

雷州半岛不同林龄桉树人工林土壤化学计量特征*

许宇星^{1,2}, 王志超¹, 竹万宽¹, 杜阿朋^{1**}

(1. 国家林业和草原局 桉树研究开发中心, 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站, 广东 湛江 524022;

2. 中南林业科技大学 林学院, 湖南 长沙 430100)

摘要:【目的】理解尾巨桉人工林土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量及其化学计量学特征随林龄(1、2、3、5、7年生)的变化, 为研究尾巨桉人工林可持续发展提供理论基础。【方法】运用空间代时的研究方法, 选取立地条件相近的5个林龄的林分, 在各林分内设置3块样地, 采用5点法分层取样, 测定土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量, 并计算不同元素之间的计量比。【结果】尾巨桉人工林表层土壤(0~20 cm)的有机碳含量随着林龄增加而增加, 但不同林龄表层土壤的全氮含量差异不显著。5年生林地全磷与全钾含量均低于或显著低于($P<0.05$)其他各林龄; 不同林龄林下土壤有机碳和全氮含量均随土层深度增加而下降, 土壤全磷及全钾含量随土层深度变化未产生显著差异; 随林龄增加, 表层土壤碳氮比、碳磷比有增加趋势, 土壤磷钾比、碳钾比、氮钾比随着林龄的增加呈现先降低后升高的变化趋势, 不同林龄间土壤氮磷比未产生显著差异; 相关分析表明: 土壤有机碳与土壤全氮、全磷含量呈极显著正相关($P<0.01$), 土壤全氮、全磷及全钾含量间相关性均不显著($P>0.05$)。【结论】研究区尾巨桉中幼龄期林下土壤碳氮循环速率较低, 随林龄增加, 土壤有机质矿化速率有所下降。5个林龄土壤磷元素含量较充足, 氮元素成为主要限制因子。

关键词: 尾巨桉; 林龄; 化学计量特征; 雷州半岛

中图分类号: S 714.8

文献标识码: A

文章编号: 1004-390X (2019) 03-0486-08

Soil Ecological Stoichiometric Characteristics of *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* in Different Ages on the Leizhou Peninsula

XU Yuxing^{1,2}, WANG Zhichao¹, ZHU Wankuan¹, DU Apeng¹

(1. Guangdong Zhangjiang Eucalyptus Plantation Ecosystem Research Station, China Eucalypt Research Centre,

Zhanjiang 524022, China; 2. College of Forestry, Central South University of Forestry and

Technology, Changsha 430100, China)

Abstract: [Purpose] The study explored the changes of soil organic C, total N, total P, total K and the stoichiometric characteristics of the *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis* fast-growing forest with different ages (1, 2, 3, 5, 7 years) on the Leizhou Peninsula to provide theoretical basis for scientific management. [Method] Three sample plots were set in *E. urophylla*×*E. grandis* plantations with different ages. The five points sampling method was used for stratification and sampling. The concentration of carbon (C), nitrogen (N), phosphorus (P) and potassium (K) and the stoichiometric charac-

收稿日期: 2017-11-23

修回日期: 2018-10-29

网络出版时间: 2019-03-11

*基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(CAFYBB2017QA032,

CAFYBB2017QA033); “十三五”国家重点研发计划课题(2016YFD0600504,

2016YFD0600505); 广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站运行补助(2017-LYPT-

DW-137)。

作者简介: 许宇星(1987—), 男, 山西大同人, 在读博士研究生, 助理研究员, 主要从事桉树可持续经营研究。E-mail: wsyx1987@163.com

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

网络出版地址: [http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X\(n\).201711055](http://dx.doi.org/10.12101/j.issn.1004-390X(n).201711055)



teristics was analyzed in different plantations and soil depths. [Result] Soil C content (0~20 cm) increased significantly with the raising of stand age, while the total N content had minor differences. The total P and K content of 5-years old forest were lower or significantly lower ($P<0.05$) than other eucalyptus plantations. Soil organic C and total N in the five different plantations decreased with the increase of soil depth, the total P and total K content had smaller variability among the soil depth. The C/N and C/P had an increasing tendency with the increase of age while P/K, C/K and N/K decreased firstly, then increased in 5 and 7-years old; there was no significant difference in soil N/P among the different ages. Correlation analyses showed that: the soil organic C had significantly positive correlation with total N and total P ($P<0.01$). Correlations among soil total N, total P and total K were insignificant ($P>0.05$). [Conclusion] The circulation rate of the soil C, N of the *E. urophylla*×*E. grandis* in the middle and young age on the Leizhou Peninsula was comparatively slow. The mineralization rate of soil organic matter decreased with age increasing. Stands growth was limited by N.

