

不同林龄尾巨桉人工林凋落物和土壤 C、N、P 化学计量特征

竹万宽, 陈少雄, 王志超, 许宇星, 张利丽, 杜阿朋*

(国家林业局桉树研究开发中心, 广东 湛江 524022)

摘要: 为正确认识桉树(*Eucalyptus* spp.)人工林凋落物和土壤 C、N、P 时空分配格局及两者间的关系, 对 5 个林龄尾巨桉林分凋落物及土壤 C、N、P 含量及化学计量比进行测定分析。结果表明, 凋落物的 C 含量均显著大于土壤, 且不同林龄间凋落物 C 含量无显著差异, 1 年生人工林土壤表层(0~20 cm)的 C 含量显著小于 3~7 年生, 其他土层 C 含量在不同林龄间差异不显著。凋落物的 N 含量均显著高于土壤, 且 1 年生人工林显著大于其他林龄的, 而土壤表层的 N 含量以 7 年生人工林最大, 1 年生的最小。凋落物的 P 含量除 1 年生人工林显著大于 3 年生外, 其他林龄间均无显著差异, 土壤的 P 含量在不同林龄间的差异均不显著。凋落物 C:N 随林龄呈逐渐增大趋势, 且显著大于土壤层。凋落物的 C:P 和 N:P 在不同林龄间的差异不显著, 但均显著大于土壤层。凋落物的 N 含量与表层土壤的 C、N 含量呈极显著负相关, 凋落物的 C:N 与表层土壤的 C:P, N:P 呈显著正相关, 表层土壤 C、N 积累受到凋落物 N 的制约。因此, 在桉树人工林经营管理过程中如何降低凋落物分解的 N 限制性、提高养分传递效率及合理施肥显得十分重要。

关键词: 尾巨桉人工林; 凋落物; 土壤; 化学计量特征

doi: 10.11926/jtsb.3665

Ecological Stoichiometric Characteristics of Carbon, Nitrogen and Phosphorus in Litter and Soil of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* Plantation at Different Forest Ages

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

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

Abstract: In order to understand the temporal and spatial distribution pattern and stoichiometry characteristics of carbon, nitrogen, phosphorus in litter and soil of *Eucalyptus* plantation, the contents of carbon, nitrogen, phosphorus in litter and soil of *E. urophylla* × *E. grandis* plantation under five forest ages were analyzed. The results showed that the C content in litter was significantly higher than that in soil, and had no significant difference among forest ages. The C content in surface soil (0–20 cm) at 1-year-old forest was the lowest, and that in other soil layers had no significant difference among forest ages. The N content of litter was higher significantly than that in soil, and which at 1-year-old forest was the highest. The N content of surface soil in 7-year-old forest was the highest, which in 1-year-old forest was the smallest. The P content of litter had no significant difference among forest ages except 1-year-old forest was obviously bigger than 3-year-old forest. The P content in soil had no significant difference among forest ages. The C:N in litter increased with forest ages,

收稿日期: 2016-08-22

接受日期: 2016-10-15

基金项目: 广东省林业科技创新项目(2014KJCX021-04, 2013KJCX014-03); 林业科技创新平台运行补助项目(2015-LYPT-DW-006)资助

This work was supported by the Forestry Science and Technology Innovation Project of Guangdong Province (Grant No. 2014KJCX021-04, 2013KJCX014-03), and Project for Forestry Science and Technology Innovation Platform Operation Subsidy (Grant No. 2015-LYPT-DW-006).

作者简介: 竹万宽(1989~), 男, 在读研究生, 主要从事桉树可持续经营研究。E-mail: zwk_2015@163.com

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

which was significantly higher than that in soil. The C : N, N : P in litter had no significant difference among forest ages, which were higher than soil. The N content in litter was negatively correlated with C and N contents in soil, and there were significant relation between C : N in litter and C : P, N : P in surface soil. The C and N accumulation in surface soil was restricted by N content in litter. Therefore, it was important in sustainable management of *Eucalyptus* plantation for reduce N limitation in litter, increase nutrient transfer efficiency and rational application of fertilizer.

Key words: *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantation; Litter; Soil; Stoichiometry

凋落物和土壤作为森林生态系统的重要组成部分,他们之间的相互作用关系研究是生态学领域的研究热点之一^[1]。凋落物养分元素的化学计量特征是研究林地森林生态系统生产力的重要指示性指标^[2]。土壤作为凋落物载体,其碳氮磷是生物体内元素的主要来源,在生态系统物质循环以及多元素平衡过程中发挥着重要作用^[3]。生态化学计量学主要是用于分析多重化学元素的质量平衡对生态交互作用的影响^[4-5]。研究凋落物与土壤 C、N、P 的生态化学计量特征及其相互作用关系,对人工林养分利用的有效性和限制性以及 C、N、P 循环和平衡具有重要意义。目前,国外在凋落物分解^[6-7]、凋落物量对土壤有机碳影响^[8]、凋落物-微生物系统^[9]和凋落物养分元素化学计量^[10-12]等方面有较多研究。在国内,对植株^[13-14]、土壤^[15-16]及植株-凋落物-土壤系统^[17,25]的 C、N、P 化学计量特征研究较多,而对桉树人工林凋落物和土壤之间的化学计量特征的研究较少,因此,研究桉树人工林凋落物与土壤之间 C、N、P 含量及其化学计量比之间的关系对于了解桉树人工林生态系统的养分循环规律和系统稳定机制具有重要意义。

