

DOI: 10.5846/stxb201911182494

张继辉,蔡道雄,卢立华,李运兴,李华,闵惠琳,杨保国,农友,黄彪.不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征.生态学报,2020,40(16): 5718-5728.

Zhang J H, Cai D X, Lu L H, Li Y X, Li H, Min H L, Yang B G, Nong Y, Huang B. Soil ecological stoichiometry of different aged Teak (*Tectona grandis*) plantations. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(16): 5718-5728.

不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征

张继辉^{1,2}, 蔡道雄^{1,2}, 卢立华^{1,2,*}, 李运兴^{1,2}, 李 华^{1,2}, 闵惠琳^{1,2}, 杨保国^{1,2},
农 友³, 黄 彪⁴

1 中国林业科学研究院热带林业实验中心, 凭祥 532600

2 广西友谊关森林生态系统国家定位观测研究站, 凭祥 532600

3 广西壮族自治区中医药研究院, 南宁 530022

4 国际竹藤中心园林花卉与景观研究所, 北京 100102

摘要:为了阐明林龄对柚木人工林土壤生态化学计量特征及土壤理化性质的影响,在广西凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场选取 3 块不同林龄(10、32、37 a)的柚木人工林为研究对象,在每个林龄地块内选择具有代表性的地段分别设置 3 块 20 m×20 m 样地,按照多点混合、随机布点和相同数量的原则,按 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm 土层取样,测定土壤的水分-物理性质、pH、有机碳(Soil organic carbon, SOC)、全氮(Total nitrogen, TN)、全磷(Total phosphorus, TP)、全钾(Total potassium, TK)含量,并计算土壤碳、氮、磷之间的计量比,探讨它们随林龄的变化及其与 C:N:P 化学计量比之间的关系,以期对柚木人工林持续经营管理提供科学依据。结果表明:除土壤容重(SBD)、有效磷(AP)、速效钾(FK)、C:P 和 N:P 外,林龄对其他土壤理化性质和 C:N 均有显著影响;C:N、C:P 随林龄的增加而增大,柚木纯林化经营减少了 C、N、P 储量,其生长受到 P 限制,适当混交化改造显得十分重要;研究区域 3 个林龄柚木人工林土壤 C:N(7.32)、C:P(26.92)和 N:P(3.56)平均值均明显低于全国土壤 C:N(11.90)、C:P(60.00)和 N:P(5.10)平均水平,表明该地区土壤可利用 C、N、P 素仍非常有限。对土壤 SOC、TN、TP 含量、C:N、C:P 和 N:P 之间进行皮尔逊相关分析得出,C:N 与 SOC 的相关性大于与 TN 的相关性,C:P 与 SOC 的相关性大于与 TP 的相关性,说明柚木人工林土壤 C:N 和 C:P 主要受有机碳含量的影响,因此在柚木人工林经营管理过程中如何科学调控土壤中有机碳含量显得尤为重要。本研究区 C:N 和 C:P 较低,表明有机质分解较快,这对于雨量充沛的南亚热带柚木人工林来讲可能不利于其土壤肥力的维持。

关键词:柚木人工林;土壤;生态化学计量特征;林分年龄

Soil ecological stoichiometry of different aged Teak (*Tectona grandis*) plantations

ZHANG Jihui^{1,2}, CAI Daoxiong^{1,2}, LU Lihua^{1,2,*}, LI Yunxing^{1,2}, LI Hua^{1,2}, MIN Huilin^{1,2}, YANG Baoguo^{1,2},
NONG You³, HUANG Biao⁴

1 Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry, Pingxiang 532600, China

2 Guangxi Youyiguan Forest Ecosystem Research Station, Pingxiang 532600, China

3 Guangxi Zhuang Autonomous Region Research Institute of Traditional Chinese Medicine, Nanning 530022, China

4 International Institute of Garden Flowers and Landscapes of Bamboo and Rattan Centre, Beijing 100102, China

Abstract: To investigate the effect of stand age on soil ecological stoichiometry and soil physicochemical properties in teak (*Tectona grandis*) plantations, an age sequence of *Tectona grandis* stands (10 years old, 32 years old, and 37 years old) were selected in the Qingshan Experimental Field of Tropical Forestry Experiment Centre of Chinese Academy of Forestry,

基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2016YFD0600602-1)

收稿日期:2019-11-18; 网络出版日期:2020-06-08

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: 296515742@qq.com

Sino-Vietnamese border area, Pingxiang, Guangxi. Three representative 20 m × 20 m plots were set in each representative part of each forest stand. Based on the principle of multi-point mixing, random distribution and the same quantity, soil samples were collected from 0—10, 10—20, 20—30, 30—50, and 50—100 cm depths, soil moisture-physical properties, pH, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK) content were analyzed, C:N, C:P, N:P and C:N:P ratios were estimated. We explored their changes with forest age and the relationship between the above factors and the C:N:P stoichiometric ratio, in order to provide a scientific basis for sustainable management of teak plantation. The results showed that in addition to soil bulk density (SBD), available phosphorus (AP), available potassium (FK), C:P and N:P ratio, the forest age had significant effects on other soil physical and chemical properties and C:N ratio. The C:N and C:P increased with the increasing of forest age, the pure forest management of teak reduced C, N, and P reserves, and its growth was limited by P, appropriate mixing transformation was very important. The average values of the C:N ratio (7.32), C:P ratio (26.92) and N:P ratio (3.56) of the three forestry teak plantations in Daqingshan area of Guangxi were significantly lower than the average levels of the soil C:N ratio (11.90), C:P ratio (105), and N:P ratio (5.20) in the national, which indicated that the soil C, N and P were still very limited in the area. Pearson correlation analysis between soil SOC, TN, TP content, C:N ratio, C:P ratio, and N:P ratio showed that the correlation between C:N ratio and SOC was greater than the correlation between C:N ratio and TN, the correlation between C:P ratio and SOC was greater than the correlation between C:P ratio and TP, indicating that the soils C:N ratio and C:P ratio of teak plantation were mainly affected by the organic carbon content. It is very important to scientifically control the organic carbon content in the soil during the management of teak plantation. The lower C:N ratio and C:P ratio in this study area indicate that the organic matter decomposes quickly, which may be detrimental to the maintenance of teak plantation soil fertility due to abundant rainfall in the south subtropical.

Key Words: teak (*Tectona grandis*) plantation; soil; stoichiometry; stand age

生态化学计量学主要研究生态系统化学过程中各化学元素的动态收支平衡及系统各组分元素比例关系^[1]。碳(C)、氮(N)、磷(P)是土壤最基本的化学组成元素,其相对组成及计量比直接影响了土壤C、N、P循环对全球生态系统化学变化的响应^[2]。森林土壤是陆地生态系统的重要组成部分,同时也是营养元素的储存库,研究森林土壤的生态化学计量特征,对认识森林生态系统的元素响应机制、循环过程以及对各种因素干扰的反馈,及实现森林服务功能的可持续经营管理均具有重大意义^[3]。