Keywords: *Eucalyptus urophylla*×*E. grandis*; forest ages; stoichiometry; Leizhou Peninsula

生态化学计量特征学是依据生态学和化学计量学的基本原理来研究多重化学元素比例关系及生态化学过程,对于理解养分元素的动态平衡具有重要意义^[1-3]。目前,国内学者对不同人工林生态系统内化学计量学研究较多,主要集中在不同时间^[4]、物种^[5-6]、器官^[7-8]等的元素生态化学计量学特征研究。森林土壤是森林生态系统的重要组成部分和元素储库^[9],土壤元素含量作为反映土壤肥沃程度的重要指标,也是植物生长所需养分的重要来源,发挥着重要的生态功能^[10]。其主要化学元素碳氮磷之间的密切关系可以反映出土壤内部元素循环特征和平衡特征,研究林地土壤碳氮磷钾的生态化学计量特征,对于揭示林地土壤养分的有效性和限制性、实现森林生态系统服务功能的完善具有重要意义。

桉树 (*Eucalyptus* spp.) 作为华南地区重要速生人工林树种之一,种植面积已达 450 万 hm^2 ,相关研究主要集中在林地养分循环与平衡^[11-13]。立地、经营方式和林龄是速生丰产人工林系统重要的影响要素^[14]。张治军等^[15]研究发现:4个立地条件下尾巨桉 (*E. urophylla*×*E. grandis*) 幼龄林林地土壤生态化学计量特征存在显著差异;张利丽等^[16]对不同整地方式下尾巨桉林分土壤研究表明:表层土壤化学计量参数差异不大,但深层土壤化学计量参数存在一定差异。不同林龄尾巨桉林分生长特征差异显著^[17]。同时不同林龄尾巨桉林地的土壤物理性质也不同,对于不同林龄尾巨桉林地土壤元素的生态化学计量特征变化的研究

有助于揭示各林龄下桉树林地土壤养分的可获得性,但该方面研究鲜有报道。因此,本研究利用雷州半岛相似立地条件下5个林龄(1、2、3、5和7年生)尾巨桉人工林为研究对象,深入研究各林龄林分下土壤主要养分元素含量特征,揭示土壤各层次元素的化学计量特征及其随林龄的变化动态,以期为桉树人工林的可持续经营管理提供理论依据和数据参考。

1 材料和方法

1.1 试验林地概况

试验林地位于广东湛江桉树林生态系统国家定位观测研究站(N21°30', E111°38')内,最高海拔 220.8 m,最低海拔 80 m,为海洋性季风气候,年平均气温 23.1 °C,极端低温 1.4~3.6 °C,极端最高温度为 38.1 °C,年降雨量超过 1 500 mm,土壤类型(《中国土壤系统分类(修订方案)》)多为浅海沉积物砖红壤以及玄武岩砖红壤,其次为砂页岩红壤、花岗岩砖红壤,有机质含量超过 1%,pH 4.5~5.3。土壤肥力属于中等,符合桉树的生长条件。试验林地选定为立地条件基本相同且连片的5个不同林龄尾巨桉人工林,初植密度相同(2 m×3 m),造林措施均为炼山+机械挖穴,炼山后每穴添加专用基肥 [$m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O})=7 : 12 : 6$] 0.25 kg,林分种植后 2.5 年再穴旁追肥 0.25 kg。随林龄增加,林下生物多样性逐渐丰富,不同林龄桉树人工林下主要分布有乔木:三桠苦 (*Evodia lepta*)、木姜子 (*Litsea euosma* W.

W. Smith), 灌木: 龙船花 (*Ixora chinensis* Lam.)、五色梅 (*Lantana camara*)、扭肚藤 (*Jasminum elongatum*)、毛茛 (*Melastoma sanguineum* Sims.)、盐肤木 (*Rhus chinensis* Mill.)、细齿叶柃 (*Eurya nitida* Korthals), 草本: 山管兰 (*Dianella ensifolia* L.DC.)、芒草 (*Miscanthus*)、百花鬼针草 [*Bidens alba* (L.) DC.]、假臭草 (*Praxelis clematidea*)。各林分样地信息见表 1。

1.2 土壤样品采集、测定及计算

野外土壤样品采集于 2015 年 8 月进行。对连片且立地条件相近的 5 个林龄 (1、2、3、5 和 7 年生) 尾巨桉人工林地土壤分别取样, 在每个人工林中分别设置 3 个 20 m×20 m 的样地, 在每个样方内随机选择 5 个点取样, 使用土钻按 0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm 分层采集土壤, 同层充分混合后, 仔细除去其中可见植物残体及土壤动物, 风干过筛 (0.25 mm 网筛) 后备用, 同时预留 0~60 cm 混合土壤备用。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—容量法、全氮采用凯氏定氮法、全磷采用碱熔—钼锑抗比色法、全钾则采用碱熔—火焰光度法测定^[18]。