桉树(*Eucalyptus* spp.)原产自澳大利亚、印度尼西亚等热带地区,是世界三大速生树种之一,目前在全球种植面积超过 $2.0 \times 10^7 \text{ hm}^2$ 。截至 2015 年底中国桉树人工林面积已达 $4.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$,是华南地区最重要的速生丰产林树种和林木生物质能源的重要组成部分^[18]。桉树生长快、轮伐期短,高强度经营中的施肥抚育除杂等措施使得对桉树林分的养分循环研究难度加大,研究桉树林生态系统的化学计量参数的变化可以更好地揭示桉树生长过程中各养分要素的相互关系及限制作用。目前,对桉树林分的生态化学计量研究不多,仅有不同立地^[19]、不同整地方式^[20]林地土壤 C、N、P、K 化学计量特征和桉树叶片 N、P、S 化学计量特征^[21]等少量研究。本研究对雷州半岛不同林龄尾巨桉(*E. urophylla* ×

E. grandis)人工林凋落物-土壤的 C、N、P 化学计量特征进行研究,探讨林龄等因素对桉树人工林生态系统养分元素分配格局的影响,以期对桉树人工林可持续经营提供科学依据。

1 样地概况

研究区位于广东湛江桉树森林生态系统国家定位观测站(21°30' N, 111°38' E),平地,海拔 80 m,属热带海洋性气候,年降雨量 1200~1700 mm。全年降雨多集中在 5-10 月份,占全年降雨量的 77%~85%,具有典型早雨两季;年平均气温 23℃左右,最低温度 0℃以上;太阳年辐射总量 4240 MJ m^{-2} ,年均相对湿度在 80%以上。试验区土壤类型主要是玄武岩砖红壤^[22],土层厚度 2 m 以上,0~80 cm 土层内平均有机质含量 1.6%以上, pH 4.5~5.3,土壤肥力属中等水平。乔木层主要是尾巨桉(*E. urophylla* × *E. grandis*),少量台湾相思(*Acacia confuse*);灌木层有鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)、白背叶(*Mallotus apelta*)、五色梅(*Common lantana*)等,草本层较为丰富。本文所调查的 1、2、3、5 和 7 年生尾巨桉人工林分别造林于 2014、2013、2012、2010 和 2008 年,造林方式为挖穴造林,造林密度均为 $1666 \text{ ind. hm}^{-2}$,造林面积分别为 12.67、2.00、2.00、6.67 和 6.67 hm^2 。各尾巨桉林于造林前穴施高浓度复合肥作为基肥,造林后第二、三年 6-7 月采用条沟状施肥法释放桉树专用肥作为追肥。林分基本概况见表 1。

2 方法

2.1 样地设置及样品采集、分析

2015 年 6-7 月,在 5 个林龄尾巨桉人工林内各设置 3 个 20 m × 20 m 采样点样方,在每个样方四角和对角线交叉处分别设置 1 个 1 m × 1 m 的小样方,剪除小样方内可见绿色植物后采集全部地表凋落

表 1 林分基本概况

Table 1 Basic situation of sample plot

林龄 (a) Age	经度 Longitude	纬度 Latitude	海拔 Altitude (m)	坡度 Slope (°)	坡向 Aspect	胸径 DBH (cm)	树高 Height (m)	凋落物 Litter (%)		
								乔木 Arbor	灌木 Shrub	草本 Herb
1	21°15'700"	110°06'110"	122	10	NE	3.72	3.90	81	15	4
2	21°15'713"	110°06'110"	88	0	—	9.03	11.01	80	14	6
3	21°15'840"	110°05'839"	88	0	—	10.95	12.51	75	18	7
5	21°15'713"	110°06'085"	128	8	NE	17.33	15.45	65	24	11
7	21°15'561"	110°06'359"	144	8	E	21.50	20.90	68	20	12

物,混合均匀后装入牛皮纸袋标记后带回实验室。在每个采样点样方内随机挖取 2 个土壤剖面,分别取 0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 土层土壤样品,将各采样点样方同一土层样品去除根、石头等杂物后混合均匀,四分法取样后带回实验室自然风干,粉碎、过 100 目筛后测定 C、N、P。凋落物除去鸟粪、石砾和昆虫等杂物后称取总重,按照乔木枝叶皮、灌木枝叶、草本进行分类后分别称重,计算各组分比例,在 65℃ 下烘干至恒重,机械磨碎过 100 目筛,测定 C、N、P 含量。凋落物和土壤有机 C 含量采用重铬酸钾氧化-容量法测定,凋落物全 N 含量采用 H₂SO₄-H₂O₂ 扩散法,土壤全 N 含量采用开氏法,凋落物全 P 含量采用钒钼黄比色法,土壤全 P 采用碱熔-钼锑抗比色法。

2.2 数据分析

使用 Excel 2007 和 SPSS 19.0 进行作图和统计分析,采用 Pearson 法进行相关性分析,采用单因素方差分析(One-Way ANOVY)和 LSD 多重比较法进行差异显著性分析。

3 结果和分析

3.1 凋落物-土壤的有机碳、全氮和全磷含量特征

从表 2 可见,5 个尾巨桉林地凋落物有机 C 含量为 480.83~511.50 g kg⁻¹,均值为 493.23 g kg⁻¹,林龄间差异不显著,但均显著大于林地土壤层($P<0.05$)。尾巨桉林地中 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的有机 C 含量依次为 17.70~28.20 g kg⁻¹、15.11~19.46 g kg⁻¹ 和 11.34~14.26 g kg⁻¹。2 年、3 年、5 年、7 年生林地表层土壤(0~20 cm,下同)有机 C 含量均显著高于 1 年生林地的($P<0.05$),表层土壤有机 C 含量基本随林龄增加而增加,其余土层在林龄间差异不显著。