人工林生态系统中,林龄通过改变森林物质组成、林分结构和林内微气候进而影响土壤养分分配格局^[4],雷丽群等^[5]研究广西凭祥地区马尾松人工林林龄对土壤C:N、N:P极显著影响,土层对土壤C:P、N:P显著影响。任璐璐等^[6]研究陕北黄土高原刺槐人工林土壤C:N、C:P、N:P和C:N:P随着林龄的增加呈现先减小后增加的趋势,刺槐固磷能力较显著,油松人工林土壤C:N、C:P、N:P随林龄的增加呈增加趋势,黄土高原地区油松受氮限制较严重^[7],秦岭幼、中龄林华北落叶松人工林也主要受氮限制,且随林龄的增加,其土壤C:N、N:P显著增加,C:N随林龄的变化差异不显著^[8],随梭梭林种植年限的增加,土壤C:N未发生显著变化,但C:P和N:P明显增加,荒漠绿洲区梭梭人工林可能受磷限制^[9],胡启武等^[10]通过研究鄱阳湖地区林龄对沙山湿地松土壤C、N、P化学计量比特征的影响,发现林龄对土壤C:N、C:P和N:P的影响不显著。由于受植被生物学特性、森林经营方式和区域气候的影响,不同地区人工林生态系统碳氮磷元素循环特征表现出显著的差异性^[2,11],在人工林经营过程中,森林生态系统化学计量特征研究为其养分循环及限制提供重要的指示作用,在特定植被条件下开展土壤生态化学计量特征研究尤为重要^[12]。

柚木(*Tectona grandis*)属唇形科柚木属阔叶大乔木,材质优良,是国际上最重要的阔叶用材之一。前人在柚木的引种、育苗、造林、遗传改良^[13]、其生长与土壤特性^[14-23]、立地分类及质量评价^[24-25]等方面开展了相关研究,但针对不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征与其土壤理化性质关系的研究尚无报道。因此,本研究以3个林龄(10、32、37 a)的柚木人工林为研究对象,分析柚木人工林土壤C:N:P生态计量特征及理化性质随林龄变化及其之间相关关系,研究土壤C:N:P化学计量特征对柚木的指示作用。本研究的开展可探明不同发育阶段柚木人工林的土壤养分限制状况,可为人工林持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

本研究所选的柚木人工试验林位于广西壮族自治区崇左市凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场林区(21°57′47″—22°19′27″N, 106°39′50″—106°59′30″E), 属南亚热带季风气候区, 年均温约 22℃, ≥10℃ 积温 6000—7600℃, 年均降水量 1550 mm, 年均蒸发量 1325 mm, 干湿两季分明, 降雨主要集中在 4—9 月, 约占年降水总量的 75%。主要树种有马尾松 (*Pinus massoniana*)、柚木 (*Tectona grandis*)、杉木 (*Cunninghamia lanceolata*)、红椎 (*Castanopsis hystrix*)、米老排 (*Mytilaria Laosensis*)、尾叶桉 (*Eucalyptus urophylla*)、格木 (*Erythrophleum fordii*)、桃金娘 (*Rhodomyrtus tomentosa*)、酸藤子 (*Embelia laeta*)、玉叶金花 (*Mussaenda Pubescens*)、大沙叶 (*Pavetta arenosa*)、铁芒箕 (*Dicranopteris dichotoma*)、五节芒 (*Miscanthus floridulus*)、蔓生莠竹 (*Microstegium vagans*) 等。土壤类型主要包括红壤和赤红壤^[5]。

本研究选取立地条件较为一致的柚木人工林 (10、32、37 a) 为研究对象, 3 个林龄初植密度均为 1200 株/hm² 左右, 造林前 3 年均进行不施肥除草抚育, 造林 3a 后不再抚育, 10 a 左右进行第一次间伐, 20 a 左右进行第二次间伐, 25 a 左右进行第三次间伐。样地基本特征见表 1。

表 1 样地基本特征
Table 1 Basic characteristics of the plot

林龄 Stand age/a	坡向 Slope direction	坡度 Gradient/(°)	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	立木密度 Stand density/ (株/hm ²)	海拔 Altitude/m	土层厚度 Soil thickness/cm	土壤种类 Soil type
10	东	15	9.7	6.8	800	180	100	赤红壤
32	北	15	24.8	17.1	700	160	100	赤红壤
37	北	10	18.4	14.3	700	110	100	赤红壤

DBH: 胸径 Diameter at Breast Height

1.2 样品处理与测定

2018 年 3—5 月在研究区域采用典型样地调查法, 在 3 个林龄地块内各选取 3 块具有代表性的林分, 共 9 块林分, 每个林分内分别设置一块 400 m² 的样地, 挖取深 1 m 左右的垂直土壤坡面, 按照 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm 土层进行混合取样 500 g, 每层 3 个重复, 每次共取 15 个土样, 及时带回实验室。测定 pH、土壤容重 (Soil bulk density, SBD)、质量含水量 (Mass water content, MW)、最大持水量 (Maximum water holding capacity, MAC)、最小持水量 (Minimum water holding capacity, MIC)、毛管持水量 (Capillary water holding capacity, CC)、总孔隙度 (Total porosity, TPO)、毛管孔隙度 (Capillary porosity, CPO) 及非毛管孔隙度 (Non-capillary porosity, NCPO) 等土壤理化性质, 样品经自然风干后, 磨细后过 0.15mm 孔径筛网, 取样测定土壤有机碳 (SOC)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、水解氮 (Available nitrogen, AN)、有效磷 (Available phosphorus, AP) 及速效钾 (Fast-acting potassium, FK) 含量。

土壤有机碳 (SOC) 采用重铬酸钾氧化-水合加热法测定^[8]; 土壤全氮 (TN) 采用凯氏定氮法测定^[26]; 土壤全磷 (TP) 采用钼锑抗比色法测定^[26]; 土壤全钾 (TK) 采用氢氟酸-硝酸-高氯酸消解-火焰光度计法测定^[27]。

1.3 数据分析

研究数据用 Microsoft Office Excel 2013 进行初步整理, 用 SPSS 17.0 软件进行单因素方差分析 (One-way ANOVA), 双因素方差分析 (Two-way ANOVAs)、多重比较 (LSD) 和相关性分析 (Pearson correlation analysis), 显著性水平设为 0.05, 用 Excel 2007 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 不同林龄柚木人工林土壤理化性质

由表 2 可得, 10、32、37 年生柚木人工林 0—100 cm 土壤 pH 分别为 5、5.26、4.73; 水解氮分别为 107.81、

84.1、70.5 mg/kg;有效磷分别为 0.92、1.19、1.1 mg/kg;全钾分别为 12.03、11.06、5.41 g/kg;速效钾分别为 33、40.15、31.66 mg/kg;容重分别为 1.45、1.54、1.51 g/m³;质量含水量分别为 24.66、19.25、14.32%;最大持水量分别为 34.01、29.6、27.53%;最小持水量分别为 25.86、21、20.74%;毛管持水量分别为 30.5、26、25.22%;总孔隙度分别为 48.48、44.8、41.37%;毛管孔隙度分别为 43.55、39.51、37.93%;非毛管孔隙度分别为 4.92、5.29、3.44%。

表 2 不同林龄柚木人工林各土层土壤理化性质

Table 2 Physical and chemical properties of the *Teak* plantations in different soil layers and forest ages

