

DOI:10.13987/j.cnki.askj.2020.03.01

# 不同林龄尾巨桉人工林 根系-土壤 C、N、P 生态化学计量特征

竹万宽, 许宇星, 王志超, 杜阿朋\*

(国家林业和草原局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

**摘要:** 分析不同林龄尾巨桉人工林根系-土壤 C、N、P 化学计量关系特征, 以掌握土壤养分现状和变化规律对林木根系养分状况的影响。以 2、6 和 9 a 年生尾巨桉人工林为研究对象, 测定根系及土壤 C、N、P 含量, 分析二者生态化学计量关系特征及根系生态化学内稳性特征。结果表明: 根系有机 C 和全 N 含量随林龄表现为先减后增趋势, 全 P 含量 9 a 最小; 土壤有机 C 随林龄先减后增, 全 P 含量随林龄逐渐增大。根系 C:N 随林分生长而增大, C:P 和 N:P 均为 9 a 最大; 土壤元素化学计量比在林龄间未表现出差异性; 根系 N:P 与其 C:N、C:P 存在极显著相关性, 根系 C:N 与土壤 C:N、C:P 存在显著相关性。2 a 和 6 a 的养分元素及其化学计量比均具有较强的内稳性特征, 9 a 根系 C:P 属于敏感型, 具有一定可塑性。

**关键词:** 化学计量特征; 尾巨桉人工林; 根系; 土壤

中图分类号: S718.51+6

文献标识码: A

## Soil-root Carbon, Nitrogen, and Phosphorus Stoichiometry of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantations at Different Ages

ZHU Wankuan, XU Yuxing, WANG Zhichao, DU Apeng

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

**Abstract:** The stoichiometry of C, N and P between roots and soil in plantations of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* at different ages were analyzed in order to understand variations of soil and root nutrients. This was done by examining soil and roots from plantations of *E. urophylla* × *E. grandis* at ages 2-, 6- and 9-years. The results showed that contents of organic C and total N in roots decreased at first and then increased with plantation age, and that the content of total P was the lowest at age 9-years. Soil organic C decreased at first and then increased with plantation age, while total P content increased gradually with age. Root C:N ratios increased with plantation age and the ratios of both C:P and N:P were the highest at age 9-years. The stoichiometric ratio of soil elements showed no difference among plantation ages. There was a highly significant correlation between ratios of both N:P and C:N with C:P in the roots, and there was a significant correlation between root C:N and soil C:N with soil C:P. The nutrient elements and their stoichiometric ratios of 2- and 6-year-old plantations showed characteristics of internal stability, while the C:P value of 9-year-old plantations belonged to the sensitive type and has a certain plasticity.

**Key words:** stoichiometric characteristics; *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation; root; soil

在陆地生态系统中, 植物作为生产者将光合产物以根系分泌物、溢泌物和脱落物的形式释放至土壤<sup>[1]</sup>。土壤、根系之间通过物质和信息的交换形成复杂的交互作用关系。土壤 C、N、P 是森林土壤养

分的重要组成部分, 也是植物生长发育必需养分元素, 其含量变化和循环特征对植物生长和生理机能具有重要的调控作用<sup>[2-3]</sup>。因此, 研究土壤-根系 C、N、P 的含量变异特征及其动态分布对于揭示系统

基金项目: 广东省林业科技创新项目(2018KJXC014); 广西创新驱动发展专项(桂科 AA17204087-9); 广东省自然科学基金(2020A1515011404); 国家重点研发计划项目(2016YFD0600505, 2016YFD0600504); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行项目(2020132008)

作者简介: 竹万宽(1989—), 男, 研究实习员, 主要从事森林生态系统定位观测研究, E-mail:zwwk\_2015@163.com

\*通信作者: 杜阿朋(1979—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事森林生态学研究, E-mail:dapzj@163.com

养分循环特征具有重要意义。生态化学计量学是研究生物系统能量平衡和多重化学元素(主要是 C、N、P)平衡的科学,以及元素平衡对生态交互作用的一种理论<sup>[4-6]</sup>。作为一个新兴的生态学研究领域和生态学、生物化学及土壤化学研究新方向<sup>[4,7]</sup>,被越来越多地应用到评估 C、N、P 等养分元素在土壤、植物中的循环特征及相互作用机制的研究当中。生态化学计量学已成为连接分子、细胞、种群、群落和生态系统等不同尺度生物学的新工具<sup>[8]</sup>,在消费者驱动的营养循环、限制性养分元素判别以及全球碳氮磷循环等方面发挥重要作用<sup>[9]</sup>。

内稳性理论是指生物有机体在面对外界环境中元素可利用性变化时保持自身化学计量特征相对稳定的能力<sup>[10]</sup>,是生态化学计量学的核心概念之一<sup>[11]</sup>。植物体对生态化学计量内稳性的调节功能反映了植物的生理和生化分配作用对其外部环境的响应机制,并通过根系对营养元素吸收和释放进行调节<sup>[12]</sup>。