元素化学计量通过土壤中不同元素质量分数比值确定:

$$C/N=W_C/W_N, C/P=W_C/W_P, C/K=W_C/W_K,$$

$$N/P=W_N/W_P, N/K=W_N/W_K, P/K=W_P/W_K。$$

式中, W_C 、 W_N 、 W_P 、 W_K 分别表示土壤中碳、氮、磷、钾的质量分数。

1.3 数据处理

所有数据均以“平均值±标准偏差”的形式表示, 并分别以林分年龄及土壤不同深度作为因子, 进行单因素方差分析, 同时分析了土壤养分含量及不同元素比例的相关性, 所有数据分析均采用 SPSS 18.0 软件进行, LSD 法进行显著性检验, 显著水平为 $P<0.05$ 。并采用微软 Excel 软件绘制相关图形。

2 结果与分析

2.1 不同林龄尾巨桉林地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾含量

由表 2 可知: 不同林龄尾巨桉林地 0~60 cm 土壤有机碳含量未产生显著差异。随林龄增加, 表层土壤 (0~20 cm) 有机碳含量呈增加趋势, >20~40 cm、>40~60 cm 土层有机碳含量未产生显著差异。其中 1 年生与 2 年生表层土壤有机碳含量显著低于 3、5 和 7 年生, 1 年生与 2 年生间及 3、5 和 7 年生间表层土壤有机碳含量均未产生显著差异。随土层深度变化, 不同林龄尾巨桉土壤有机碳含量的变化有所不同, 1 年生尾巨桉林地各层土壤有机碳含量未产生显著差异, 2、3、5 和 7 年生尾巨桉林地土壤有机碳含量均随深度增加而降低, 其中 3、5 和 7 年生林地表层土壤有机碳含量显著高于其他各层。

不同林龄尾巨桉林地各层土壤全氮含量随林龄增加均未产生显著差异。随土层深度变化, 不同林龄土壤全氮含量的变化不同, 1 年与 2 年生尾巨桉林地各层土壤全氮含量无明显变化趋势, 且未产生显著差异, 3、5 和 7 年生土壤全氮含量随土层深度增加而降低, 且 3 年和 5 年生达到显著水平 ($P<0.05$)。

除 5 年生 0~60 cm 土壤全磷含量显著低于 1、3、7 年生林地土壤全磷含量, 不同林龄尾巨桉林地各层全磷含量均未产生显著差异。随着林龄增加, 尾巨桉林地土壤表层 (0~20 cm) 土层全钾含量呈下降趋势, 1、2、3 年生林地土壤表层全钾含量高于或显著高于 5 年生与 7 年生林地表土全钾含量。各林龄尾巨桉林地土壤全钾含量随土层深度变化未产生显著差异。

2.2 不同林龄林地有机碳、全氮、全磷和全钾生态化学计量特征

由表 3 看出: 5 个不同林龄尾巨桉林地 0~

表 1 不同林龄人工林样地基本特征

Tab. 1 Basic situation of forest plantations with different ages

林龄/year age	土壤类型 soil type	母质类型 parent material	密度/(plant·hm ⁻²) density	海拔/m altitude	坡度/(°) slope	坡向 aspect	胸径/cm DBH	株高/m plant height
1	砖红壤 laterite	浅海沉积物 neritic sediment	1 275	122	10	NE	4.7	5.07
2	砖红壤 laterite	浅海沉积物 neritic sediment	1 245	88	0	—	8.31	9.78
3	砖红壤 laterite	浅海沉积物 neritic sediment	1 200	88	0	—	10.95	12.51
5	砖红壤 laterite	浅海沉积物 neritic sediment	1 110	128	8	NE	17.33	15.45
7	砖红壤 laterite	浅海沉积物 neritic sediment	840	144	8	E	21.5	20.9

表 2 不同林龄尾巨桉土壤的平均养分含量 (mean±SE)