因子 Parameters	林龄 Stand age/a	土层 Soil layer					均值 Mean
		0—10 cm	10—20 cm	20—30 cm	30—50 cm	50—100 cm	
pH	10	4.91±0.06ABa	4.90±0.07Aa	4.92±0.07Aa	5.09±0.06ABa	5.20±0.07Aa	5.00±0.04B
	32	5.19±0.15Aa	5.13±0.17Aa	5.19±0.20Aa	5.37±0.15Aa	5.40±0.17Aa	5.26±0.07A
	37	4.69±0.06Ba	4.77±0.08Aa	4.77±0.09Aa	4.78±0.09Ba	4.66±0.04Ba	4.73±0.03C
AN	10	176.31±2.70Aa	123.13±7.90Ab	90.8±5.82Ac	88.91±7.70Ac	59.89±4.96Ad	107.81±10.85A
	32	166.93±5.85Aa	84.44±5.91Bb	68.51±6.13Abc	53.67±7.65Ac	46.95±8.13Ac	84.10±11.88AB
	37	101.99±8.98Ba	79.69±11.40Bab	66.62±12.06Aab	54.12±10.63Ab	50.1±10.91Ab	70.50±6.49B
AP	10	2.16±0.42Aa	1.21±0.05Ab	0.59±0.01Ac	0.36±0.05Ac	0.29±0.10Ac	0.92±0.2A
	32	3.4±0.39Aa	1.14±0.13Ab	0.66±0.10Ab	0.39±0.04Ab	0.34±0.02Ab	1.19±0.31A
	37	2.43±0.07Aa	1.16±0.07Ab	0.91±0.16Abc	0.56±0.17Acd	0.43±0.02Ad	1.1±0.2A
TK	10	8.89±0.92Ab	9.94±0.64Aab	12.41±0.93Aab	14.47±1.45Aa	14.43±1.65Aa	12.03±0.76A
	32	10.49±1.48Aa	10.58±1.42Aa	10.83±1.41Aa	12.85±1.02Aa	10.56±1Ba	11.06±0.54A
	37	5.84±0.92Aa	6.12±0.82Ba	5.62±0.91Ba	4.66±0.23Ba	4.82±0.14Ca	5.41±0.3B
FK	10	50.8±7.34Ba	35.02±5.81Aab	26.94±4.31Ab	26.67±4.55Ab	25.55±3.43Ab	33.00±3.23A
	32	76.48±2.76Aa	38.23±2.08Ab	31.37±1.73Abc	27.76±3.41Ac	26.92±1.57Ac	40.15±5.05A
	37	51.68±3.41Ba	35.99±5.62Ab	28.85±4.54Ab	22.17±3.48Ab	19.61±3.23Ab	31.66±3.45A
SBD	10	1.28±0.06Aa	1.48±0.05Aa	1.51±0.08Aa	1.51±0.06Aa	1.45±0.03Ba	1.45±0.03A
	32	1.36±0.06Ab	1.54±0.07Aa	1.58±0.06Aa	1.61±0.06Aa	1.63±0.02Aa	1.54±0.03A
	37	1.45±0.04Aa	1.50±0.04Aa	1.52±0.01Aa	1.53±0.04Aa	1.53±0.04ABa	1.51±0.02A
MW	10	25.12±1.44Aa	23.06±2.31Aa	24.09±3.57Aa	24.86±5.06Aa	26.19±4.49Aa	24.66±1.4A
	32	21.98±2.41Aa	20.38±1.41ABa	17.6±0.60Aa	17.75±0.99Aa	18.53±0.52Aa	19.25±0.69B
	37	12.53±2.56Ba	13.82±1.97Ba	14.23±2.13Aa	14.8±2.68Aa	16.22±2.66Aa	14.32±0.97C
MAC	10	42.40±2.70Aa	32.94±2.49Aa	30.17±3.94Aa	31.38±3.92Aa	33.18±2.07Aa	34.01±1.65A
	32	40.04±5.10Aa	29.39±2.51Ab	26.98±2.15Ab	26.24±2.49Ab	25.33±1.00Bb	29.6±1.83B
	37	28.78±3.00Aa	27.51±1.32Aa	26.95±0.21Aa	27.41±1.19Aa	27.00±1.16Ba	27.53±0.65B
MIC	10	28.11±1.78Aa	24.07±2.32Aa	23.71±3.68Aa	26.08±4.11Aa	27.35±3.32Aa	25.86±1.28A
	32	26.12±3.14Aa	21.74±1.32Aa	18.73±0.72Aa	18.87±0.54Aa	19.53±0.44Aa	21.00±0.96B
	37	20.74±1.62Aa	20.71±0.13Aa	19.95±0.62Aa	20.6±1.09Aa	21.7±0.69Aa	20.74±0.39B
CC	10	36.16±1.68Aa	28.36±2.23Aa	27.58±3.18Aa	29.44±3.97Aa	30.93±2.67Aa	30.50±1.35A
	32	32.6±3.87Aa	26.76±1.90Aa	23.78±1.92Aa	23.64±1.76Aa	23.22±0.81Ba	26.00±1.28B
	37	25.97±2.28Aa	24.97±0.98Aa	24.8±0.29Aa	25.18±1.01Aa	25.18±0.62Ba	25.22±0.48B
TPO	10	54.15±0.87Aa	48.54±1.98Aa	44.76±3.63Aa	46.94±4.23Aa	47.98±2.10Aa	48.48±1.36A
	32	53.67±4.66Aa	44.81±1.94ABb	42.41±1.84Ab	41.89±2.36Ab	41.23±1.06Bb	44.80±1.59B
	37	41.58±3.34Aa	41.19±0.96Ba	41.01±0.50Aa	41.76±0.67Aa	41.3±0.83Ba	41.37±0.62B
CPO	10	46.25±0.39Aa	41.82±2.10Aa	41.00±2.80Aa	44.00±4.42Aa	44.69±3.07Aa	43.55±1.2A
	32	43.75±3.43Aa	40.85±1.22Ab	37.38±1.61Ab	37.79±1.36Ab	37.79±0.78Ab	39.51±0.98B
	37	37.56±2.41Aa	37.40±0.67Aa	37.75±0.48Aa	38.38±0.53Aa	38.56±0.41Aa	37.93±0.46B
NCPO	10	7.90±0.89ABa	6.73±0.70Aab	3.76±1.46Ab	2.94±0.20Ab	3.29±10Ab	4.92±0.64A
	32	9.92±1.59Aa	3.96±0.84Ab	5.03±1.00Ab	4.10±1.02Ab	3.43±0.36Ab	5.29±0.75A
	37	4.02±0.95Ba	3.79±0.52Aa	3.26±0.21Aa	3.38±0.73Aa	2.74±0.82Aa	3.44±0.29A

同行不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$); 同元素同列不同大写字母表示差异显著 ($P<0.05$); SBD: 土壤容重 Soil bulk density; MW: 质量含水量 Mass water content; MAC: 最大持水量 Maximum water holding capacity; MIC: 最小持水量 Minimum water holding capacity; CC: 毛管持水量 Capillary water holding capacity; TPO: 总孔隙度 Total porosity; CPO: 毛管孔隙度 Capillary porosity; NCPO: 非毛管孔隙度 Non-capillary porosity; SOC: 有机碳 Soil organic carbon; TN: 全氮 Total nitrogen; TP: 全磷 Total phosphorus; TK: 全钾 Total potassium; AN: 水解氮 Available nitrogen; AP: 有效磷 Available phosphorus; FK: 速效钾 Fast-acting potassium

方差分析结果表明,土壤质量含水量、最大持水量、最小持水量、毛管持水量、总孔隙度、毛管孔隙度及非毛管孔隙度均伴随林龄的增加呈现降低趋势,土壤质量含水量不同林龄间差异显著($P<0.05$),其他水分-物理指标差异不显著($P>0.05$);土壤 pH、有效磷、速效钾及容重均伴随林龄的增加呈现先上升后降低的趋势,均在 32 a 达到峰值,土壤 pH 不同林龄间差异显著($P<0.05$),有效磷、速效钾及容重不同林龄间差异不显著($P>0.05$);10 年生柚木林土壤水解氮含量显著高于 32 a 和 37 a($P<0.05$),不同林龄间差异显著($P<0.05$),并伴随林龄的增加呈现明显的降低趋势;土壤全钾随林龄的增加呈现明显降低趋势,不同林龄间差异不显著($P>0.05$)。