桉树(*Eucalyptus*)是世界三大速生丰产树种之一。因具有良好的经济、生态和社会效益得到广泛引种和种植,截至 2018 年底我国桉树人工林面积已达  $5.46 \times 10^6 \text{ hm}^2$ <sup>[13]</sup>。非科学的经营措施(如超短轮伐期、连栽等)已造成地力衰退等问题<sup>[14]</sup>,成为制约人工林生产力的主要原因<sup>[15]</sup>。因此,研究桉树人工林生态系统生态化学计量学特征可以为桉树可持续经营提供依据。目前,对桉树人工林生态化学计量学研究主要集中在器官、凋落物和土壤等尺度<sup>[13,16-17]</sup>,尚未见报道土壤-根系生态化学计量特征。本研究以雷州半岛不同林龄尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*)人工林为研究对象,以空间代替时间,采集不同林龄桉树人工林土壤、根系样品,测定并分析其 C、N、P 含量差异特征及元素化学计量比格局及内稳性特征,以期为桉树高效可持续经营养分管理提供数据支持。

## 1 研究区概况

本研究样地位于雷州半岛北部广东湛江桉树人工林生态系统定位研究站(21°15'53"N, 110°05'39"E)。地处北热带湿润大区雷琼区北缘,为海洋性季风气候。最高海拔 220.8 m,最低海拔 80 m。

年平均气温 23.1℃,最热月(7月)平均气温 28.8℃,最冷月(1月)平均气温 15.6℃,≥10℃的活动积温 8 373℃。年平均降水量 1 567 mm,年相对湿度 80.4%,年均日照时数 1 937 h。试验地土壤类型为玄武岩发育的砖红壤,土壤肥力中等,土层厚度达 84 cm 以上。林下植被种类较为丰富,植被组成以草本为主,如南美蓍琪菊(*Wedelia trilobata*)、牛筋草(*Eleusine indica*)、马唐(*Digitaria sanguinalis*)、山管兰(*Dianella ensifolia*)、芒萁(*Dicranopteris dichotoma*)等。灌木有五色梅(*Common lantana*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、盐肤木(*Rhus chinensis*)等。

## 2 研究方法

### 2.1 样地选取

2017 年 7 月以空间换时间的方法在研究区选取立地条件相似、不同生长阶段 2、6 和 9 a 生尾巨桉人工林为研究对象。3 个林龄尾巨桉人工林初始造林密度均为 1 666 株  $\text{hm}^{-2}$ ,于造林前穴施桉树专用基肥。每个林龄随机设置 3 个 20 m × 20 m 样地,样地调查因子包括林分保留密度、树高、胸径、叶面积指数、林下植被等。样地信息概况见表 1。

### 2.2 样品采集与处理

于 2018 年 6 月对各样地进行每木检尺,测量胸径和树高,并统计株数。按照胸径序列,将林木划分为基数基本相等的大、中、小 3 个径级,每个径级选择 1 株标准木。将标准木在地径处伐倒后采用全挖法并按照细根(≤2 mm)、中根(2~5 mm)和粗根(≥5 mm)规格采集活根样品,3 株标准木获得的同规格混合成 1 份样品,使用流水冲洗根表泥土后装入牛皮纸袋,标记带回实验室。植物样品在 65℃烘箱中烘干至恒质量,经粉碎过 100 目筛,用于测定 C、N、P 含量。在各样地内,采用“S”形路线设置 5 个样点,分别挖取土壤剖面,环刀法(100  $\text{cm}^3$ )取样用于测定土壤物理性质,同时采集 0~20 cm, 20~40 cm 和 40~60 cm 层次土壤,同层土壤混合均匀装袋标记后置于含冰袋的保温箱中,带回实验室后一部分进行风干,研磨,过筛,用于测定土壤 C、N、P 含量。

林木根系和土壤有机 C 采用高温外热重铬酸钾

氧化-容量法测定; 林木根系和土壤全 N 采用凯氏定氮法测定; 林木根系全 P 采用硫酸-双氧水消煮,

钒钼黄比色法测定, 土壤全 P 采用氢氧化钠熔融, 钼锑抗比色法测定。

表 1 样地基本情况

林龄/a	地理位置	海拔 /m	坡度 /(°)	坡向	平均胸径/cm	平均树高/m	林分密度 /(株 hm <sup>-2</sup> )	叶面积指数	土壤容重(0~60 cm)/(g cm <sup>-3</sup> )	pH
2	110.0940E 21.2649N	118	0	—	8.02	12.15	1 508	0.83	1.01	4.93
6	110.0912E 21.2666N	105	2	SE	14.33	14.33	916	1.01	1.08	4.87
9	110.0930E 21.2654N	119	1	N	20.91	24.32	666	1.03	1.03	4.63