5 个尾巨桉林地凋落物的全 N 含量为 5.28~9.18 g kg⁻¹,平均 6.64 g kg⁻¹,随林龄增加呈下降趋势,但与有机 C 含量一样均大于林地土壤层。0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的全 N 含量分别为 1.19~1.87 g kg⁻¹、0.98~1.39 g kg⁻¹ 和 0.70~1.21 g kg⁻¹。除 5 年生人工林表层土壤的全 N 含量显著大于其他土层($P<0.05$),3 年生人工林表层土壤显著大于 40~60 cm 土层($P<0.05$)外,同一林龄不同土层间的全 N 含量均无显著差异;1 年生和 5 年生人工林表层土壤的全 N 含量差异不显著,但显著小于 2 年、3 年和 7 年生人工林的,而其他林龄间无显著差异;2 年生人工林 20~40 cm 土层的全 N 含量显著大于 7 年生的,其他林龄间无显著差异;40~60 cm 土层的全 N 含量在林龄间无差异。可见,不同林龄间表层土壤的全 N 含量波动要大于深层土壤。

5 个尾巨桉林地凋落物的全 P 含量为 0.40~0.69 g kg⁻¹,平均 0.51 g kg⁻¹,3 年生人工林的显著小于 1 年生($P<0.05$),随林龄增加呈先降低后增加的趋势,且除 1 年生人工林凋落物的全 P 含量与土壤各层的差异不显著外,其他林龄凋落物全 P 含量均显著小于土壤层($P<0.05$)。土壤 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的全 P 含量分别为 0.73~0.93 g kg⁻¹、0.68~0.82 g kg⁻¹ 和 0.67~0.80 g kg⁻¹,土壤各层和不同林龄间的全 P 含量均无显著差异($P>0.05$)。

3.2 凋落物-土壤的有机碳、全氮和全磷生态化学计量比特征

从表 3 可见,尾巨桉人工林凋落物的 C:N 为 54.07~92.17,显著大于土壤的($P<0.05$)。随林龄增加,凋落物的 C:N 先增大后下降,其中 3 年生、5 年生人工林凋落物的 C:N 显著大于 1 年生和 2 年生的($P<0.05$),7 年生的显著大于 1 年生的($P<0.05$)。

表 2 凋落物-土壤中的有机碳、全氮、全磷含量

Table 2 Contents of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus in litter and soil

	林龄 Age (a)	凋落物 Litter	土层 Soil layer (cm)			
			0~20	20~40	40~60	0~60
有机碳 (g kg ⁻¹) Organic carbon	1	497.37±72.40Aa	17.70±3.50Bb	17.94±2.79Ab	13.46±3.23Ab	16.37±3.52
	2	491.27±44.03Aa	22.98±2.56ABb	19.46±2.65Ab	14.26±3.16Ab	18.90±4.51
	3	485.20±25.23Aa	27.47±3.78Ab	17.27±4.31Ab	11.34±1.79Ab	18.70±7.68
	5	480.83±23.78Aa	27.67±6.46Ab	17.32±1.81Ab	13.98±4.41Ab	19.66±7.37
	7	511.50±19.59Aa	28.20±2.15Ab	15.11±1.65Ab	13.18±3.30Ab	18.83±7.39
全氮 (g kg ⁻¹) Total N	1	9.18±0.63Aa	1.19±0.14Cb	1.06±0.21ABb	1.11±0.48Ab	1.12±0.28
	2	7.24±0.40Ba	1.66±0.06BCb	1.39±0.22Ab	1.21±0.22Ab	1.42±0.25
	3	5.30±0.58Ca	1.76±0.29ABb	1.12±0.22ABbc	0.70±0.13Ac	1.19±0.50
	5	5.28±0.15Ca	1.49±0.23BCb	1.03±0.21ABc	0.70±0.25Ac	1.07±0.40
	7	6.20±1.22BCa	1.87±0.17Ab	0.98±0.04Bb	0.78±0.14Ab	1.10±0.50
全磷 (g kg ⁻¹) Total P	1	0.69±0.19Ab	0.85±0.07Ab	0.82±0.06Ab	0.79±0.13Ab	0.82±0.08
	2	0.55±0.12ABb	0.77±0.03Aa	0.74±0.02Aa	0.67±0.02Aa	0.73±0.05
	3	0.40±0.05Bb	0.93±0.21Aa	0.81±0.15Aa	0.70±0.04Aa	0.81±0.16
	5	0.44±0.13ABb	0.73±0.05Aa	0.68±0.02Aa	0.67±0.07Aa	0.69±0.05
	7	0.45±0.15ABb	0.88±0.12Aa	0.76±0.13Aa	0.80±0.16Aa	0.81±0.13

同行数据后不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)，同列数据后不同大写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Data followed different small letters within line indicate significant difference at 0.05 level, and followed different capital letters within column indicate significant difference at 0.05 level. The same is following Tables.

表 3 凋落物-土壤的 C : N、C : P 和 N : P

Table 3 C : N, C : P and N : P in litter and soil

	林龄 Age (a)	凋落物 Litter	土层 Soil layer (cm)		
			0~20	20~40	40~60
C : N	1	54.07±5.38Ca	14.86±2.15ABb	17.14±2.26Ab	13.30±4.61ABb
	2	67.92±6.04BCa	13.87±1.50Bb	14.03±1.23Ab	11.70±0.99Bb
	3	92.17±10.78Aa	15.85±3.00ABb	15.71±4.20Ab	16.63±5.09ABb
	5	91.09±4.41Aa	18.50±2.40Ab	17.11±2.69Ab	20.35±3.59Ab
	7	84.88±17.81ABa	15.06±0.21ABb	15.43±1.73Ab	17.05±3.87ABb
C : P	1	750.05±200.86Aa	21.05±5.55Bb	22.21±5.17Ab	17.14±3.31Ab
	2	922.91±186.89Aa	29.82±2.67ABb	26.41±3.49Ab	21.39±5.25Ab
	3	1213.94±146.41Aa	30.29±5.75ABb	21.18±2.30Ab	16.21±1.62Ab
	5	1178.36±408.24Aa	37.87±7.43Ab	25.44±2.17Ab	20.59±4.39Ab
	7	1219.21±373.12Aa	32.35±5.28Ab	20.32±4.31Ab	16.60±2.61Ab
N : P	1	13.77±2.91Aa	1.41±0.19Bb	1.31±0.34Bb	1.37±0.38ABb
	2	13.52±1.98Aa	2.15±0.04Ab	1.89±0.31Ab	1.82±0.36Ab
	3	13.17±0.37Aa	1.98±0.62ABb	1.39±0.25ABbc	1.02±0.21Bc
	5	12.87±4.18Aa	2.04±0.20ABb	1.51±0.27ABb	1.03±0.26Bb
	7	14.16±1.92Aa	2.15±0.36Ab	1.31±0.17Bb	1.02±0.34Bb