从同一林龄不同土层看,10 年生柚木林土壤 pH、全钾和容重随土层加深逐渐增大;水解氮、有效磷和速效钾随土层加深逐渐减小;其他水分-物理指标均随土层的加深呈现先减小后增大的趋势。32 年生柚木林土壤 pH 和容重随土层加深逐渐增大;全钾随土层加深呈现先增大后减小的趋势;水解氮、有效磷、速效钾、最大持水量、毛管持水量、总孔隙度和非毛管孔隙度均随土层加深逐渐减小;其他水分-物理指标均随土层的加深呈现先减小后增大的趋势。37 年生柚木林土壤 pH、容重、质量含水量和毛管孔隙度均随土层加深逐渐增大;全钾随土层的加深呈现先增大后减小的趋势;水解氮、有效磷、速效钾和非毛管孔隙度随土层加深逐渐减小;其他水分-物理指标均随土层的加深呈现先减小后增大的趋势。方差分析表明,10、32、37 年生林分土壤水解氮、有效磷和速效钾均表现为 0—10 cm 土层显著高于 10—100 cm 土层($P<0.05$);全钾表现出 50—100 cm 不同林龄间差异显著($P<0.05$),10 年生林分不同土层间差异显著($P<0.05$),其他不同林龄不同土层间差异均不显著($P>0.05$);水解氮和速效钾除 37 年生林分外,其他林分不同土层间差异显著($P<0.05$);有效磷除 32 年生林分外,其他林分不同土层间差异显著($P<0.05$);其余土壤理化性质除 10 年生林分非毛管孔隙度不同土层间差异显著($P<0.05$),其他不同林龄不同土层间差异均不显著($P>0.05$)。

2.2 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征

由图 1 可得,土壤 SOC、TN 和 TP 随林龄的增加大体表现出先上升后降低的趋势。通过对同一土层不同林龄的 SOC、TN 和 TP 含量进行单因素方差分析,发现不同林龄 SOC 和 TN 除表层 0—10 cm 差异显著($P<0.05$)外,10—100 cm 土层均没有显著差异;TP 除 TK0—10 cm 差异不显著($P>0.05$)外,其他各土层不同林龄间均差异显著($P<0.05$)。10 a 和 32 a 柚木林 0—10 cm SOC 和 TN 含量显著高于 37 a 林分。

土壤 SOC 和 TN 含量随着土层的加深呈现明显下降的趋势,3 个林龄 TP 含量在 0—10、10—20、20—30、30—50、50—100 cm 的平均值分别为 0.35、0.31、0.29、0.29、0.28 mg/kg,也表现出随土层的增加而减小;TK 含量 0—100 cm 的均值分别为 8.41、8.88、9.62、10.66、9.94 mg/kg,大体表现出先升高后降低的趋势,分别在 30—50 cm 和 0—10 cm 达到最大和最小值。

由于不同龄组土壤 SOC、TN 和 TP 变化不大,导致 5 个土层的林龄间 C:P 和 N:P 差异不显著($P>0.05$),C:N 主要受到 SOC 和 TN 含量变化的影响,不同林龄 C:N 统计上的差异只体现在 0—10 cm($P<0.05$)。

C:P 和 N:P 随着土层的加深呈现明显下降趋势,C:N 也大致表现为随着土层的加深而降低。10 年生柚木林 C:N、C:P 和 N:P 不同土层间差异显著($P<0.05$);32 年生林分 C:P 和 N:P 不同土层间差异显著($P<0.05$),而 C:N 未表现出显著差异;37 年生林分 C:N、C:P 和 N:P 不同土层间差异均不显著($P>0.05$)。

2.3 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征与土壤理化性质的关系

由表 3 可得,不同的土壤水分-物理性质(即土壤容重、质量含水量、田间持水量和孔隙度)之间存在紧密的相关关系,pH 值与多个水分-物理性质(最大持水量、最小持水量、毛管持水量和孔隙度)及基本元素含量(有机碳、全氮、水解氮、有效磷、速效钾和 N:P)间不存在相关关系。有机碳与多个土壤理化性质极显著相关($P<0.01$),除与质量含水量和全钾无相关关系外,与其他指标均极显著正相关($P<0.01$);全氮除与全钾无相关关系外,与土壤容重极显著负相关($P<0.01$),与其他土壤水分-物理性质和基本元素含量极显著正相关($P<0.01$);全磷与土壤容重显著负相关($P<0.05$),与其他所有水分-物理性质极显著正相关($P<0.01$),与有机碳、全氮、全钾、水解氮和速效钾极显著正相关($P<0.01$),与有效磷正相关($P<0.05$)。

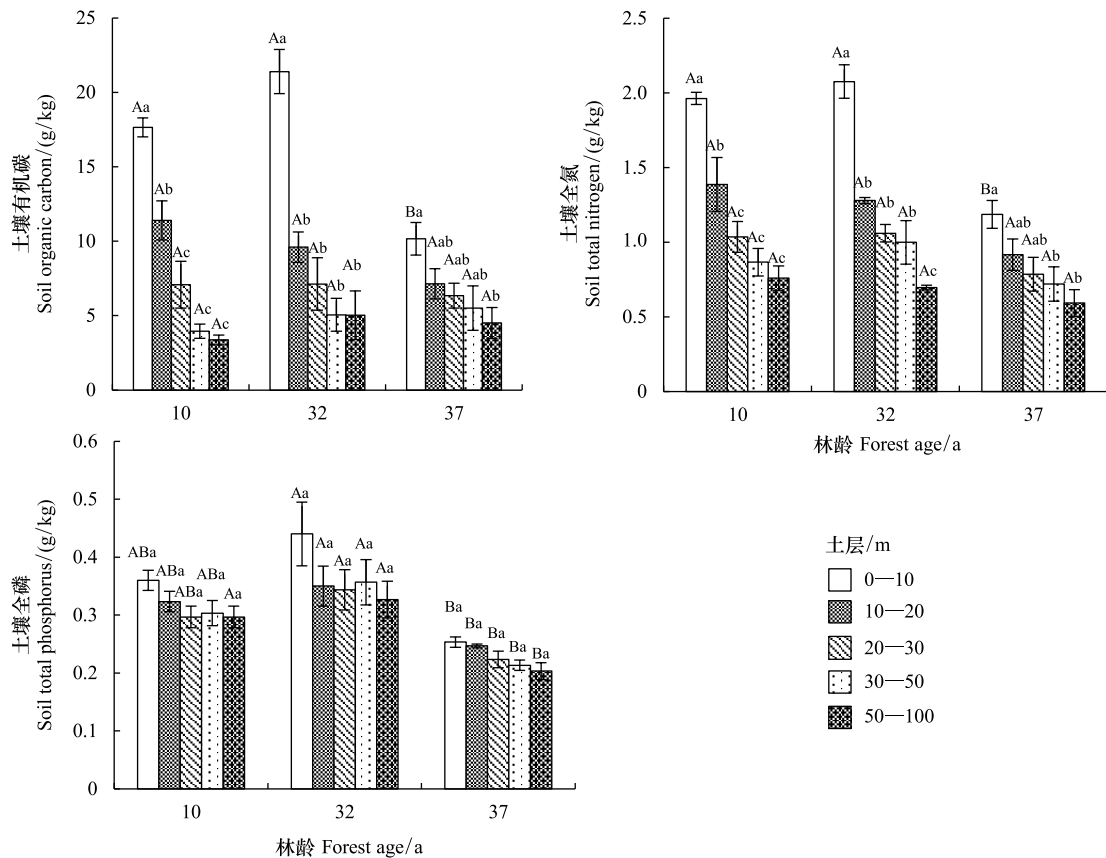


图1 不同林龄柚木人工林土壤有机碳、全氮及全磷含量

Fig.1 The soil SOC, TN and TP content of *Teak* plantations in different ages

数据表示为均值±标准差;不同大写字母表示同一土层下不同林龄间达到显著差异($P < 0.05$);不同小写字母表示同一林龄不同土层间存在显著差异($P < 0.05$)