### 2.3 数据处理

植物根系和土壤的 C、N、P 化学计量比采用质量比表示<sup>[12]</sup>。生态化学计量内稳性指数(H)的计算采用以下模型<sup>[4]</sup>:

$$y = cx^{1/H} \quad (1)$$

经对数转换后为:

$$\log_{10}y = \log_{10}c + (\log_{10}x)/H \quad (2)$$

式中:  $y$  表示有机体中的元素含量或元素化学计量比值,  $x$  表示对应的环境供应营养元素含量或元素化学计量比值,  $c$  为常数。

根据相前研究将内稳性划分为以下类型<sup>[11,18-19]</sup>, 若拟合方程未达到显著水平( $\alpha=0.05$ )或  $1/H \leq 0$ , 为严格内稳态;  $0 < 1/H < 0.25$ , 为内稳态;  $0.25 < 1/H < 0.5$ , 为弱内稳态;  $0.5 < 1/H < 0.75$ , 为弱敏感型;  $1/H > 0.75$ , 为敏感型。

试验数据采用 EXCEL 2016 进行初步统计整理, 使用 SPSS 19.0 软件对不同林龄桉树林根系、土壤 C、N、P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 进行方差分析和显著性检验( $P=0.05$ )。用 Pearson 法分析林木根

系、土壤 C、N、P 含量及 C:N、C:P 和 N:P 相关性, 根系与土壤 C、N、P 含量及化学计量比的相关性采用粗根、中根和细根的平均值与 0~60 cm 土层平均值进行处理分析。图形制作使用 SigmaPlot 14.0 软件。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林龄尾巨桉林根系、土壤 C、N、P 含量

如图 1 所示, 2、6、9 a 生尾巨桉林根系有机 C 含量分别为 470.60 ~ 503.40、480.30 ~ 482.70 和 458.80 ~ 512.90 g kg<sup>-1</sup>, 全 N 含量分别为 3.94 ~ 5.01、2.49 ~ 2.88 和 3.81 ~ 4.52 g kg<sup>-1</sup>, 全 P 含量分别为 0.29 ~ 0.32、0.31 ~ 0.41 和 0.20 ~ 0.33 g kg<sup>-1</sup>。2 a 和 6 a 不同径级根系有机 C、全 N 和全 P 含量均无显著差异( $P > 0.05$ ), 9 a 不同径级根系有机 C 含量表现为粗根 > 中根 > 细根, 全 N 含量无显著差异( $P > 0.05$ ), 全 P 含量为中根和细根显著高于粗根( $P < 0.05$ )。根系有机 C 和全 N 平均含量均表现为随林龄增大呈先减后增趋势, 全 P 含量为 9 a 最小。

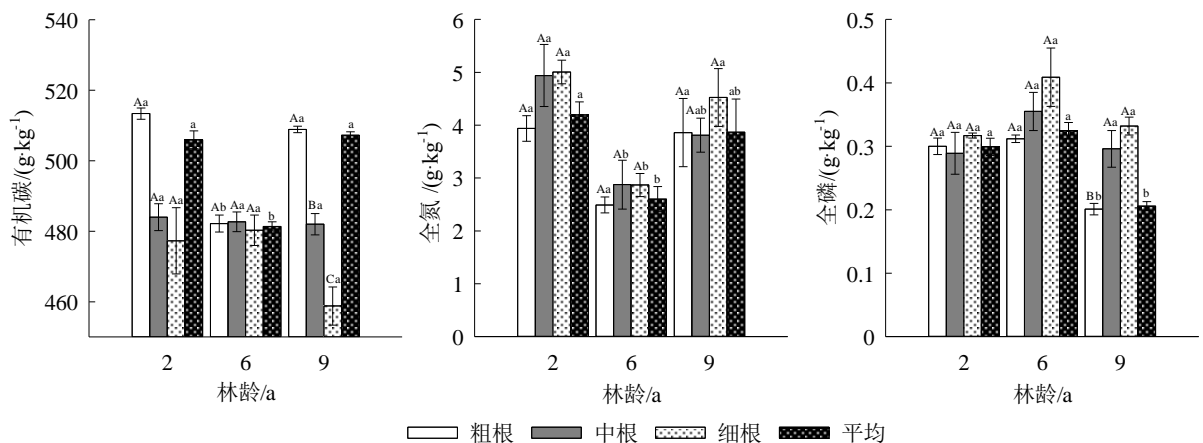


图 1 不同林龄尾巨桉林根系 C、N、P 含量

由图2可知, 2、6和9 a生尾巨桉林土壤有机C含量分别为10.60~25.16、11.04~18.59和16.05~25.72 g kg<sup>-1</sup>, 全N含量分别为0.93~1.88、1.09~1.36和1.20~1.71 g kg<sup>-1</sup>, 全P含量分别为0.69~0.74、0.76~0.79和0.85~0.92 g kg<sup>-1</sup>。3个林分土壤有机C含量均随土层加深递减, 土层间差异显著