Tab. 2 The average nutrient content of soil in different ages of <i>E. urophylla</i> × <i>E. grandis</i>		g/kg			
元素 element	林龄/year age	土层 soil			
		0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~60 cm
有机碳 organic carbon (OC)	1	17.70±2.02 Ab	17.94±1.61 Aa	13.46±1.87 Aa	16.36±0.74 a
	2	19.77±1.97 Ab	14.10±1.87 ABa	11.09±2.70 Ba	14.99±2.07 a
	3	27.47±2.18 Aa	17.27±2.49 Ba	11.34±1.04 Ba	18.69±1.33 a
	5	27.67±3.73 Aa	17.32±1.05 Ba	13.98±2.05 Ba	19.66±0.21 a
	7	28.20±1.24 Aa	15.11±0.95 Ba	13.18±1.90 Ba	18.83±0.41 a
全氮 total nitrogen (TN)	1	1.19±0.08 Aa	1.06±0.12 Aa	1.11±0.28 Aa	1.12±0.06 a
	2	1.51±0.12 Aa	1.18±0.12 Aa	1.24±0.13 Aa	1.31±0.05 a
	3	1.76±0.17 Aa	1.12±0.13 Ba	0.70±0.07 Ba	1.19±0.05 a
	5	1.49±0.14 Aa	1.03±0.12 ABa	0.70±0.15 Ba	1.07±0.04 a
	7	1.54±0.41 Aa	0.98±0.12 Aa	0.78±0.08 Aa	1.1±0.13 a
全磷 total phosphorus (TP)	1	0.85±0.04 Aa	0.82±0.03 Aa	0.79±0.08 Aa	0.82±0.05 a
	2	0.74±0.03 Aa	0.72±0.01 Aa	0.70±0.03 Aa	0.72±0.02 ab
	3	0.93±0.12 Aa	0.81±0.09 Aa	0.70±0.02 Aa	0.81±0.08 a
	5	0.73±0.03 Aa	0.68±0.01 Aa	0.67±0.04 Aa	0.69±0.01 b
	7	0.88±0.07 Aa	0.76±0.07 Aa	0.80±0.09 Aa	0.81±0.08 a
全钾 total potassium (TK)	1	0.90±0.43 Aab	1.13±0.27 Aab	0.96±0.35 Ab	1.00±0.34 b
	2	1.48±0.08 Aa	1.64±0.14 Aa	1.77±0.20 Aa	1.63±0.12 a
	3	1.50±0.10 Aa	1.54±0.16 Aa	1.74±0.19 Aa	1.60±0.14 a
	5	0.71±0.14 Ab	0.57±0.17 Ab	0.69±0.16 Ab	0.65±0.08 c
	7	0.87±0.16 Aab	0.69±0.14 Ab	0.81±0.11 Ab	0.79±0.09 bc

注：不同大写字母表示相同林龄不同土层间显著性差异 ($P<0.05$)，不同小写字母表示各参数在相同土层不同林龄间显著性差异 ($P<0.05$)；下同。
Note: Different capital letters indicate the significant difference between different soil layers with the same forest ages, different small letters indicate the significant difference between forest ages in the same soil layers ($P<0.05$); the same as below.

20 cm 土壤碳氮比和碳磷比随林龄增加呈增加趋势，虽碳磷比在 7 年生林地中有所下降，但未产生显著差异。表层土壤碳钾比、氮钾比和磷钾比随林龄增加呈现先降低后升高的变化趋势，且碳钾比差异达到显著水平 ($P<0.05$)，不同林龄土壤氮磷比随林龄增加未产生显著差异。

根据表 3 显示：随着土层深度的增加，5 个不同林龄尾巨桉林地土壤碳氮比、磷钾比均未产生显著差异。碳磷比、碳钾比、氮钾比和氮磷比在 1 和 2 年生尾巨桉林地不同土层间均未产生显著差异，但 3、5 和 7 年生尾巨桉林地土壤随着土层深度的增加，该 4 种化学元素比例均呈现降低趋势，且 0~20 cm 土层均不同程度显著高于 >20~40 cm 及 >40~60 cm 土层比例。

2.3 各林地土壤有机碳、全氮、全磷和全钾生态化学计量参数的相关性

表 4 表明：土壤有机碳与土壤全氮、全磷含量极显著正相关 ($P<0.01$)，与土壤全钾含量相关

性较小；土壤全氮、全磷及全钾含量间相关性均不显著 ($P>0.05$)。土壤有机碳与氮磷比以及土壤全氮与碳磷比均呈现极显著正相关，可能原因是土壤中全磷质量分数变化较稳定，碳磷比和氮磷比主要受全氮和有机碳含量的影响，而土壤有机碳与全氮质量分数变化在不同林龄不同土层间相对一致；土壤有机碳含量与氮钾比呈极显著正相关，全钾含量与碳氮比极显著负相关，碳氮比与磷钾比及碳磷比与氮钾比均呈极显著正相关。

3 讨论

5 个林龄尾巨桉 0~60 cm 土层有机碳含量均值变化区间为 14.99~19.66 g/kg，且不同林龄间均未产生显著差异。表层土壤 (0~20 cm) 有机碳含量在 17.7~28.2 g/kg 之间。与全国土壤有机碳含量均值相比 (24.56 g/kg)^[19]，本研究中 1 年和 2 年生尾巨桉林下表层土壤有机碳含量 (17.7~19.77 g/kg) 略低于全国均值，但随着林龄增加，3、5 及 7 年