C:N 与最大持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机碳、全氮、水解氮、有效磷、速效钾、C:P 和 N:P 极显著正相关($P < 0.01$),与 pH、土壤容重、全钾极显著负相关($P < 0.01$);C:P 与最大持水量、毛管持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机碳、全氮、水解氮、有效磷、速效钾和 C:N 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与 pH、容重和全钾显著负相关($P < 0.05$);N:P 与最大持水量、毛管持水量、总孔隙度、非毛管孔隙度、有机碳、全氮、水解氮、有效磷、速效钾、C:N 和 C:P 呈极显著正相关关系($P < 0.01$),与土壤容重极显著负相关($P < 0.01$)。土壤养分循环与土壤物理性质存在一定关联,其中受土壤容重、最大持水量、总孔隙度和非毛管孔隙度的影响较显著。

3 讨论

3.1 不同林龄柚木人工林土壤理化性质的变化

已有研究表明,林龄通过改变林分结构格局对人工林土壤理化性质产生显著影响^[28],但土壤理化性质对林龄的响应与树种选择有密切关系^[12]。土壤 pH 值反映土壤熟化程度,对养分的蓄存状态有直接影响^[29]。本研究区柚木林土壤 pH 为 4.6—5.4,与海南地区(4.3—5.7)、云南西双版纳地区(4.3—6.5)和揭阳地区(4.2—5.0)同属酸性土壤^[14]。本研究区属亚热带季风气候区,该地区降水充沛,土壤淋溶作用强烈,酸性土壤对柚木的生长发育有一定的限制作用^[14]。土壤容重是反映土壤肥力状况的重要指标^[30],广西凭祥大青山地区柚木人工林在不同林龄和不同土层间均未表现出显著差异,可能是由于所选样地未经过森林抚育及施肥等人为管理活动导致。

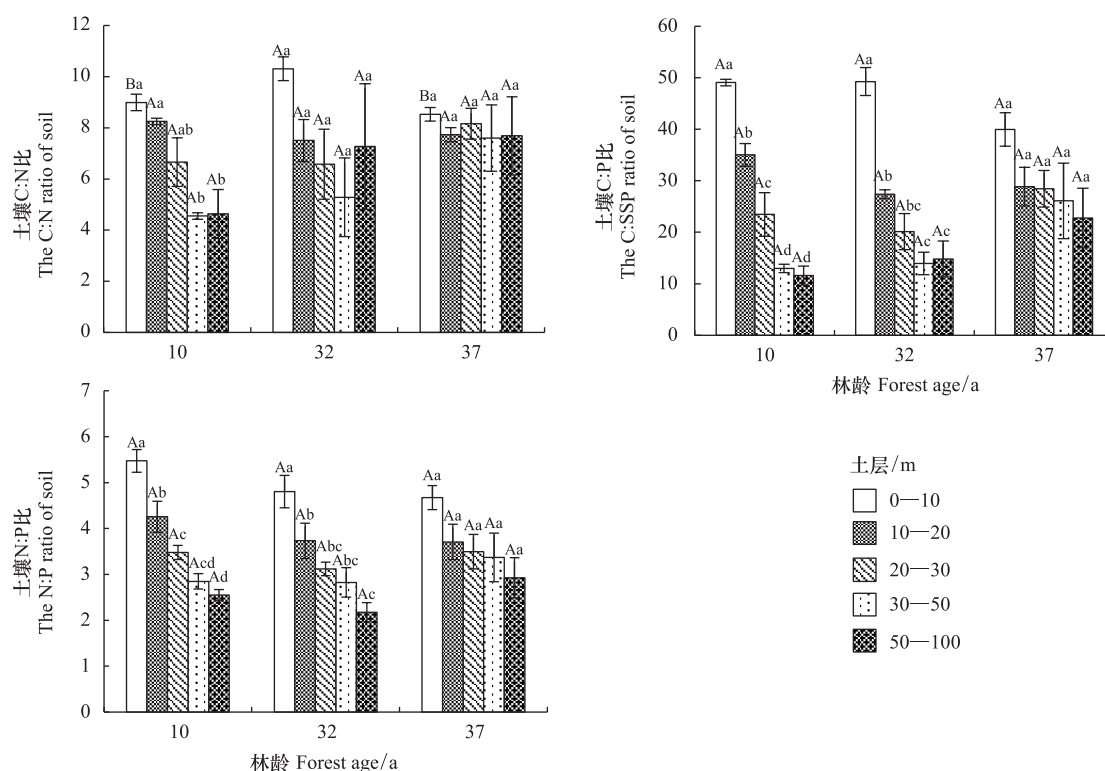


图2 不同林龄柚木人工林土壤 C:N、C:P 及 N:P

Fig.2 The soil ratio of C/N, C/P and N/P of Teak plantations in different ages

数据表示为均值±标准差;不同大写字母表示同一土层下不同林龄间达到显著差异($P<0.05$);不同小写字母表示同一林龄不同土层间存在显著差异($P<0.05$)

土壤水分物理指标作为土壤肥力状况最直接的影响因素,对土壤养分的有效性有显著影响^[28],在本研究中,土壤质量含水量、最大持水量、最小持水量和毛管持水量随林龄的增加而减小,主要是由于本研究地柚木种植前的林地清理方式采用的是传统炼山方式,炼山会引发土壤短暂的激肥效应^[31],土壤水分和物理性质一定程度上受到了人类整地活动的促进作用^[32],随着林龄的增加林分郁闭度提高,林下生物量显著减少,导致土壤密度增大、持水能力减弱、土壤孔隙度减小^[12];随土层的加深,土壤质量含水量、最大持水量、最小持水量和毛管持水量大体呈现减小趋势,主要是由于土壤表层积累了大量的凋落物,下层比表层更加紧实、毛管孔隙度较小^[28]。

土壤孔隙度分为毛管和非毛管孔隙度,毛管孔隙度表征土壤持水蓄水能力,而非毛管孔隙度则可表征土壤的通气透水能力^[33]。随着林龄的增加,土壤孔隙度(总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度)呈减小趋势,这与郝中明^[34]的研究结果一致,可能是由于研究地柚木的土壤容重总体随林龄的增加而逐渐增加所致^[34],本研究中土壤孔隙度的变化趋势与水分物理指标一致,皮尔逊相关分析也表明孔隙度与水分特征呈显著正相关关系。

3.2 不同林龄柚木人工林土壤生态化学计量特征与土壤理化性质的关系

本研究中,3个林龄的土壤有机碳和全氮含量均随土层的加深逐渐减小,这是由于土壤 C、N 元素主要来源于林内凋落物的分解输入,经微生物分解先富集于表层,后经林内降雨引发淋溶作用而向下迁移,因此,在土层上表现出自上而下逐渐减小的变化特征^[5]。土壤有机碳是土壤可持续生产的重要因子,对土壤理化性质有重要影响^[35]。不同林龄柚木人工林土壤有机碳随林龄的增加大体表现出先上升后降低的趋势,这与张芸^[12]的研究结果一致。已有研究表明土壤氮素是土壤碳库吸存的关键影响参数^[36-37],本研究中有机碳与全氮和水解氮含量极显著正相关(全氮: $r=0.929$,水解氮: $r=0.916$, $P<0.01$),为了维持土壤碳库的长期稳定,保