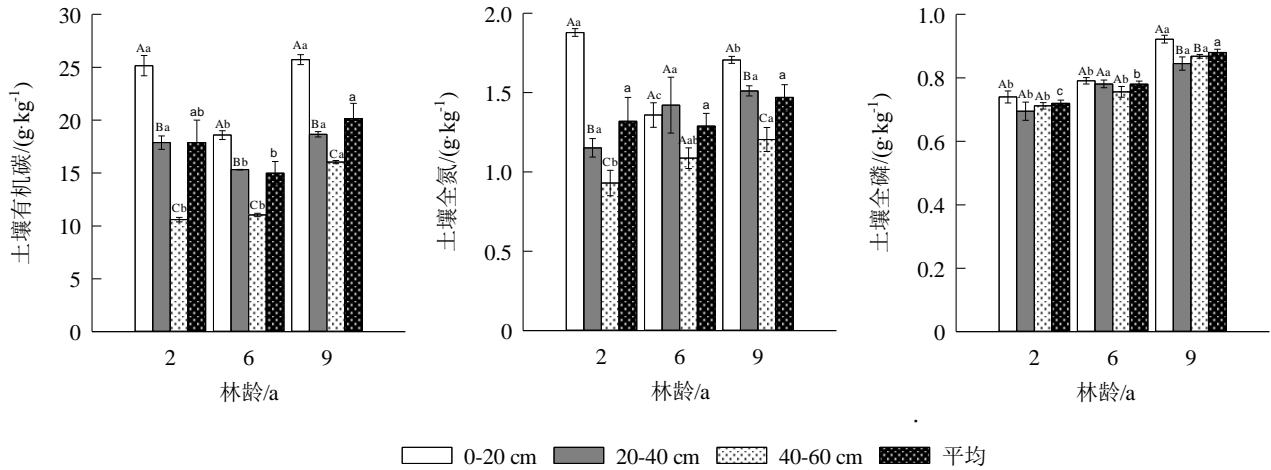


图2 不同林龄尾巨桉林土壤C、N、P含量

### 3.2 不同林龄尾巨桉林根系和土壤C、N、P化学计量比

3个林龄根系C:N均表现为粗根>中根>细根, 但除2 a粗根和细根差异显著外其他均无显著性差异(表2)。粗根、中根和细根C:N随林龄增大呈先增后减趋势, 粗根和中根表现为6 a显著高于2 a( $P<0.05$ ), 两者与9 a无显著性差异( $P>0.05$ )。细根为6 a显著高于2 a和9 a( $P<0.05$ ), 后两者间无显著差异( $P>0.05$ )。根系C:N均值为6 a显著高于2 a( $P<0.05$ )。3个林龄根系C:P除9 a粗根显著高于中根和细根外( $P<0.05$ ), 其他不同径级根系间无显著性差异( $P>0.05$ )。粗根、中根和细根C:P随林龄增大呈先减后增趋势, 粗根表现为9 a显著高于2 a和6 a( $P<0.05$ ), 其他林龄间无显著性差异( $P>0.05$ )。根系C:P均值为9 a显著高于2 a和6 a( $P<0.05$ )。3个林龄根系N:P除2 a粗根显著低于中根和细根( $P<0.05$ )外, 其他不同径级根系间无显著性差异( $P>0.05$ )。粗根、中根和细根N:P随林龄增大呈先减后增趋势, 粗根为9 a显著高于6 a, 中根为2 a>9 a>6 a, 细根为2 a

( $P<0.05$ )。0~20和20~40 cm土层有机C含量均为2 a和9 a显著高于6 a生( $P<0.05$ ), 2 a和9 a生间无显著差异( $P>0.05$ )。40~60 cm土层有机C含量为9 a显著高于2 a和6 a( $P<0.05$ ), 2 a和6 a间无显著差异( $P>0.05$ )。

