋落物氮含量升高或 C/N 降低会加快凋落物的分解,加速养分循环<sup>[16]</sup>。凋落物 C/N 大于 25 时,对微生物具有氮限制性,影响凋落物的分解<sup>[17]</sup>。本研究中,8 a 生赤桉和 10 a 生粗皮桉、托里桉凋落物 C/N 为 39.43~46.94,低于或显著低于 15 a 生尾叶桉(63.35)和湿加松(48.12)的 C/N;不同桉树品种间,尾叶桉凋落物全氮含量低于其他桉树品种,其中与托里桉差异显著,说明本研究区 15 a 生尾叶桉和湿加松林分凋落物分解速率较慢,且不同林龄桉树林与湿加松林分凋落物分解均受氮元素限制。

### 3.3 不同品种桉树及松树林土壤碳、氮、磷生态化学计量特征

土壤养分作为森林生态系统植物体营养元素的主要来源,其有机碳、全氮、全磷含量及化学计量特征可影响植物体各元素的平衡<sup>[2,18]</sup>。本研究区域内,不同品种桉树林土壤 0~20 cm 土层有机碳含量

为 20.29~29.07 g/kg,全氮含量为 1.60~2.18 g/kg,全磷含量为 0.67~0.79 g/kg。本研究区土壤有机碳含量与闽南山区尾巨桉林土壤有机碳含量(28.07~28.33 g/kg)<sup>[19]</sup>相似,低于广西雅长兰科植物自然保护区土壤有机碳含量均值(67.14 g/kg)<sup>[20]</sup>;全氮含量与闽南山区尾巨桉林下土壤全氮含量(1.80~1.88 g/kg)<sup>[19]</sup>相似,低于广西雅长兰科植物自然保护区土壤全氮含量均值(3.22 g/kg)<sup>[20]</sup>,高于大别山东南边缘马尾松纯林土壤全氮含量(1.48 g/kg)<sup>[21]</sup>;全磷含量低于广西雅长兰科植物自然保护区土壤全磷含量均值(1.15 g/kg)<sup>[20]</sup>,高于闽南山区尾巨桉林下土壤全磷含量(0.39~0.45 g/kg)<sup>[19]</sup>。产生上述差异的可能原因在于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,因此土壤有机碳含量与闽南山区相似;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 mm)低于亚热带,但保护区内森林连片分布,原生性较强<sup>[20]</sup>,有机质积累深厚,因此有机碳、全氮、全磷含量均高于本研究区和闽南山区土壤。本研究中,湿加松林下土壤有机碳含量(23.73 g/kg)和全氮含量(1.88 g/kg)均在不同品种桉树林土壤有机碳与全氮含量范围内,且不同树种间均无显著差异;但湿加松林下土壤全磷含量(0.89 g/kg)显著高于本研究各桉树林下土壤全磷含量,可能原因在于,桉树本身的速生特性对磷元素的吸收能力强于湿加松。同时,试验区雨季雨水较多,桉树人工林地除杂工作频繁,容易形成地表径流,从而导致部分有机质和全氮、磷、钾养分随雨流失<sup>[5]</sup>。因此,建议雷州半岛桉树种植过程中,及时补充多元复合肥,充分发挥氮、磷、钾等元素的使用效果,在提高人工林产量的同时防止地力衰退问题的出现<sup>[22]</sup>。

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是反映土壤有机质组成及土壤资源有效性的重要指标<sup>[23]</sup>,土壤 C/N 反映了土壤质量的敏感程度,同时也反映了土壤不同元素的营养平衡状态<sup>[24]</sup>。一般来讲,土壤 C/N 与土壤分解速率成反比<sup>[23]</sup>,C/N 较低表明有机质矿化作用较快<sup>[3]</sup>。本研究中,8 a 生赤桉和 10 a 生粗皮桉土壤 C/N 高于或显著高于 10 a 生托里桉及 15 a 生尾叶桉和湿加松,同时结合不同林龄桉树人工林以及湿加松人工林生理特性及其树高与胸径的生长状况,可知 10 a 生托里桉及 15 a 生尾叶桉和湿加松表层土壤具有较快的矿化速率。