表 3 柚木人工林土壤理化性质和生态计量特征的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil physical and chemical properties and ecological measurement characteristics of teak plantation

	pH	SBD	MW	MAC	MIC	CC	TPO	CPO	NCPO	SOC	TN	TP	TK	AN	AP	FK	C:N	C:P	N:P
pH	1																		
SBD	0.360 [*]	1																	
MW	0.315 [*]	-0.397 ^{**}	1																
MAC	-0.102	-0.928 ^{**}	0.617 ^{**}	1															
MIC	-0.02	-0.749 ^{**}	0.849 ^{**}	0.848 ^{**}	1														
CC	-0.114	-0.904 ^{**}	0.705 ^{**}	0.971 ^{**}	0.931 ^{**}	1													
TPO	0.02	-0.837 ^{**}	0.713 ^{**}	0.973 ^{**}	0.867 ^{**}	0.955 ^{**}	1												
CPO	0.029	-0.728 ^{**}	0.836 ^{**}	0.866 ^{**}	0.955 ^{**}	0.944 ^{**}	0.918 ^{**}	1											
NCPO	-0.005	-0.662 ^{**}	0.177	0.734 ^{**}	0.327 [*]	0.551 ^{**}	0.705 ^{**}	0.365 [*]	1										
SOC	-0.114	-0.696 ^{**}	0.237	0.736 ^{**}	0.422 ^{**}	0.612 ^{**}	0.686 ^{**}	0.443 ^{**}	0.818 ^{**}	1									
TN	0.086	-0.616 ^{**}	0.417 ^{**}	0.719 ^{**}	0.489 ^{**}	0.621 ^{**}	0.698 ^{**}	0.503 ^{**}	0.737 ^{**}	0.929 ^{**}	1								
TP	0.442 ^{**}	-0.369 [*]	0.519 ^{**}	0.586 ^{**}	0.432 ^{**}	0.520 ^{**}	0.646 ^{**}	0.523 ^{**}	0.581 ^{**}	0.624 ^{**}	0.698 ^{**}	1							
TK	0.712 ^{**}	0.039	0.708 ^{**}	0.222	0.409 ^{**}	0.284	0.359 [*]	0.465 ^{**}	0.009	-0.058	0.167	0.552 ^{**}	1						
AN	-0.129	-0.710 ^{**}	0.371 [*]	0.765 ^{**}	0.522 ^{**}	0.670 ^{**}	0.723 ^{**}	0.524 ^{**}	0.759 ^{**}	0.916 ^{**}	0.914 ^{**}	0.531 ^{**}	0.081	1					
AP	-0.111	-0.475 ^{**}	-0.05	0.433 ^{**}	0.167	0.322 [*]	0.369 [*]	0.158	0.584 ^{**}	0.836 ^{**}	0.779 ^{**}	0.341 [*]	-0.203	0.772 ^{**}	1				
FK	0.094	-0.488 ^{**}	0.241	0.537 ^{**}	0.375 [*]	0.451 ^{**}	0.514 ^{**}	0.345 [*]	0.588 ^{**}	0.835 ^{**}	0.842 ^{**}	0.550 ^{**}	0.067	0.754 ^{**}	0.881 ^{**}	1			
C:N	-0.478 ^{**}	-0.511 ^{**}	-0.239	0.399 ^{**}	0.063	0.289	0.322 [*]	0.108	0.561 ^{**}	0.691 ^{**}	0.403 ^{**}	0.202	-0.480 ^{**}	0.515 ^{**}	0.553 ^{**}	0.405 ^{**}	1		
C:P	-0.414 ^{**}	-0.649 ^{**}	-0.006	0.564 ^{**}	0.261	0.455 ^{**}	0.472 ^{**}	0.251	0.658 ^{**}	0.888 ^{**}	0.768 ^{**}	0.23	-0.372 [*]	0.836 ^{**}	0.836 ^{**}	0.716 ^{**}	0.774 ^{**}	1	
N:P	-0.263	-0.517 ^{**}	0.141	0.475 ^{**}	0.292	0.402 ^{**}	0.402 ^{**}	0.249	0.497 ^{**}	0.757 ^{**}	0.803 ^{**}	0.157	-0.212	0.814 ^{**}	0.785 ^{**}	0.708 ^{**}	0.401 ^{**}	0.880 ^{**}	1

*表示 $P < 0.05$ 的显著性; **表示 $P < 0.01$ 的显著水平

持较为合理的氮素水平是一项尤为重要的管理措施^[36]。土壤磷素的丰缺对森林生态系统的养分平衡状况有直接影响,速效养分能准确反映养分供应状况,与植物生长密切相关,故对速效养分的测定十分必要^[28]。本研究中,土壤全磷和有效磷随林龄的增加呈现先增加后减小的趋势,这与纪文婧^[38]的研究结果一致,随土层的加深逐渐减小,与白小芳^[39]的研究结果一致。但是本研究中柚木人工林全氮含量低于 2.09 g/kg,低于欧洲国家的土壤全氮水平,属于缺氮土壤;全磷含量低于 0.8 g/kg,有效磷含量低于 8 mg/kg,本地区磷素属于严重缺乏状态^[40]。钾素是植物生长最重要的组成元素之一^[28]。本研究中,速效钾表现出表聚效应,与苟丽晖等^[41]的研究结果一致。全钾随林龄的增加呈减小趋势,与有机碳、氮磷的变化规律不同,这可能是由于 10 a 林分 pH 值相对较低,土壤矿物中钾的置换作用在该时期比较活跃有关。关于有机碳与钾素的相关关系,研究结果不尽相同^[35,40],本研究发现有机碳与全钾含量未表现出显著相关性,而与速效钾呈显著正相关关系,可能与钾的循环特征有关。

土壤 C:N:P 是土壤 C、N、P 矿化和固持作用的重要指标^[2],C:N 用于衡量土壤 C、N 营养元素平衡状况,C:N 比可表征土壤有机质的矿化速率,其比值越低,矿化速率越快^[42]。在本研究中,柚木人工林林龄和土层对土壤 C:N、N:P 的影响除表层(0—10 cm)外未表现出显著的影响,这与胡启武等^[10]对鄱阳湖地区沙山湿地松的研究结果相似,而与雷丽群^[5]的研究结果恰恰相反。本研究区柚木土壤 C:N 随林龄的增加而增大,这与牛瑞龙^[8]对秦岭不同林龄华北落叶松人工林的研究一致。有研究表明^[43],当 C:N 比升高时,土壤微生物需摄入氮素以满足自身需要,当 C:N 比降低时,微生物会将多于自身需要的氮素释放到土壤中。本研究发现 3 个林龄柚木人工林土壤 C:N 平均值为 7.32,低于我国土壤 C:N 平均值 11.90^[44],表现为 37 年生林分(7.94) > 32 年生林分(7.39) > 10 年生林分(6.62),不同林龄 C:N 时间上保持相对恒定,原因是由于随着树龄的增加,柚木人工林土壤 C 和 N 含量同时减小所致。综上可得,C:N 随林龄的增加而增大,土壤矿化作用随之减弱,氮素被土壤微生物所消耗,柚木可吸收利用的 C、N 元素随之减少,说明纯林减少了 C、N 储量,降低了 N 的有效性,柚木纯林化经营不利于其生长发育,适当混交化改造显得十分重要^[45],具体混交化经营方式有待进一步研究。