和9 a显著高于6 a( $P<0.05$ )。根系N:P均值为9 a显著高于6 a( $P<0.05$ )。

3个林分土壤C:N土层深度变化规律不同(表3), 2 a为20~40 cm显著高于40~60 cm( $P<0.05$ ), 两者与0~20 cm均无显著性差异( $P>0.05$ ); 6 a为0~20 cm显著高于40~60 cm( $P<0.05$ ), 两者与20~40 cm均无显著差异( $P>0.05$ ); 9 a为0~20 cm显著高于20~40 cm( $P<0.05$ ), 两者与40~60 cm均无显著性差异( $P>0.05$ )。0~20 cm土层3个林龄C:N无显著差异; 20~40 cm土层为2 a显著高于6 a和9 a( $P<0.05$ ); 40~60 cm土层为9 a显著高于2 a和6 a( $P<0.05$ )。土壤C:P土层深度变化规律一致, 均表现为0~20 cm>20~40 cm>40~60 cm, 两两之间差异显著( $P<0.05$ )。0~20 cm和20~40 cm土层C:P为2 a>9 a>6 a, 两两之间差异显著( $P<0.05$ ); 40~60 cm土层为9 a显著高于其他林龄( $P<0.05$ )。土壤N:P土层深度变化规律不同, 2 a为0~20 cm显著高于其他土层( $P<0.05$ ), 6 a各土层间无显著差异( $P>0.05$ ), 9 a为0~20、20~40 cm显著高于40~60 cm( $P<0.05$ )。除0

~ 20 cm 土层 N:P 显著高于 6 a 和 9 a ( $P < 0.05$ ) 外, 其他土层的林龄之间无显著差异 ( $P > 0.05$ )。0 ~ 60 cm

土壤 C:N、C:P 和 N:P 均值随林龄增大呈先减后增趋势, 但均无显著显著性差异 ( $P > 0.05$ )。

表 2 不同林龄尾巨桉林根系 C、N、P 化学计量比

指标	径级	林龄/a		
		2	6	9
C:N	粗根	131.29±7.38 Ab	194.77±10.58 Aa	140.12±25.10 Aab
	中根	101.11±13.30 ABb	175.96±25.13 Aa	128.31±10.88 Aab
	细根	95.63±3.47 Bb	169.56±14.11 Aa	104.29±1.99 Ab
	平均	121.44±7.06 b	187.87±15.60 a	138.90±24.10 ab
C:P	粗根	1719.84±70.46 Ab	1547.55±33.81 Ab	2546.78±13.22 Aa
	中根	1726.15±219.55 Aa	1380.72±123.92 Aa	1655.46±48.02 Ba
	细根	1507.55±43.17 Aa	1206.23±141.71 Aa	1385.17±44.02 Ba
	平均	1698.37±79.39 b	1485.44±57.64 b	2470.14±89.00 a
N:P	粗根	13.12±0.24 Bab	8.00±0.55 Ab	19.59±4.03 Aa
	中根	17.09±0.12 Aa	8.02±0.69 Ac	12.9±0.39 Ab
	细根	15.82±0.90 Aa	7.07±0.25 Ab	13.58±1.39 Aa
	平均	14.00±0.20 ab	7.99±0.55 b	19.04±3.67 a

注: 1. 不同大写字母表示同一林龄不同径级根系间差异显著 ( $P < 0.05$ );

2. 不同小写字母表示同一径级不同林龄根系间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 3 不同林龄尾巨桉林土壤 C、N、P 化学计量比

指标	土层/cm	林龄/a		
		2	6	9
C:N	0 ~ 20	13.40±0.66 ABa	13.81±1.10 Aa	15.08±0.19 Aa
	20 ~ 40	15.61±1.00 Aa	11.07±1.22 ABb	12.36±0.12 Bb
	40 ~ 60	11.53±0.91 Bab	10.21±0.45 Bb	13.44±0.93 ABa
	平均	13.51±0.73 a	11.70±0.73 a	13.63±0.48 a
C:P	0 ~ 20	33.98±1.24 Aa	23.53±0.53 Ac	27.91±0.48 Ab
	20 ~ 40	25.74±0.26 Ba	19.61±0.29 Bc	22.10±0.39 Bb
	40 ~ 60	14.89±0.29 Cb	14.60±0.26 Cb	18.48±0.08 Ca
	平均	24.87±2.79 a	19.25±1.31 a	22.83±1.39 a
N:P	0 ~ 20	2.54±0.09 Aa	1.72±0.11 Ab	1.85±0.04 Ab
	20 ~ 40	1.66±0.12 Ba	1.82±0.21 Aa	1.79±0.02 Aa
	40 ~ 60	1.31±0.13 Ba	1.44±0.07 Aa	1.39±0.10 Ba
	平均	1.84±0.19 a	1.66±0.09 a	1.67±0.08 a

注: 1. 不同大写字母表示同一林龄不同土层间差异显著 ( $P < 0.05$ );

2. 不同小写字母表示同一土层不同林龄间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

### 3.3 尾巨桉林根系-土壤 C、N、P 含量相关性分析

由表 4 可知, 根系有机 C 含量与根系全 N、土

壤有机 C 含量显著 ( $P < 0.05$ ) 或极显著 ( $P < 0.01$ ) 正相关; 根系全 N 含量与土壤 C、N、P 含量均未达到

显著水平;根系全 P 含量与土壤有机 C、全 P 含量显著( $P<0.05$ )或极显著( $P<0.01$ )负相关。土壤有机 C 含量与土壤全 N、全 P 含量显著( $P<0.05$ )或极显著