表 3 不同林龄尾巨桉土壤的碳氮磷化学计量比 (mean±SE)

Tab. 3 Stoichiometry ration of C, N, P contents in soil in different ages of *E. urophylla*×*E. grandis*

指标 index	林龄/year age	土层 soil depth			
		0~20 cm	>20~40 cm	>40~60 cm	0~60 cm
C/N	1	14.89±1.23 Aa	17.16±1.34 Aa	13.3±2.66 Aab	15.12±1.09 ab
	2	13.03±0.53 Aa	11.88±0.65 Ab	9.1±2.18 Ab	11.34±0.89 b
	3	15.83±1.74 Aa	15.7±2.44 Aab	16.61±2.88 Aab	16.04±1.21 a
	5	18.48±1.37 Aa	17.11±1.53 Aa	20.42±2.15 Aa	18.67±0.98 a
	7	22.03±7.00 Aa	15.37±0.99 Aab	17.04±2.23 Aab	18.15±2.36 a
C/P	1	21±3.20 Ab	22.23±3.00 Aa	17.1±1.91 Aa	20.11±1.58 b
	2	26.95±3.41 Aab	19.52±2.66 Aa	16.14±4.63 Aa	20.87±2.43 ab
	3	30.03±3.37 Aab	21.27±1.32 Ba	16.21±0.91 Ba	22.59±2.33 ab
	5	38.06±4.32 Aa	25.44±1.24 Ba	20.62±2.49 Ba	28.04±2.99 a
	7	32.29±3.05 Aab	20.33±2.47 Ba	16.6±1.53 Ba	23.07±2.66 ab
C/K	1	28.93±9.83 Aab	18.46±5.73 Aab	17.47±4.68 Aa	21.62±4 bc
	2	13.54±1.86 Ab	8.92±2.05 Ab	6.84±2.58 Ab	9.77±1.47 d
	3	18.22±0.34 Ab	11.61±2.21 Bb	6.73±1.10 Bb	12.19±1.81 cd
	5	41.94±10.30 Aa	37.77±12.39 ABa	20.89±1.01 Ba	33.53±5.66 a
	7	34.83±6.32 Aab	21.98±1.49 ABab	17.3±4.43 Ba	24.7±3.47 ab
N/P	1	1.4±0.11 Aa	1.31±0.19 Aa	1.36±0.22 Aab	1.36±0.09 a
	2	2.06±0.23 Aa	1.64±0.18 Aa	1.77±0.18 Aa	1.82±0.12 a
	3	1.99±0.36 Aa	1.4±0.14 ABa	1.02±0.12 Bb	1.47±0.18 a
	5	2.05±0.12 Aa	1.51±0.16 Ba	1.03±0.15 Bb	1.53±0.16 a
	7	1.81±0.54 Aa	1.31±0.10 Aa	1.02±0.20 Ab	1.38±0.20 a
N/K	1	1.87±0.59 Aa	1.1±0.34 Aab	1.27±0.16 Aa	1.41±0.23 ab
	2	1.04±0.13 Aa	0.74±0.14 Ab	0.73±0.13 Abc	0.84±0.08 b
	3	1.18±0.12 Aa	0.73±0.06 Bb	0.41±0.07 Cc	0.77±0.12 b
	5	2.3±0.61 Aa	2.29±0.89 Aa	1.04±0.09 Bab	1.88±0.37 a
	7	1.7±0.19 Aa	1.44±0.11 ABab	1.01±0.20 Bab	1.39±0.13 ab
P/K	1	1.37±0.48 Aa	0.8±0.15 Aab	1.01±0.26 Aa	1.06±0.18 a
	2	0.5±0.01 Aa	0.45±0.04 Ab	0.4±0.04 Ab	0.45±0.02 b
	3	0.62±0.06 Aa	0.54±0.08 Ab	0.41±0.05 Ab	0.52±0.04 b
	5	1.11±0.25 Aa	1.45±0.42 Aa	1.05±0.16 Aa	1.2±0.16 a
	7	1.14±0.34 Aa	1.12±0.18 Aab	1.03±0.22 Aa	1.1±0.13 a

生林下表层土壤有机碳含量 (27.47~28.2 g/kg) 均超过全国均值, 说明随着林龄增加, 尾巨桉林下土壤有机碳含量已产生累积作用, 这与人前人所得结论一致^[20], 主要原因在于随着尾巨桉林分生长, 林下植被多样性增加, 凋落物和分泌物是土壤有机碳的主要来源^[21], 因此在尾巨桉生长旺盛的中幼龄林时期有机碳含量也随之增加; 不同林龄间尾巨桉 0~60 cm 土层全氮含量均值为 (1.07~1.31 g/kg), 表层土壤全氮含量为 1.19~1.76 g/kg, 低于全国土壤全氮含量均值 (1.88 g/kg)^[19]。随林龄增加, 不同土层全氮含量表现出先增加后减小的变化趋势, 但未产生显著差异, 该结论同樊后