土壤 C:P 是衡量土壤有机质向周围环境释放 P 素或从环境中吸持 P 素潜力的重要指标,C:P 对土壤 P 有效性高低起重要指示作用,其之间呈负相关关系^[2,26]。本研究中,土壤 C:P 随柚木林龄的增加表现出先减小后增加的趋势,这与任璐璐^[6]的研究结果一致。贾宇等^[46]研究发现,C:P 对微生物 C 素和 P 素有显著影响,当 C:P > 200 时,微生物 C 素迅速增加,P 素发生净固持作用;当 C:P < 200 时,土壤微生物 C 素短暂性增加,P 素发生净矿化作用。本研究发现 3 个林龄柚木人工林土壤 C:P 平均值为 26.92,不但未达 200 更明显低于我国土壤 C:P 平均水平(60.00),表现为 37 年生林分(29.23) > 10 年生林分(26.42) > 32 年生林分(25.11),C:P 在 32 a 达到最低,在 37 a 达到最高,表明随着林龄的增加,柚木纯林不仅降低了土壤 C、N、P 含量(图 1),且土壤有机质的分解速度及 P 素的有效性也随之降低,本研究区柚木纯林生长受到 P 限制,纯林化经营降低了土壤养分含量并影响柚木的养分利用效率,进而限制柚木生长^[47],该地区土壤可利用 P 素非常有限,同时这也与南亚热带红壤地区磷背景值低有关^[12]。

土壤 N:P 可用作表征 N 素饱和与限制的重要诊断指标^[2,26]。本研究发现 3 个林龄柚木人工林土壤 N:P 平均值为 3.56,明显低于全国土壤 N:P 水平(5.10),表现为 10 年生林分(3.72) > 37 年生林分(3.63) > 32 年生林分(3.33),3 个林龄柚木人工林土壤 N:P 随林龄的增加表现出先减小后增加的趋势,土壤中 N 含量的变化是土壤 N:P 变化的重要影响因素,枯落物分解输入、柚木吸收利用是 N 含量变化的主要原因,这与任璐璐^[6]和曹娟^[26]的研究结果一致。刘兴诏等^[48]针对土壤氮、磷的相互关系进行研究,发现土壤 N:P 随着林龄的增加呈现出明显增加的变化趋势;白荣^[49]研究认为,土壤 N:P 随着林龄的增加呈现先升高后降低的趋势,在发育中期达到最大值。本研究有所不同,可能是由于植被生长状况和立地条件不同所造成。本研究林龄对土壤 N:P 无显著影响,但土层对 N:P 表现出显著性影响,3 个林龄柚木人工林土壤 P 素含量整体偏低且比较稳定,皮尔逊相关分析也表明土壤 N:P 与土壤全氮和水解氮含量极显著正相关,与全磷含量相关性不显著,说

明土壤 N:P 在不同土层间的变化差异主要受 N 素影响。

4 结论

分析 10、32、37a 柚木人工林土壤理化性质和 C:N:P 生态化学计量比及其之间的相关关系,发现除土壤容重、有效磷、速效钾、C:P 和 N:P 外,林龄对其他土壤理化性质和 C:N 均有显著影响;C:N、C:P 随林龄的增加而增大,柚木纯林化经营减少了 C、N、P 储量,其生长受到 P 限制,适当混交化改造显得十分重要;研究发现,广西大青山地区 3 个林龄柚木人工林土壤 C:N(7.32)、C:P(26.92)和 N:P(3.56)平均值均明显低于全国土壤 C:N(11.90)、C:P(60.00)和 N:P(5.10)平均水平,表明该地区土壤可利用 C、N、P 素仍非常有限。对土壤 SOC、TN、TP 含量、C:N、C:P 和 N:P 之间进行皮尔逊相关分析得出,C:N 与 SOC 的相关性大于与 TN 的相关性,C:P 与 SOC 的相关性大于与 TP 的相关性,说明柚木人工林土壤 C:N 和 C:P 主要受有机碳含量的影响,因此在柚木人工林经营管理过程中如何科学调控土壤中有有机碳含量显得尤为重要。本研究区 C:N 和 C:P 较低,表明有机质分解较快,这对于雨量充沛的亚热带柚木人工林来讲可能不利于其土壤肥力的维持。

致谢:中国林业科学研究院热带林业实验中心何日明、陈海参加了野外调查,中国林业科学研究院热带林业实验中心青山实验场提供外业调查支持,特此致谢。

参考文献 (References):

- [1] 邢伟,刘寒,刘贵华.生态化学计量学在水生态系统中的应用.植物科学学报,2015,33(5):608-619.
- [2] 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.生态学报,2008,28(8):3937-3947.
- [3] 程瑞梅,王娜,肖文发,沈雅飞,刘泽彬.陆地生态系统生态化学计量学研究进展.林业科学,2018,54(7):130-136.
- [4] Lucas-Borja M E, Hedro J, Cerdá, A, Candel-Pérez D, Viñegla B. Unravelling the importance of forest age stand and forest structure driving microbiological soil properties, enzymatic activities and soil nutrients content in Mediterranean Spanish black pine (*Pinus nigra* Ar. ssp. *salzmannii*) Forest. Science of the Total Environment, 2016, 562: 145-154.
- [5] 雷丽群,卢立华,农友,明安刚,刘士玲,何远.不同林龄马尾松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征.林业科学研究,2017,30(6):954-960.
- [6] 任璐璐,张炳学,韩凤朋,张兴昌.黄土高原不同年限刺槐土壤化学计量特征分析.水土保持学报,2017,31(2):339-344.
- [7] 姜沛沛,曹扬,陈云明,王芳.不同林龄油松(*Pinus tabulaeformis*)人工林植物、凋落物与土壤 C、N、P 化学计量特征.生态学报,2016,36(19):6188-6197.
- [8] 牛瑞龙,高星,徐福利,王渭玲,王玲玲,孙鹏跃,白小芳.秦岭中幼林龄华北落叶松针叶与土壤的碳氮磷生态化学计量特征.生态学报,2016,36(22):7384-7392.
- [9] 张珂,苏永中,王婷,刘婷娜.荒漠绿洲区不同种植年限人工梭梭林土壤化学计量特征.生态学报,2016,36(11):3235-3243.
- [10] 胡启武,聂兰琴,郑艳明,吴琴,尧波,郑林.沙化程度和林龄对湿地松叶片及林下土壤 C、N、P 化学计量特征影响.生态学报,2014,34(9):2246-2255.
- [11] 程滨,赵永军,张文广,安树青.生态化学计量学研究进展.生态学报,2010,30(6):1628-1637.
- [12] 张芸,李惠通,张辉,黄彬彬,刘春华,蒋宗垲,马祥庆.不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 化学计量特征及其与土壤理化性质的关系.生态学报,2019,39(7):2520-2531.
- [13] 秦海龙,付旋旋,卢瑛,韦翔华,李博,贾重建,姜坤.广西猫儿山不同海拔土壤碳氮磷生态化学计量特征.应用生态学报,2019,30(3):711-717.
- [14] 杜健,梁坤南,周树平,李碧均,周再知.不同地区柚木人工林生长及土壤理化性质的研究.林业科学研究,2016,29(6):854-860.
- [15] Zhou Z Z, Liu S C, Liang K N, Ma H N, Huang G H. Growth and mineral nutrient analysis of teak (*Tectona grandis*) grown on acidic soils in south China. Journal of Forestry Research, 2017, 28(3): 503-511.
- [16] Wehr J B, Blamey F P C, Smith T E, Menzies N W. Growth and physiological responses of teak (*Tectona grandis* Linn. f.) clones to Ca, H and Al stresses in solution and acid soils. New Forests, 2017, 48(1): 137-152.
- [17] 周树平,梁坤南,杜健,李碧均,周再知,黄桂华.不同密度柚木人工林林下植被及土壤理化性质的研究.植物研究,2017,37(2):200-210.
- [18] Yusanto Nugroho, Suyanto, Eva, Prihartiningtyas, Rahmawati. Evaluation of Growth and Health of Teak Plants (*Tectona grandis* Linn. f.) Age 15 Years in the Ultisol Soil. International Journal of Agriculture and Forestry. 2018, 8(4): 155-159.
- [19] Nölte A, Meilby H, Yousefpour R. Multi-purpose forest management in the tropics: Incorporating values of carbon, biodiversity and timber in managing *Tectona grandis* (teak) plantations in Costa Rica. Forest Ecology and Management, 2018, 422: 345-357.