( $P<0.01$ )正相关。表明根系-土壤 C、N、P 含量之间相互影响,影响程度存在较大差异。

表 4 尾巨桉林根系-土壤 C、N、P 含量相关性

指标	根系有机 C	根系全 N	根系全 P	土壤有机 C	土壤全 N	土壤全 P
根系有机 C	1					
根系全 N	0.785*	1				
根系全 P	-0.653	-0.358	1			
土壤有机 C	0.893**	0.577	-0.839**	1		
土壤全 N	0.383	0.045	-0.652	0.834**	1	
土壤全 P	0.206	-0.086	-0.756*	0.443*	0.380	1

注: \*表示 $\alpha=0.05$ ; \*\*表示 $\alpha=0.01$ ,下同。

### 3.4 尾巨桉林根系-土壤 C、N、P 化学计量比相关性分析

根系 C:N 与根系 N:P、土壤 C:N 及土壤 C:P 存在显著或极显著的负相关关系(表 5)。根系 C:P 仅与

其 N:P 存在极显著正相关关系。根系 N:P 与土壤 C:N、C:P 存在显著或极显著的正相关关系。土壤 C:N 与 C:P 极显著正相关。土壤 C:P 与 N:P 极显著正相关。

表 5 尾巨桉林根系-土壤 C、N、P 比值相关性

项目	根系			土壤		
	C:N	C:P	N:P	C:N	C:P	N:P
根系	C:N	1				
	C:P	-0.018	1			
	N:P	-0.730**	0.662**	1		
土壤	C:N	-0.733*	0.485	0.630	1	
	C:P	-0.758*	0.318	0.542	0.572**	1
	N:P	-0.142	-0.150	-0.018	-0.013	0.806**

### 3.5 不同林龄尾巨桉林根系 C、N、P 化学计量比内稳性特征

由表 6 可知, 2 a 和 6 a 根系 C、N、P 及其化学计量比均为严格内稳态(除 6 a C:P 内稳指数为

1.795, 为弱敏感型外), 9 a 根系 C、N、P 及其化学计量比均达到内稳态(除 C:P 内稳性指数为 0.694, 为敏感型外)。表明随着土壤营养环境的改变, 6 a 和 9 a 根系 C:P 呈部分比例变化。

表 6 不同林龄尾巨桉林根系 C、N、P 比值内稳性指数

林龄/a	指标	$R^2$	$F$	$P$	斜率	$H$
2	C	0.356	3.869	0.090	0.073	$\infty$
	N	0.399	4.649	0.068	-0.330	$\infty$
	P	0.088	0.673	0.439	-0.674	$\infty$
	C:N	0.020	0.145	0.715	0.167	$\infty$
	C:P	0.197	1.723	0.231	0.160	$\infty$
	N:P	0.339	3.589	0.100	-0.239	$\infty$



续表 6

林龄/a	指标	$R^2$	$F$	$P$	斜率	$H$
6	C	0.058	0.435	0.531	0.011	$\infty$
	N	0.179	1.524	0.257	-0.410	$\infty$
	P	0.106	0.833	0.392	-1.651	$\infty$
	C:N	0.000	0.000	0.984	-0.007	$\infty$
	C:P	0.454	5.813	0.047	0.557	1.795
	N:P	0.002	0.016	0.904	-0.035	$\infty$
9	C	0.895	59.596	0.000	0.210	4.762
	N	0.100	0.780	0.407	-0.416	$\infty$
	P	0.609	10.891	0.013	-4.216	$\infty$
	C:N	0.131	1.054	0.339	0.785	$\infty$
	C:P	0.819	31.756	0.001	1.441	0.694
	N:P	0.158	1.316	0.289	0.718	$\infty$

注:  $H$  为内稳性指数; 拟合方程未达到显著水平( $P>0.05$ )或斜率 $\leq 0$ , 则定义为“ $\infty$ ”。

## 4 讨论

### 4.1 不同林龄尾巨桉人工林根系-土壤 C、N、P 含量特征

根系作为森林生态系统中生物能存在的一种形式, 积累和储存了大量的养分元素, 其凋落分解后将养分归还土壤, 直接参与森林生态系统生物循环过程<sup>[20]</sup>。本研究不同径级根系有机 C 和全 P 含量仅在 9 a 时表现出显著差异性, 说明林龄增大对有机 C 和 P 在不同径级根系的分配影响显著, 对 N 的分配影响不明显。这是因为随着林龄的增大, 不同径级根系生物量占比及阳离子交换能力存在差异<sup>[20]</sup>。