保等^[22]在闽南山区研究的连续年龄序列桉树林下土壤全氮含量变化趋势相似, 说明处于旺盛生长期的中幼龄林时期尾巨桉林分对氮元素养分含量需求较高, 仍未出现对土壤氮元素的累积效应; 5 个林龄尾巨桉 0~60 cm 土层全磷含量为 0.69~0.82 g/kg, 表层土壤全磷含量为 0.74~0.93 g/kg, 高于闽南山区中幼龄林尾巨桉林地地表土全磷含量 (0.39~0.45 g/kg)^[22]。随林龄增加, 不同土层 (0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm) 全磷含量均未产生显著差异, 但 0~60 cm 土层平均全磷含量表现出先降低后升高的变化趋势, 且在 5 年生时低于或显著低于其他各林龄, 土壤全钾含量同全磷含

表4 土壤元素含量与及其化学计量比的相关性

Tab. 4 The Correlations of C, N and P and their stoichiometry features

项目 item	OC	TN	TP	TK	C/N	C/P	C/K	N/P	N/K	P/K
OC	1	0.69**	0.42**	-0.2	—	—	—	0.56**	0.46**	0.17
TN		1	0.27	0.21	—	0.64**	0.15	—	—	-0.19
TP			1	0.12	0.24	—	0.09	—	-0.01	—
TK				1	-0.49**	-0.29	—	0.16	—	—
C/N					1	0.29	0.48**	-0.46**	0.12	0.44**
C/P						1	0.58**	0.67**	0.52**	0.14
C/K							1	0.14	0.92**	0.86**
N/P								1	0.34*	-0.23
N/K									1	0.79**
P/K										1

注/Note: *, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$ 。

量相似, 随林龄增加全钾含量先增大后减小而后又有所回升, 5年生低于或显著低于其他各林龄土壤全钾含量, 可能原因在于中幼林龄尾巨桉林分生长迅速, 对土壤磷、钾元素需求量较大, 但随着林分生长速度减缓, 加之林下植被逐渐恢复, 林下调落物养分归还, 使土壤全磷、全钾含量有所回升。

随土层深度增加, 不同林龄土壤各养分元素含量表现出不同变化趋势。土壤有机碳和全氮含量均随土层深度增加而下降。其中, 1年生尾巨桉林下各层次土壤有机碳及全氮含量未产生显著差异, 2年生表层土壤有机碳含量显著高于底层土壤(>40~60 cm), 各层全氮含量未产生显著差异, 3、5、7年生表层土壤有机碳及全氮含量显著高于其他两层; 各林龄土壤全磷及全钾含量随土层深度变化均未产生显著差异, 土壤全磷含量随土层深度增加呈现下降趋势, 这与庞圣江等^[23]研究桂西北不同森林类型土壤养分状况所得结果相似, 可能原因在于土壤有机碳及氮元素主要来源于土壤表层凋落物、根系及大气氮沉降, 加之表层土壤养分充足, 通气条件良好, 微生物活动较频繁, 凋落物及根系分解所形成的大量有机物及养分元素首先进入土壤表层, 致使土壤表层有机质及氮素积累较多^[9, 24], 随着土层深度的增加, 根系及其分泌物减少且微生物活动减弱, 因此土壤有机碳和氮素空间纵向变异性较大。但土壤磷元素和钾元素主要来源于凋落物分解及岩石和矿物质的风化, 且母质的风化作用位于土壤剖面的底部^[25], 岩石及矿物的风化是一个稳定且漫长的过