- [20] Suryatmojo H, Imron M A. Hydrological processes in different types of teak (*Tectona grandis* L.) Plantation//McLellan B, ed. Sustainable Future for Human Security. Singapore: Springer, 2018.
- [21] Lacombe G, Valentin C, Sounyafong P, de Rouw A, Souleuth B, Silvera N, Pierret A, Sengtaheuanghoung O, Ribolzi O. Linking crop structure, throughfall, soil surface conditions, runoff and soil detachment: 10 land uses analyzed in Northern Laos. *Science of the Total Environment*, 2018, 616-617: 1330-1338.
- [22] Lestari P, Nurjanto H H, Listianti. Effect of Nitrogen (N) concentration on the morphology of teak (*Tectona grandis*) seedlings//Sukartiko A C, Nuringtyas T R, Marlina S N, Isnansetyo A, eds. Proceeding of the 2nd International Conference on Tropical Agriculture. Cham: Springer, 2018.
- [23] 周再知. 酸性土壤柚木钙素营养研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2009.
- [24] 卢俊培. 海南柚木立地类型及评价. *林业科学研究*, 1994, 7(6): 677-684.
- [25] 杜健, 梁坤南, 周再知, 黄桂华, 李碧均, 马华明. 云南西双版纳柚木人工林立地类型划分及评价. *林业科学*, 2016, 52(9): 1-10.
- [26] 曹娟, 闫文德, 项文化, 湛小勇, 雷丕锋. 湖南会同3个林龄杉木人工林土壤碳、氮、磷化学计量特征. *林业科学*, 2015, 51(7): 1-8.
- [27] 王璐, 喻阳华, 邢容容, 秦仕忆. 喀斯特高寒干旱区不同经济树种的碳氮磷钾生态化学计量特征. *生态学报*, 2018, 38(15): 5393-5403.
- [28] 邱新彩, 彭道黎, 李伟丽, 姜昊辰. 北京延庆区不同林龄油松人工林土壤理化性质. *应用与环境生物学报*, 2018, 24(2): 221-229.
- [29] Yu Y C, Yang J Y, Zeng S C, Wu D M, Jacobs D F, Sloan J L. Soil pH, organic matter, and nutrient content change with the continuous cropping of *Cunninghamia lanceolata* plantations in South China. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(9): 2230-2238.
- [30] 耿玉清, 余新晓, 孙向阳, 陈峻崎, 姚永刚. 北京八达岭地区油松与灌丛林土壤肥力特征的研究. *北京林业大学学报*, 2007, 29(2): 50-54.
- [31] 马祥庆, 何智英, 俞新妥. 不同林地清理方式对杉木人工林地力的影响. *林业科学*, 1995, 31(6): 485-490.
- [32] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 俞立炬, 林景露. 整地方式对杉木人工林生态系统的影响. *山地学报*, 2000, 18(3): 237-243.
- [33] 孙培峰. 不同林龄刺槐人工林林分结构和土壤特性研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2015.
- [34] 郝中明, 曾青, 明乐, 李霞, 谢明阳. 广西地区不同林龄的马尾松及其混交林土壤 N 素研究. *中国农业文摘·农业工程*, 2018, 30(5): 21-25.
- [35] Hossain M S, Hossain A, Sarkar M A R, Jahiruddin M, Da Silva J A T, Hossain M I. Productivity and soil fertility of the rice-wheat system in the High Ganges river Floodplain of Bangladesh is influenced by the inclusion of legumes and manure. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 218: 40-52.
- [36] Zhang Y L, Chen H, Bai S H, Menke C, Zhang M Y, Xu Z H. Interactive effects of biochar addition and elevated carbon dioxide concentration on soil carbon and nitrogen pools in mine spoil. *Journal of Soils and Sediments*, 2017, 17(10): 2400-2409.
- [37] Chen X M, Li Y L, Mo J M, Otieno D, Tenhunen J, Yan J H, Liu J X, Zhang D Q. Effects of nitrogen deposition on soil organic carbon fractions in the subtropical forest ecosystems of S China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2012, 175(6): 947-953.
- [38] 纪文婧. 山西太岳山不同林龄华北落叶松人工林养分特征研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2016.
- [39] 白小芳, 徐福利, 王渭玲, 赵亚芳, 王玲玲, 孙鹏跃. 华北落叶松人工林土壤碳氮磷生态化学计量特征. *中国水土保持科学*, 2015, 13(6): 68-75.
- [40] 耿玉清, 余新晓, 岳永杰, 牛丽丽. 北京山地森林的土壤养分状况. *林业科学*, 2010, 46(5): 169-175.
- [41] 荀丽晖, 孙兆地, 聂立水, 罗盼盼, 吴记贵, 许武德. 北京松山自然保护区不同母质油松林土壤氮、磷、钾含量垂直分布. *应用生态学报*, 2013, 24(4): 961-966.
- [42] Mu Z J M, Huang A Y, Ni J P, Xie D T. Linking annual N_2O emission in organic soils to mineral nitrogen input as estimated by heterotrophic respiration and soil C/N ratio. *PLoS One*, 2014, 9(5): e96572.
- [43] Bengtsson G, Bengtson P, Månnsson K F. Gross nitrogen mineralization-, immobilization-, and nitrification rates as a function of soil C/N ratio and microbial activity. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(1): 143-154.
- [44] Tian H Q, Chen G S, Zhang C, Melillo J M, Hall C A S. Pattern and variation of C:N:P ratios in China's soils: a synthesis of observational data. *Biogeochemistry*, 2010, 98(1/3): 139-151.
- [45] 王凯, 雷虹, 石亮, 张日升, 宋立宁. 沙地樟子松带状混交林土壤碳氮磷化学计量特征. *应用生态学报*, 2019, 30(9): 2883-2891.
- [46] 贾宇, 徐炳成, 李凤民, 王晓凌. 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. *生态学报*, 2007, 27(1): 42-47.
- [47] 张藤子, 李亚楠, 韩飞燕, 张淞著, 周永斌. 辽西两种油松混交林土壤及油松叶片 C:N:P 化学计量特征. *生态学杂志*, 2018, 37(10): 3061-3067.
- [48] 刘兴诏, 周国逸, 张德强, 刘世忠, 褚国伟, 闫俊华. 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. *植物生态学报*, 2010, 34(1): 64-71.
- [49] 白荣. 滇中高原典型植被演替进程中的生态化学计量比特征研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2012.