土壤养分元素是植物体内养分元素的主要来源, 林木的养分状况也反映了土壤的肥力状况<sup>[21]</sup>。研究表明, 桉树造林导致热带土壤肥力下降及土壤酸化, 连栽对土壤化学性质负面影响明显<sup>[22-23]</sup>。但也有研究发现桉树取代马尾松(*Pinus massoniana*)后土壤碱解 N、速效 P 及 pH 有所提高<sup>[24]</sup>, 巨尾桉(*E. grandis* × *E. urophylla*)林经营 18 年后土壤供肥潜力提高<sup>[25]</sup>, 14 年生桉树林土壤有机质含量提高了 0.50% ~ 0.75%<sup>[26]</sup>。本研究结果表明, 在 2 a 和 6 a 阶段, 土壤有机 C 和全 N 含量出现降低趋势, 9 a 阶段得到恢复, 全 P 含量随林龄逐渐增大。这可能是因为 9 a 阶段, 林木生长速率减缓, 对养分的

吸收利用率降低, 同时凋落物不断积累和分解, 养分归还土壤高于消耗。

根系与土壤直接接触, 是植物生命活动的重要场所<sup>[27]</sup>。在植被-土壤系统中, 土壤养分可直接影响植物对养分的吸收和利用, 改变植物养分含量、化学计量比及其生态策略<sup>[28]</sup>。本研究结果发现, 根系有机 C 主要受土壤有机 C 影响, 根系全 P 含量主要受土壤有机 C 和土壤全 P 的共同影响。根系 C、N、P 和土壤养分元素关系密切, 受土壤养分状况的影响明显。

### 4.2 不同林龄尾巨桉人工林根系-土壤 C、N、P 化学计量比特征

植物 C:N 和 C:P 可以反映 N、P 利用效率和植物生长速率, N:P 则反映植物受 N 或 P 的限制情况。本研究中, 不同林龄尾巨桉根系 C:N 和 C:P 均远高于高于全球植物根系平均水平(48.25 和 1158.00)<sup>[29]</sup>, 表明研究区尾巨桉人工林具有较高的元素利用效率。N:P 均低于全球平均水平(24.00)<sup>[30]</sup>, 2 a 和 9 a 均高于全国平均水平(13.5), 6 a 则远低于全国平均水平<sup>[31]</sup>, 说明随着林分的不断演替, 养分限制状况的决定元素可能会出现差异。

土壤 C:N:P 是评价土壤质量的重要指标<sup>[31]</sup>。本研究中, 土壤 C:N 为 11.70 ~ 13.63, 较为接近全球土壤 C:N 平均水平(14.31)<sup>[32]</sup>和中国湿润温带土壤

C:N 为 10~12, 远低于热带、亚热带地区红、黄壤(20)<sup>[33]</sup>, 说明研究区土壤硝酸盐淋溶风险高<sup>[34]</sup>。C:P 和 N:P 分别为 19.25 ~ 24.87 和 1.66 ~ 1.84, 远低于全球平均水平(186 和 13)<sup>[33]</sup>和森林表层土壤(81.9 和 6.6)<sup>[35]</sup>, 而研究区全 P 含量处于较高水平, 说明研究区可能存在 N 素有效性低的现象。

相关性分析表明, 根系 N:P 与 C:N、C:P 存在极显著相关性, 说明根系对环境 N、P 的应对策略会影响根对碳的固存。根系 C:N 与土壤 C:N、C:P 均为显著负相关, 说明了植物对营养元素的需求依赖于土壤中的营养元素, 土壤有机 C 与根系有机 C、全 P 的极显著相关性也证明了这一点。

#### 4.3 不同林龄尾巨桉人工林根系内稳性特征

生态化学计量内稳性能够较好地反映生物对环境变化的生理和生化得适应, 生物体内稳性的强弱与物种的生态策略和适应性有关<sup>[36]</sup>。2 a 和 6 a 根系 C、N、P、C:N、C:P、N:P 均具有内稳性, 即具有保持其自身化学元素组成相对稳定的能力。9 a 根系 C:P 属于敏感型, 说明二者受土壤环境的影响较大, 具有一定的可塑性。这是由于整地、造林及施肥等人为措施大幅度改变了土壤环境, 而根系会采取一些生理策略应对这种养分元素的剧烈变化, 从而保持自身化学元素的相对稳定。随着时间的推移, 植物在不同的生长发育阶段会具有不同的内稳性特征, 这反映了植物在不同养分条件下对其生长过程中地上与地下器官养分分配的权衡, 这也是其逐渐对环境生理策略适应的结果<sup>[37]</sup>。