### 3.4 不同品种桉树及松树林生活叶-凋落物-土壤碳、氮、磷的生态化学计量关系

根据本试验不同品种桉树及松树林生活叶、凋落物及土壤有机碳、全氮、全磷的相关性分析结果可知,不同组分间有机碳、全氮、全磷含量及其比值均存在不同程度的相关性。其中生活叶有机碳含量与凋落物全磷含量呈显著负相关( $P < 0.05$ ),与土壤全磷含量呈显著正相关( $P < 0.05$ ),凋落物有机碳及全氮含量与土壤全磷含量均呈极显著正相关( $P < 0.01$ ),说明凋落物养分元素含量受生活叶限制,土壤养分含量受凋落物限制,生态系统内部碳氮磷元素的循环在植物、凋落物与土壤之间实现了运输和转换<sup>[25]</sup>。植物从土壤中吸收养分供其生长,生活叶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的形式将养分归还于土壤<sup>[7]</sup>,这也造就了不同林分有机碳和氮元素含量表现为生活叶>凋落物>土壤的养分格局。但区别于碳、氮元素,土壤磷元素主要来源于岩石风化和凋落物分解,而岩石风化作用是一个漫长而稳定的过程,对土壤中含磷量影响较大,因此不同林分磷元素养分格局存在差异。

#### [参考文献]

- [1] 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.
- [2] 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.  
Chen Y M, Liu Y, Zhang J, et al. Stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus of different tree species in *Eucalyptus grandis* mixed plantation [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(8): 2096-2102.
- [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.  
Cao J, Yan W D, Xiang W H, et al. Stoichiometry characterization of soil C, N, and P of Chinese fir plantations at three different ages in Huitong, Hunan Province, China [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2015, 51(7): 1-8.
- [4] 周群英, 谢耀坚, 何国达, 等. "根太阳"生根剂在桉树扦插育苗中的应用 [J]. *林业科技开发*, 2004, 18(3): 50-52.  
Zhou Q Y, Xie Y J, He G D, et al. Application "root sun" on raising rooting rate of *Eucalyptus* spp [J]. *China Forestry Science and Technology*, 2004, 18(3): 50-52.
- [5] 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.  
Zhong J H, Li S Y, Lan P L, et al. Characteristics and causes of soil fertility under *Eucalyptus* plantations in Leizhou Peninsula [J]. *Bulletin of Soil & Water Conservation*, 2005, 25(3): 44-48.
- [6] 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.  
Wang Z C, Du A P, Chen S X. Tree growth and soil organic matter characteristics under different soil preparation methods in young *E. urophylla* × *E. grandis* stands [J]. *Eucalypt Science & Technology*, 2014, 31(4): 38-42.
- [7] 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.  
Song G Y, He N P, Hou J H. Changes in leaf calorific value in main Chinese forests and its influencing factors [J]. *Forest Research*, 2016, 29(1): 133-139.
- [8] 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.  
Zhu Q L, Xing X Y, Zhang H, et al. Soil ecological stoichiometry under different vegetation area on loess hilly region [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(15): 4674-4682.
- [9] 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.
- [10] 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.  
Zhang K, He M Z, Li X R, et al. Foliar carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry of typical desert plants across the Alashan Desert [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34(22): 6538-6547.
- [11] Elser J J, Acharya K, Kyle M, et al. Growth rate-stoichiometry couplings in diverse biota [J]. *Ecology Letters*, 2003, 6(10): 936-943.
- [12] Koerselman W, 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.
- [13] Herbert M A. Fertilizer and eucalypt plantations in South Africa [M]// Attiwill P M, Adams M. *Nutrition of Eucalyptus*. Collingwood: CSIRO Publishing, 1996: 303-325.
- [14] Berg B. Litter decomposition and organic matter turnover in northern forest soils [J]. *Forest Ecology & Management*, 2000, 133(1/2): 13-22.
- [15] 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.  
Ge X G, Xiao W F, Zeng L X, et al. Relationships between litter substrate quality and soil nutrients in different-aged *Pinus massoniana* stands [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(3): 852-862.
- [16] Aerts R, Chapin Iii 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.