0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土壤层的 C : N 分别为 13.87~18.50、14.03~17.14 和 11.70~20.35，同一林龄不同土层间均无显著差异。5 年生人工林 0~20 cm 与 40~60 cm 土层的 C : N 均显著大于 2 年生的，其他林龄间均无显著差异，而 20~40 cm 土层在林龄间无显著差异。

尾巨桉人工林凋落物的 C : P 为 750.05~1219.21，显著大于土壤($P<0.05$)，各林龄间无显著差异。0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 土层的 C :

P 分别为 21.05~37.87、20.32~26.41 和 17.14~21.39。同一林龄不同土层间无显著差异；除 1 年生人工林 0~20 cm 土层的 C : P 显著小于 5 年生和 7 年生外($P<0.05$)，其他土层在林龄间无显著差异($P>0.05$)。

尾巨桉人工林凋落物的 N : P 显著大于土壤的($P<0.05$)，凋落物的 N : P 为 12.87~14.16，各林龄间无显著差异。0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 分别为 1.41~2.15、1.31~1.89 和 1.02~1.87，除 3 年生人工林 40~60 cm 土层的 N : P 显著小于 0~20 cm

的外, 同一林龄不同土层间均差异不显著。0~20 cm 土层, 1 年生人工林的 N:P 显著小于 2 年生和 7 年生的($P<0.05$), 其他林龄间无显著差异; 20~40 cm 土层, 2 年生人工林的 N:P 显著大于 1 年生和 7 年生的($P<0.05$), 其他无显著差异; 40~60 cm 土层, 2 年生人工林的 N:P 显著大于 3 年生、5 年生和 7 年生的($P<0.05$), 其他林龄间均无显著差异。

3.3 相关性分析

将凋落物与土壤各层的有机 C、全 N、全 P 含量及其化学计量比进行 Pearson 相关分析(表 4), 结

果表明, 尾巨桉人工林凋落物全 N 含量与表层土壤有机 C 含量、C:P 和 N:P 呈极显著负相关, 与 0~20 cm 土层全 N 含量呈显著负相关, 说明研究区土壤表层有机 C、全 N 含量、C:P 和 N:P 主要受凋落物全 N 含量的影响。凋落物 C:N 与表层土壤有机 C 含量、C:P 和 N:P 呈极显著正相关, 与全 N 含量呈显著正相关, 也证明了凋落物全 N 含量是影响土壤表层养分结构的主要因素。40~60 cm 土层中仅全 N 含量与凋落物 C:N 呈显著负相关, 说明凋落物与表层土壤的相关程度明显高于其他土壤层。

表 4 土壤-凋落物有机碳、全氮、全磷含量及其化学计量比的相关性

Table 4 Correlations of organic carbon, total nitrogen and total phosphorus contents and their stoichiometries in soil and litter

土层 Soil layer (cm)	凋落物 Litter					
	C	N	P	C:N	C:P	N:P
0~20	-0.052	-0.728**	-0.392	0.696**	0.356	-0.303
	-0.027	-0.620*	-0.450	0.588*	0.391	-0.084
	0.152	0.149	0.106	-0.136	-0.186	-0.108
	-0.043	-0.314	-0.007	0.308	0.041	-0.366
	-0.165	-0.747**	-0.413	0.700**	0.410	-0.227
	-0.139	-0.657**	-0.473	0.610**	0.455	-0.021
20~40	-0.017	0.310	0.374	-0.359	-0.289	-0.140
	0.122	0.235	0.308	-0.241	-0.241	-0.186
	0.167	0.459	0.324	-0.454	-0.403	-0.073
	-0.253	0.001	-0.052	-0.070	0.021	0.136
	-0.134	-0.005	0.138	-0.048	-0.008	-0.075
	0.006	-0.019	0.113	0.005	-0.016	-0.126
40~60	0.138	0.274	0.027	-0.290	-0.016	0.354
	-0.225	0.457	0.165	-0.558*	-0.292	0.289
	0.157	0.415	0.136	-0.407	-0.193	0.256
	0.222	-0.303	-0.188	0.360	0.277	-0.034
	0.004	0.032	-0.069	-0.073	0.099	0.237
	-0.264	0.311	0.132	-0.422	-0.237	0.173

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

4 讨论和结论

4.1 凋落物-土壤有机碳、全氮和全磷含量特征

本研究中 5 个林分凋落物的有机 C 含量为 480.83~511.50 g kg⁻¹, 均高于崔宁洁等^[23]报道的宜宾市来复林区马尾松(*Pinus massoniana*)人工林凋落物有机 C 含量(388~453 g kg⁻¹)和赵维俊等^[24]报道的祁连山自然保护区云杉(*Picea crassifolia*)林凋落物有机 C 含量(379.9 g kg⁻¹)。本文 5 个林分凋落物的 N 含量均高于陈亚梅等^[25]报道的四川乐山兴福寺巨桉(*Eucalyptus grandis*)混交林凋落物 N 含量(5 g kg⁻¹), 但低于王卫霞等^[26]报道的广西红锥