程, 是土壤有效磷的主要来源。因此它们在土壤中的空间变异性较小, 对土层深度变化不显著^[26-27]。

土壤碳氮比是土壤质量的敏感指标, 可以影响林地土壤的碳氮循环^[28], 同时也反映了土壤不同元素的营养平衡状态^[29]。本研究区土壤碳氮比均值为15.86, 与大别山东南缘马尾松林土壤碳氮比(15.7)^[27]相似, 高于中国土壤碳氮比(10.1~12.1)^[30]和全球土壤碳氮比均值(13.33)^[31]。一般而言, 土壤碳氮比同土壤有机质分解速率成反比^[32]。本研究中, 不同林龄尾巨桉林0~20 cm土层碳氮比随林龄增加有增加趋势, 说明研究区尾巨桉中幼龄期林下土壤碳氮循环速率较高, 随林龄增加, 有机质矿化速率有所下降, 对土壤养分需求逐渐降低。不同林龄林下土壤碳磷比均值为22.94, 低于中国土壤碳磷比均值(61)^[33]和大别山东南缘马尾松林土壤碳磷比均值(54.72)^[27]。有研究表明^[34]: 当碳磷比<200, 土壤微生物碳素会出现短暂增加和有机磷的净矿化, 并且植物根系也会刺激分泌磷酸酶增加土壤中磷酸盐的溶解度^[35], 从而使土壤中有效磷含量有所提升, 据此说明本研究区5个林龄土壤磷元素含量较充足。TESSIER等^[36]认为土壤氮磷比可以作为养分限制类型的有效预测指标, 本文中土壤氮磷比均值为1.51, 低于中国土壤碳氮比均值(5.2)^[33], 说明研究区内中幼林龄尾巨桉林下土壤氮含量相对缺乏, 但是植物通过土壤汲取营养成分只是众多途径中的一种, 植物还可以在空气中吸取或者通过老叶的再分配获得养分, 因此判断植物的养分限制类型还

需结合研究区植物叶片及凋落物的养分状况。笔者通过结合雷州半岛不同林龄桉树叶片、凋落物及土壤的养分元素测定并分析同样发现,该研究区人工林生长受氮元素限制(另文发表)。不同林龄土壤磷钾比、碳钾比、氮钾比随着林龄的增加先减小后有所回升,而碳磷比和氮磷比随林龄增加先增加后减小,可能原因在于随着桉树生长,林下土壤各养分元素含量不同程度下降,但桉树对钾元素需求量弱于碳氮磷元素,且对磷元素需求量强于碳氮元素,随着桉树林龄增加,对各养分元素的吸收随之减缓,同时凋落物的养分归还也对土壤有所补充。不同林龄土壤碳钾比和氮钾比及碳磷比和氮磷比随土层深度增加而下降,而磷钾比未出现明显变化趋势,主要原因在于不同林龄碳、氮元素含量随土层变化差异显著,而磷、钾元素含量随土层变化未产生显著差异。

4 结论

通过对雷州半岛 5 个不同林龄尾巨桉人工林(1、2、3、5 和 7 年生)土壤养分含量对比分析可知:该研究区不同林龄尾巨桉人工林表层土壤(0~20 cm)有机碳含量显著增加,全氮含量未产生显著差异,尾巨桉林下土壤有机碳含量已产生累积作用,中幼林龄期桉树生长对氮的需求较大,仍未出现对土壤氮元素的累积效应。随林龄增加,不同土层(0~20 cm、>20~40 cm、>40~60 cm)全磷和全钾含量均在 5 年生时达到最低值,后有所回升。不同林龄土壤有机碳和全氮含量均随土层深度增加而下降,各林龄土壤全磷及全钾含量随土层深度变化均未产生显著差异。5 个不同林龄尾巨桉林下土壤碳氮循环速率较低,随林龄增加,土壤有机质矿化速率有所下降。5 个林龄土壤磷元素含量较充足,氮元素成为主要限制因子。

[参考文献]

- [1] ELSER J J, BRACKEN M E, CLELAND E E, et al. Global analysis of nitrogen and phosphorus limitation of primary producers in freshwater, marine and terrestrial ecosystems[J]. *Ecology Letters*, 2007, 10(12): 1135. DOI: 10.1111/ele.2007.10.issue-12.
- [2] 贺金生, 韩兴国. 生态化学计量学: 探索从个体到生态系统的统一化理论[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 2. DOI: 10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.002.
- [3] 冼伟光, 周丽, 唐洪辉, 等. 不同林龄针阔混交林土壤生态化学计量特征[J]. *广东林业科技*, 2015, 31(1): 1. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4427.2015.01.001.
- [4] 赵亚芳, 徐福利, 王渭玲, 等. 华北落叶松针叶碳、氮、磷含量及化学计量比的季节变化[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(5): 1328. DOI: 10.11674/zwyf.2015.0528.
- [5] HAN W X, FANG J Y, GUO D L, et al. Leaf nitrogen and phosphorus stoichiometry across 753 terrestrial plant species in China[J]. *The New Phytologist*, 2005, 168(2): 377. DOI: 10.1111/j.1469-8137.2005.01530.x.
- [6] 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.
- [7] 王娜, 程瑞梅, 肖文发, 等. 三峡库区马尾松根和叶片的生态化学计量特征[J]. *林业科学研究*, 2016, 29(4): 536. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1498.2016.04.011.
- [8] 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.
- [9] 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. DOI: 10.11707/j.1001-7488.20150701.
- [10] 韩瑞芸, 陈哲, 杨世琦. 秸秆还田对土壤氮磷及水土的影响研究[J]. *中国农学通报*, 2016, 32(9): 148.
- [11] 廖观荣, 简明, 钟继洪, 等. 桉树人工林生态系统养分循环与平衡研究 V. 桉树林间种山毛豆对土壤肥力与林木生长的作用[J]. *生态环境*, 2003, 12(4): 443. DOI: 10.3969/j.issn.1674-5906.2003.04.017.
- [12] 刘国粹, 杜阿朋, 陈少雄. 桉树人工林养分循环研究成果分析[J]. *桉树科技*, 2013, 30(3): 60. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3172.2013.03.010.
- [13] 余雪标, 白先权, 徐大平, 等. 不同连栽代次桉树人工林的养分循环[J]. *热带作物学报*, 1999, 20(3): 60.
- [14] 陈少雄. 桉树中大径材培育理论及关键技术研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2010.
- [15] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3172.2014.04.005.
- [16] 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. DOI: 10.3969/j.issn.1674-3172.2015.03.005.
- [17] 韩斐扬, 周群英, 陈少雄, 等. 2 种桉树不同林龄生物量与能量的研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(5): 690.
- [18] 孙楠. 稻田改制对土壤理化性质的影响及其调控[D]. 北京: 中国农业科学院, 2007.
- [19] 邵梅香. 亚热带红椎与西南桦生态化学计量学特征研究[D]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [20] ZHOU G Y, LIU S G, LI Z, et al. Old-growth forests can accumulate carbon in soils[J]. *Science*, 2006, 314(584): 1417. DOI: 10.1126/science.1130168.
- [21] 王春阳, 周建斌, 夏志敏, 等. 黄土高原区不同植物凋落物可溶性有机碳含量及其降解[J]. *应用生态学报*, 2010, 21(12): 3001. DOI: 10.13227/j.hjkk.2011.04.006.
- [22] 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.
- [23] 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.