#### 参考文献

- [1] 王敬国.微生物与根际中物质的循环(综述)[J].北京农业大学学报,1993,19(4):98-105.
- [2] 韩兴国,李凌浩,黄建辉.生物地球化学概论[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [3] REICH P B,TJOELKER M G,MACHADO J,et al.Universal scaling of respiratory metabolism, size and nitrogen in plants[J].Nature, 2006,439(7075):457-461.
- [4] STERNER W R, ELSER J J. Ecological stoichiometry: the biology of elements from molecules to the biosphere[M].New Jersey,USA:Princeton University Press, 2002.
- [5] ZHANG L X, BAI Y F, HAN X G. Application of N: P stoichiometry to ecology studies[J].Acta Botanica Sinica,2003,45(9):1009-1018.
- [6] 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.
- [7] MICHAELS A F. The ratios of life[J].Science,2003, 300(5621):906-907.
- [8] ELSER J J, STERNER R W, Gorokhova E,et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems[J]. Ecology Letters,2000,3(6):540-550.
- [9] 曾德慧,陈广生.生态化学计量学:复杂生命系统奥秘的探索[J].植物生态学报,2005,29(6):141-153.
- [10] KOOJIMAN S A L M. The stoichiometry of animal energetics[J].Journal of Theoretical Biology, 995,177(2): 139-149.
- [11] PERSSON J, FINK P, GOTO A, et al. To be or not to be what you eat: regulation of stoichiometric homeostasis among autotrophs and heterotrophs[J].Oikos, 2010,119(5):741-751.
- [12] GÜSEWELL S.N:P ratios in terrestrial plants: variation and functional significance[J].New Phytologist,2004, 164(2):243-266.
- [13] 国家林业和草原局.中国森林资源报告(2014—2018)[M].北京:中国林业出版社,2019.
- [14] 黄国勤,赵其国.广西桉树种植的历史、现状、生态问题及应对策略[J].生态学报,2014,34(18):5142-5152.
- [15] 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.
- [16] 许宇星,王志超,竹万宽,等.不同品种桉树林生活叶-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征[J].西北农林科技大学学报(自然科学版), 2018,46(3):94-100.
- [17] 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.
- [18] MAKINO W, COTNER J B, STERNER R W, et al. Are bacteria more like plants or animals? growth rate and resource dependence of bacterial C:N:P stoichiometry[J].Functional Ecology, 2003,17(1):121-130.



- [19] XING W, WU H, SHI Q, et al. Multielement stoichiometry of submerged macrophytes across Yunnan plateau lakes (China)[J]. *Scientific Reports*, 2015,5:10186.
- [20] 辛学兵,孔庆云,方江平.西藏色季拉山冷杉林木根系营养元素的特征分析[J]. *林业科学研究*,2007,20(5):717-721.
- [21] 周振英,宋恭诚.落叶松针叶营养元素含量和土壤条件的关系[J]. *林业科技*,1990(4):11-12.
- [22] 茶正早,黎仕聪,林钊沐,等.海南岛桉林土壤肥力的研究[J]. *热带作物学报*,1999,20(2):37-43.
- [23] 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.
- [24] 何秋香,邹杰,黄芳英,等.桉树取代马尾松后土壤肥力变化研究[J]. *安徽农业科学*,2011,39(18):10874-10876.
- [25] 郑志雷,周建清,姚庆端,等.巨尾桉林地土壤化学性质变化分析[J]. *桉树科技*,2011,28(2):50-55.
- [26] 赵廷香,麦昌金.桉树林生态环境的变化[J]. *广西林业*, 1988,(4):31-33.
- [27] 安申群,贡璐,朱美玲,等.塔里木盆地北缘典型荒漠植物根系化学计量特征及其与土壤理化因子的关系[J]. *生态学报*,2017,37(16):5444-5450.
- [28] 杨惠敏,王冬梅.草-环境系统植物碳氮磷生态化学计量学及其对环境因子的响应研究进展[J]. *草业学报*, 2011,20(2):244-252.
- [29] JACKSON R B, MOONEY H A, SCHULZE E D. A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*,1997,94(14):7362-7366.
- [30] HAN W, FANG J, GUO D, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *New Phytologist*, 2005,168(2):377-385.
- [31] 程滨,赵永军,张文广,等.生态化学计量学研究进展[J]. *生态学报*, 2010,30(6):1628-1637.
- [32] CLEVELAND C C, LIPTZIN D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007,85(3):235-252.
- [33] 黄昌勇.土壤学[M].北京:中国农业出版社,2000.
- [34] GUNDERSEN, CALLESEN, VRIES D E. Nitrate leaching in forest ecosystems is related to forest floor C/N ratios[J]. *Environmental Pollution*, 1998,102(1):403-407.
- [35] TIAN H, CHEN G, ZHANG C, et al. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010,98(1/3):139-151.
- [36] JEYASINGH P D, WEIDER L J, STERNER R W. Genetically-based trade-offs in response to stoichiometric food quality influence competition in a keystone aquatic herbivore[J]. *Ecology Letters*, 2010,12(11):1229-1237.
- [37] 蒋利玲,何诗,吴丽凤,等.闽江河口湿地3种植物化学计量内稳性特征[J]. *湿地科学*, 2014,12(3):293-298.