(*Castanopsis hystrix*)林(19.6 g kg⁻¹)和格木(*Erythrophleum fordii*)林凋落物 N 含量(11.3 g kg⁻¹); 本文 5 个林分凋落物的 P 含量低于李芳菲等^[27]报道的黄土高原沟壑区刺槐(*Robinia pseudoacacia*)人工林凋落物 P 含量(1.10~1.24 g kg⁻¹)。除 1 年生人工林外, 其它林龄林地凋落物的 P 含量均低于土壤层, 这与前人^[23-24,28-29]的研究结果不同, 主要是由于桉树人工林在造林及营林过程中频繁施用有机或无机磷肥, 导致可溶性的磷很容易被固定变为不溶性的, 一般每年只有 10%~20%的磷肥能被植物吸收利用, 土壤不溶性磷不断累积。本研究中凋落物有机 C 含量随林龄变化不显著, 凋落物 N、P 含量随林龄增加

呈先减后增的变化趋势, N 含量在 5 年生人工林最小, P 含量以 3 年生人工林最小, 这可能是由于 3~5 年后, 尾巨桉林下形成明显的垂直结构, 凋落物的组分不仅包括尾巨桉枝叶皮, 灌木草本所占比例增大, 使得凋落物 N、P 含量有所回升。

5 个尾巨桉林地土壤的 C、N、P 含量随土层加深均呈下降趋势, 这与曹娟等^[15]的研究结果一致。凋落物的 C、N 含量均高于土壤, 而 P 含量低于土壤, 凋落物的 P 主要来源于乔木、灌木和草本植物枝叶, 而雷州半岛处于土壤 P 元素供应比较稀缺的地区, 植物枝叶凋落前的养分再吸收^[30]降低了凋落物的 P 含量。凋落物 N 和 P 含量呈极显著正相关, 由于桉树林下凋落物组分中落叶占 84.86%~90.04%^[31], 任书杰等^[32]对中国东部南北样带的研究表明植物叶片中 N、P 含量存在显著相关性, 因此可能是植物叶片凋落前虽因养分再利用降低了 N、P 含量, 但不足以改变叶片内 N、P 含量的相互关系, 从而凋落物 N、P 含量表现出与植物活体叶片相似的相关性, 具体的耦合机制还有待进一步研究。凋落物的 N 含量与 0~20 cm 土层的 C、N 含量均呈极显著负相关, 这反映了凋落物的养分含量变化可以影响土壤养分含量, 土壤养分承自凋落物, 二者具有非常紧密的关联性。

本研究中 0~20 cm 土层的 C 含量随林龄增长而增加, 碳蓄积能力增强, 其中 3 年生、5 年生和 7 年生人工林的表层土壤 C 含量(27.47、27.67 和 28.20 g kg⁻¹) 高于全国均值(24.56 g kg⁻¹)^[26], 与闽南山区桉树人工林 0~20 cm 土层 C 含量相似(28.07~28.33 g kg⁻¹)^[33]。5 个林地土壤全 N 含量(1.19~1.87 g kg⁻¹) 均低于全国均值(1.88 g kg⁻¹)^[26], 土壤全 N 量是衡量土壤氮素供应状况的重要指标, 森林土壤全 N 量的消长与土壤有机质含量的变化一样, 主要决定于各地区有机质的积累和分解作用的相对强度^[1]。0~20 cm、20~40 cm 土层的 C、N 含量呈显著、极显著正相关, 表明深层土壤养分来源于表层土壤养分的淋溶迁移。表层土壤的 C、N 含量均为 7 年生人工林最高, 说明土壤养分随林龄得到积累。1 年生、3 年生和 5 年生人工林的 0~20 cm 土层 P 含量(0.85、0.93 和 0.88 g kg⁻¹) 高于全国均值(0.78 g kg⁻¹)^[26], 一般当全 P 低于 0.8~1 g kg⁻¹ 时土壤常出现 P 供应不足^[34]。土壤全 P 包括土壤速效 P 和迟效 P, 土壤速效 P 只占全 P 的极小部分, 而土壤中的速效 P 与全 P 有时并不相关, 所以土壤全 P 不能作为一般土壤 P 供

应水平的指标^[34]。

4.2 凋落物-土壤的有机碳、全氮和全磷化学计量特征

土壤有机质和凋落物的 C、N、P 化学计量比是决定凋落物分解的重要因子, 也可以表征 N、P 养分限制状况^[35]。5 个尾巨桉林分凋落物的 C:N 有随林龄逐渐增加的趋势, 且均高于中国森林生态系统凋落物的 C:N (44.3)^[36]。5 个尾巨桉林分凋落物 C:P 在林龄间的差异不显著, 其中 3 年生、5 年生和 7 年生人工林高于中国森林生态系统凋落物的 C:P (1132.5)^[36], 尾巨桉林凋落物的 N:P 在林龄间的差异不显著, 但均低于中国和全球森林生态系统凋落物的 N:P (25.0 和 20.3)^[36]。有研究表明, 凋落物的分解速率与 C:N、C:P 具有正相关关系, 和 N:P 呈负相关关系^[37]。潘复静等^[38]的研究结果表明, N:P 大于 25 和 P 含量低于 0.22 g kg⁻¹ 时凋落物分解受 P 的限制性强, 本研究中 5 个尾巨桉林分凋落物 N:P (13.77、13.52、13.17、12.87、14.16) 均小于 25, 但 P 含量(0.69、0.55、0.40、0.44、0.45 g kg⁻¹) 均高于 0.22 g kg⁻¹, 说明本研究中凋落物分解的主要限制性元素是 N。