- [24] JOBBAGY E G, ROBERT B J. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423. DOI: [10.2307/2641104](https://doi.org/10.2307/2641104).
- [25] WALKER T W, ADAMS A F R. Studies on soil organic matter: I[J]. *Soil Science*, 1959, 87(1): 10. DOI: [10.1097/00010694-195901000-0001](https://doi.org/10.1097/00010694-195901000-0001).
- [26] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 等. 南亚热带森林不同演替阶段植物与土壤中 N、P 的化学计量特征[J]. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64. DOI: [10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.010](https://doi.org/10.3773/j.issn.1005-264x.2010.01.010).
- [27] 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.
- [28] 高丽丽. 西藏土壤有机质和氮磷钾状况及其影响因素分析[D]. 雅安: 四川农业大学, 2004.
- [29] 王维奇, 曾从盛, 钟春棋, 等. 人类干扰对闽江河口湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量学特征的影响[J]. *环境科学*, 2010, 31(10): 2411.
- [30] 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. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2008.08.054).
- [31] CLEVELAND C C, DANIEL L. C: N: P stoichiometry in soil: is there a “redfield ratio” for the microbial biomass?[J]. *Biogeochemistry*, 2007, 85(3): 235. DOI: [10.1007/s10533-007-9132-0](https://doi.org/10.1007/s10533-007-9132-0).
- [32] MAJDI H, OHRVIK J. Interactive effects of soil warming and fertilization on root production, mortality, and longevity in a Norway spruce stand in Northern Sweden[J]. *Global Change Biology*, 2004, 10(2): 182. DOI: [10.1111/j.1529-8817.2003.00733.x](https://doi.org/10.1111/j.1529-8817.2003.00733.x).
- [33] TIAN H Q, CHEN G S, ZHANG C, et al. S Hall. Pattern and variation of C: N: P ratios in China's soils: a synthesis of observational data[J]. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1): 139. DOI: [10.1007/s10533-009-9382-0](https://doi.org/10.1007/s10533-009-9382-0).
- [34] 贾宇, 徐炳成, 李凤民, 等. 半干旱黄土丘陵区苜蓿人工草地土壤磷素有效性及对生产力的响应[J]. *生态学报*, 2007, 27(1): 42. DOI: [10.3321/j.issn:1000-0933.2007.01.005](https://doi.org/10.3321/j.issn:1000-0933.2007.01.005).
- [35] MAKOI J, NDAKIDEMI P A. Selected soil enzymes: examples of their potential roles in the ecosystem[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2008, 7(3): 181. DOI: [10.5897/AJB07.590](https://doi.org/10.5897/AJB07.590).
- [36] TESSIER J T, RAYNAL D J. Use of nitrogen to phosphorus ratios in plant tissue as an indicator of nutrient limitation and nitrogen saturation[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2003, 40(3): 523. DOI: [10.1046/j.1365-2664.2003.00820.x](https://doi.org/10.1046/j.1365-2664.2003.00820.x).

责任编辑: 何承刚