- 番茄光合速率与蔗糖代谢的影响 [J]. 农业工程学报, 2005, 21(S2):137-142.
- Qi H Y, Li T L, Zhang Y H, et al. Effects of foliage applications of  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  and glucose on photosynthesis and sucrose metabolism of tomato [J]. Transactions of the CSAE, 2005, 21(S2):137-142.
- [19] 韩启厚. 不同生育期施钾肥对温室番茄蔗糖代谢的调控 [D]. 北京: 中国农业科学院, 2009:39-40.
- Han Q H. Regulation effects of potash applied at different growth phases on sucrose metabolism of tomato in greenhouse [D]. Beijing, Chinese Academy of Agricultural Sciences Dissertation, 2009:39-40.
- [20] 齐红岩, 李天来, 周璇, 等. 不同氮钾水平对番茄产量、品质及蔗糖代谢的影响 [J]. 中国农学通报, 2005, 21(11):253-255.
- Qi H Y, Li T L, Zhou X, et al. Effect of different nitrogen and potassium levels on yield, quality and sucrose metabolism of tomato [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2005, 21(11):253-255.
- [21] 鲁少尉, 齐飞, 李天来. 盐胁迫对番茄果实糖含量及蔗糖代谢的影响 [J]. 中国蔬菜, 2012(20):56-61.
- Lu S W, Qi F, Li T L. Effects of salt stress on sugar content and sucrose metabolism in tomato fruit [J]. China Vegetables, 2012(20):56-61.
- [22] 陶君. 宁夏日光温室辣椒、甜瓜不同微咸水膜下滴灌灌溉制度研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- Tao J. Study on irrigation scheduling of peppers and melons under mulch drip irrigation with brackish water in Ningxia greenhouse [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [23] 杨洁. 宁夏日光温室番茄、西瓜微咸水净化灌溉模式试验研究 [D]. 银川: 宁夏大学, 2014.
- Yang J. Experimental study on irrigation of tomato and water melon with brackish water by purification in Ningxia greenhouse [D]. Yinchuan: Ningxia University, 2014.
- [24] 汪洋, 田军仓, 高艳明, 等. 非耕地温室番茄微咸水灌溉试验研究 [J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(1):12-15.
- Wang Y, Tian J C, Gao Y M, et al. Brackish water irrigation of greenhouse tomato in non-cultivated land [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(1):12-15.

(上接第 100 页)

- [17] 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.
- Wang J Y, Zhang X Y, Wen X F, et al. The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5):1337-1346.
- [18] 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.
- Pang S J, Zhang P, Jia H Y, et al. Research on soil ecological stoichiometry under different forest types in Northwest Guangxi [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2015, 31(1):17-23.
- [19] 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.
- Fan H B, Yuan Y H, Liao Y C, et al. Soil nutrient dynamics in sequentially aged *Eucalyptus* plantations in mountainous region of Southern Fujian, China [J]. Chinese Journal of Applied & Environmental Biology, 2009, 15(6):756-760.
- [20] 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.
- Huang C B, Feng C L, Li B P, et al. Soil physical and chemical properties in a distribution region of *Arethusa* in Yachang, Guangxi province [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2010, 38(1):56-59.
- [21] 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.
- Qing J, Kong H Y, Liu H. Stoichiometric characteristics of soil C, N, P and K in different *Pinus massoniana* forest [J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition), 2016, 44(2):68-76, 82.
- [22] 杨曾奖, 李尚均, 徐大平, 等. 钾素营养对浅海沉积土桉树生长的影响 [J]. 生态环境学报, 2006, 15(2):337-340.
- Yang Z J, Li S J, Xu D P, et al. Effect of potassium fertilization on eucalyptus growth on sedimentary soil of shallow sea [J]. Ecology and Environment, 2006, 15(2):337-340.
- [23] 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.
- Wang S Q, Yu G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(8):3937-3947.
- [24] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征 [J]. 环境科学, 2011, 32(5):1407-1414.
- Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, et al. Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen plain maize belt [J]. Environmental Science, 2011, 32(5):1407-1414.
- [25] McGroddy M E, Tanguy D, Lars O H. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial red-field-type ratios [J]. Ecology, 2008, 85(9):2390-2401.