土壤 C:N 作为土壤质量的敏感性指标, 可以用来衡量土壤 C、N 营养平衡状况, 它的演变趋势对土壤 C、N 循环有重要影响^[39]。本研究中 5 个尾巨桉林分 0~20 cm、20~40 cm 土层 C:N 均高于我国陆地土壤 C:N 的平均值(11.9)^[33], 表明土壤有机质具有较慢的矿化作用。同一林龄不同土层间的差异不显著, 各土层 C:N 均随林龄呈先减后增再减的变化规律。土壤 C:P 是衡量微生物矿化土壤有机物质释放磷或从环境中吸收固持磷素潜力的一个指标, 较低的 C:P 说明微生物在矿化土壤有机质中释放磷的潜力较大^[15]。本研究中 5 个尾巨桉林分 0~20 cm 土层 C:P 远低于中国陆地土壤的 C:P (52.7)^[36], 且 1 年生与 5 年生、7 年生人工林间存在显著差异, 这可能与造林后桉树迅速生长不断消耗土壤 P 素而凋落物分解释放缓慢有关。土壤 C:P 除 1 年生人工林外均随着土层的加深而减小, 这主要是土壤腐殖质层对植物养分供应与桉树生长吸收利用不同造成的。土壤 N:P 可用作 N 养分限制、饱和的诊断指标, 指示植物生长过程中土壤营养成分的供应情况。尾巨桉林土壤不同土层 N:P 随林龄的变化规律不明显, 但均低于我国土壤的 N:P

均值(5.2)^[40], 研究区所在地为玄武岩发育而成的砖红壤, 土壤中难以被植物吸收利用的闭蓄态 P 较多^[36], P 素的有效性偏低, 会导致 N、P 失衡, 影响林木正常的生长发育、生理功能以及在生态系统中的循环特征, 因此, 在桉树造林及营林过程中应注意适当的施放 P 肥来弥补土壤速效磷的不足。

相关性分析可以揭示不同组分碳氮磷化学计量比指标变量之间的协调关系, 有助于对养分之间的耦合过程做出合理的解释^[26]。本研究结果表明, 凋落物全 N 含量对表层土壤有机 C、全 N 含量、C:P 和 N:P 影响显著, 说明凋落物 N 元素成为表层土壤养分的限制性因素, 表层土壤 C、N 积累受到凋落物 N 的制约。凋落物 C:N 与表层土壤全 N 含量显著正相关, 而与深层土壤全 N 含量显著负相关, 可能是施肥造成土壤表层养分含量增加, 增大了表层土壤与深层土壤的养分状况差异, 改变了尾巨桉林分土壤的生态化学计量格局, 施肥对土壤养分格局的影响机制还有待进一步研究。因此, 在桉树人工林经营管理过程中如何降低凋落物分解的 N 限制性、提高养分由表层向深层的传递效率及合理施肥显得十分重要。

参考文献

- [1] CHEN Y P, ZHAO L H, WU Y H, et al. Interaction effect and mechanism between litter and soil quality [J]. World Sci-Tech Res Dev, 2005, 27(4): 88–94. doi: 10.3969/j.issn.1006-6055.2005.04.015.
陈印平, 赵丽华, 吴越华, 等. 森林凋落物与土壤质量的互作效应研究 [J]. 世界科技研究与发展, 2005, 27(4): 88–94. doi: 10.3969/j.issn.1006-6055.2005.04.015.
- [2] HE D, LI L, ZHOU G X, et al. Influence of C:N:P stoichiometry for decomposition rate in *Pinus massoniana* litterfall [J]. Hunan For Sci Techn, 2015, 42(3): 24–27. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2015.03.006.
何丹, 李栎, 周国新, 等. 马尾松凋落物 C:N:P 化学计量特征对分解速率的影响 [J]. 湖南林业科技, 2015, 42(3): 24–27. doi: 10.3969/j.issn.1003-5710.2015.03.006.
- [3] LI H L, GONG L, ZHU M L, et al. Stoichiometric characteristics of soil in an oasis on northern edge of Tarim Basin, China [J]. Acta Pedol Sin, 2015, 52(6): 1345–1355. doi: 10.11766/trxb201411220585.
李红林, 贡璐, 朱美玲, 等. 塔里木盆地北缘绿洲土壤化学计量特征 [J]. 土壤学报, 2015, 52(6): 1345–1355. doi: 10.11766/trxb201411220585.
- [4] ELSE J J, STERNER R W, GOROKHOVA E, et al. Biological stoichiometry from genes to ecosystems [J]. Ecol Lett, 2000, 3(6): 540–550. doi: 10.1111/j.1461-0248.2000.00185.x.
- [5] ELSE J J, BRACKEN M E S, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems [J]. Ecol Lett, 2007, 10(12): 1135–1142. doi: 10.1111/j.1461-0248.2007.01113.x.
- [6] XU Y H, FAN J L, DING W X, et al. Stage-specific response of litter decomposition to N and S amendments in a subtropical forest soil [J]. Biol Fertil Soils, 2016, 52(5): 711–724. doi: 10.1007/s00374-016-1115-7.
- [7] TROGISCH S, HE J S, HECTOR A, et al. Impact of species diversity, stand age and environmental factors on leaf litter decomposition in subtropical forests in China [J]. Plant Soil, 2016, 400(1/2): 337–350. doi: 10.1007/s11104-015-2737-5.
- [8] FANG X, ZHAO L, ZHOU G Y, et al. Increased litter input increases litter decomposition and soil respiration but has minor effects on soil organic carbon in subtropical forests [J]. Plant Soil, 2015, 392(1/2): 139–153. doi: 10.1007/s11104-015-2450-4.
- [9] FANIN N, FROMIN N, BUATOIS B, et al. An experimental test of the hypothesis of non-homeostatic consumer stoichiometry in a plant litter-microbe system [J]. Ecol Lett, 2013, 16(6): 764–772. doi: 10.1111/ele.12108.
- [10] MANZONI S, TROFYMOW J A, JACKSON R B, et al. Stoichiometric controls on carbon, nitrogen, and phosphorus dynamics in decomposing litter [J]. Ecol Monogr, 2010, 80(1): 89–106. doi: 10.1890/09-0179.1.
- [11] GUO L L, CHEN Y, ZHANG Z, et al. N:P stoichiometry in a forested runoff during storm events: Comparisons with regions and vegetation types [J]. Sci World J, 2012, 2012: 257392. doi: 10.1100/2012/257392.
- [12] van HUYSEN T L, PERAKIS S S, Harmon M E. Decomposition drives convergence of forest litter nutrient stoichiometry following phosphorus addition [J]. Plant Soil, 2016, 406(1/2): 1–14.
- [13] HUANG X B, LIU W D, SU J R, et al. Stoichiometry of leaf C, N and P across 152 woody species of a monsoon broad-leaved evergreen forest in Pu'er, Yunnan Province [J]. Chin J Ecol, 2016, 35(3): 567–575. doi: 10.13292/j.1000-4890.201603.029.
黄小波, 刘万德, 苏建荣, 等. 云南普洱季风常绿阔叶林 152 种木本植物叶片 C、N、P 化学计量特征 [J]. 生态学杂志, 2016, 35(3): 567–575. doi: 10.13292/j.1000-4890.201603.029.
- [14] WANG J Y, LAN J C, LONG T, et al. Ecological stoichiometry characteristics of nitrogen, phosphorus and potassium in liana leaf of evergreen broad-leaved forest [J]. Guangxi Agric Sci, 2013, 44(5): 815–818. doi: 10.3969/j.issn.2095-1191.2013.5.815.
王家妍, 蓝嘉川, 龙涛, 等. 常绿阔叶林藤本植物叶片 N、P、K 生态化学计量学特征 [J]. 南方农业学报, 2013, 44(5): 815–818. doi:

- 10.3969/j.issn.2095-1191.2013.5.815.
- [15] 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]. *Sci Silv Sin*, 2015, 51(7): 1-8. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150701.
- 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. doi: 10.11707/j.1001-7488.20150701.
- [16] BAI X F, XU F L, WANG W L, et al. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus in a *Larix principis-rupprechtii* plantation [J]. *Sci Soil Water Conserv*, 2015, 13(6): 68-75. doi: 10.3969/j.issn.1672-3007.2015.06.010.
- 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征 [J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 68-75. doi: 10.3969/j.issn.1672-3007.2015.06.010.
- [17] NIE L Q, WU Q, YAO B, et al. Leaf litter and soil carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry of dominant plant species in the Poyang Lake Wetland [J]. *Acta Ecol Sin*, 2015, 36(7): 1898-1906. doi: 10.5846/stxb201409301944.
- 聂兰琴, 吴琴, 尧波, 等. 鄱阳湖湿地优势植物叶片-凋落物-土壤碳氮磷化学计量特征 [J]. *生态学报*, 2015, 36(7): 1898-1906. doi: 10.5846/stxb201409301944.
- [18] 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]. *Chin J Ecol*, 2015, 34(8): 2096-2102.
- 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.
- [19] WEN L, WANG K L, ZENG F P, et al. Carbon storage and its distribution in *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations at different stand ages [J]. *Acta Bot Boreali-Occid Sin*, 2014, 34(8): 1676-1684. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1676.
- 文丽, 王克林, 曾馥平, 等. 不同林龄尾巨桉人工林碳储量及分配格局 [J]. *西北植物学报*, 2014, 34(8): 1676-1684. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1676.
- [20] ZHANG Z J, LI H, WANG Z C, et al. Soil ecological stoichiometry under young *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations [J]. *Eucalypt Sci Techn*, 2014, 31(4): 23-26. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1676.
- 张治军, 李慧, 王志超, 等. 4 个尾巨桉幼林林地土壤生态化学计量特征 [J]. *桉树科技*, 2014, 31(4): 23-26. doi: 10.7606/j.issn.1000-4025.2014.08.1676.
- [21] ZHANG L L, DU A P, LIU G C, et al. Soil ecological stoichiometry of *Eucalyptus urophylla* × *E. grandis* plantations under different soil preparation methods [J]. *Eucalypt Sci Techn*, 2015, 32(3): 28-33. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2015.03.005.
- 张利丽, 杜阿朋, 刘国粹, 等. 不同整地方式下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. doi: 10.3969/j.issn.1674-3172.2015.03.005.
- [22] XIAN G B, HUANG Y H, XIAN W G, et al. Ecological stoichiometry characteristics of leaf nitrogen, phosphorous and sulfur of tree species of plantation in south China [J]. *Guangdong For Sci Techn*, 2015, 31(5): 28-34. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2015.05.006.
- 洗杆标, 黄钰辉, 洗伟光, 等. 华南人工林乔木树种叶片氮、磷、硫生态化学计量特征 [J]. *广东林业科技*, 2015, 31(5): 28-34. doi: 10.3969/j.issn.1006-4427.2015.05.006.
- [23] ZHONG J H, LI S Y, LAN P L, et al. Characteristics and causes of soil fertility under *Eucalyptus* plantations in Leizhou Peninsula [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2005, 25(3): 44-48. doi: 10.3969/j.issn.1000-288X.2005.03.011.
- 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. doi: 10.3969/j.issn.1000-288X.2005.03.011.
- [24] CUI N J, LIU X B, ZHANG D J, et al. The distribution pattern of carbon, nitrogen, and phosphorus and the stoichiometry characteristics of *Pinus massoniana* plantation in different ages [J]. *Ecol Environ Sci*, 2014, 23(2): 188-195. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.02.002.
- 崔宁洁, 刘小兵, 张丹桔, 等. 不同林龄马尾松(*Pinus massoniana*)人工林碳氮磷分配格局及化学计量特征 [J]. *生态环境学报*, 2014, 23(2): 188-195. doi: 10.3969/j.issn.1674-5906.2014.02.002.
- [25] ZHAO W J, LIU X D, JIN M, et al. Ecological stoichiometric characteristics of carbon, nitrogen and phosphorus in leaf-litter-soil system of *Picea crassifolia* forest in the Qilian Mountains [J]. *Acta Pedol Sin*, 2016, 53(2): 477-489. doi: 10.11766/trxb201501080511.
- 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. doi: 10.11766/trxb201501080511.
- [26] WANG W X, SHI Z M, LUO D, et al. Carbon and nitrogen storage under different plantations in subtropical south China [J]. *Acta Ecol Sin*, 2013, 33(3): 925-933. doi: 10.5846/stxb201207040935.
- 王卫霞, 史作民, 罗达, 等. 我国南亚热带几种人工林生态系统碳氮储量 [J]. *生态学报*, 2013, 33(3): 925-933. doi: 10.5846/stxb201207040935.
- [27] LI F F. The distribution pattern of carbon, nitrogen and phosphorus and the stoichiometry characteristics of *Robinia pseudoacacia* forest [D]. Yangling: Northwest Agricultural & Forestry University, 2015: 14-21.
- 李芳菲. 刺槐人工林 C、N、P 分配格局及其化学计量特征研究 [D].

- 杨凌: 西北农林科技大学, 2015: 14–21.
- [28] YANG J J, ZHANG X R, MA L S, et al. Ecological stoichiometric relationships between components of *Robinia pseudoacacia* forest in Loess Plateau [J]. Acta Pedol Sin, 2014, 51(1): 133–142. doi: 10.11766/trxb201211280492.
- 杨佳佳, 张向茹, 马露莎, 等. 黄土高原刺槐林不同组分生态化学计量关系研究 [J]. 土壤学报, 2014, 51(1): 133–142. doi: 10.11766/trxb201211280492.
- [29] WANG W Q, XU L L, ZENG C S, et al. Carbon, nitrogen and phosphorus ecological stoichiometric ratios among live plant-litter-soil systems in estuarine wetland [J]. Acta Ecol Sin, 2011, 31(23): 7119–7124.
- 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.
- [30] TANG L Y. Nutrient resorption proficiency and efficiency of woody plants [D]. Beijing: Beijing University, 2012: 35–50.
- 汤璐瑛. 木本植物叶片养分重吸收研究 [D]. 北京: 北京大学, 2012: 35–50.
- [31] 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]. 生态学报, 2009, 28(10): 1928–1934.
- [32] REN S J, YU G R, TAO B, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 654 terrestrial plant species in NSTEC [J]. Environ Sci, 2007, 28(12): 2665–2673. doi: 10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001.
- 任书杰, 于贵瑞, 陶波, 等. 中国东部南北样带 654 种植物叶片氮和磷的化学计量学特征研究 [J]. 环境科学, 2007, 28(12): 2665–2673. doi: 10.3321/j.issn:0250-3301.2007.12.001.
- [33] 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]. Chin J Appl Environ Biol, 2009, 15(6): 756–760.
- 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.
- [34] SUN X Y. Soil [M]. Beijing: China Forestry Publishing House, 2005: 254–255.
- 孙向阳. 土壤学 [M]. 北京: 中国林业出版社, 2005: 254–255.
- [35] 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 Ecol Sin, 2013, 33(5): 1337–1346. doi: 10.5846/stxb201204300621.
- 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. doi: 10.5846/stxb201204300621.
- [36] ZENG D P, JIANG L L, ZENG C S, et al. Reviews on the ecological stoichiometry characteristics and its applications [J]. Acta Ecol Sin, 2013, 33(18): 5484–5492. doi: 10.5846/stxb201304070628.
- 曾冬萍, 蒋利玲, 曾从盛, 等. 生态化学计量学特征及其应用研究进展 [J]. 生态学报, 2013, 33(18): 5484–5492. doi: 10.5846/stxb201304070628.
- [37] LI X F, HAN S J, HU Y L, et al. Decomposition of litter organic matter and its relations to C, N and P release in secondary conifer and broad leaf mixed forest in Changbai Mountains [J]. Chin J Appl Ecol, 2008, 19(2): 245–251.
- 李雪峰, 韩士杰, 胡艳玲, 等. 长白山次生针阔混交林叶凋落物中有机物分解与碳、氮和磷释放的关系 [J]. 应用生态学报, 2008, 19(2): 245–251.
- [38] PAN F J, ZHANG W, WANG K L, et al. Litter C : N : P ecological stoichiometry character of plant communities in typical Karst Peak-Cluster Depression [J]. Acta Ecol Sin, 2011, 31(2): 335–343.
- 潘复静, 张伟, 王克林, 等. 典型喀斯特峰丛洼地植被群落凋落物 C : N : P 生态化学计量特征 [J]. 生态学报, 2011, 31(2): 335–343.
- [39] 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]. Environ Sci, 2011, 32(5): 1407–1414.
- 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.
- [40] GUO D Y. Research on ecological stoichiometry of degraded grassland [D]. Changchun: Jilin University, 2013: 15–21.
- 郭冬艳. 退化草地的生态化学计量学研究 [D]. 长春: 吉林大学, 2013: 15–21.