

不同杉木林分类型土壤团聚体生态化学计量特征

张钱春, 王晟强, 黄永珍, 姚贤宇, 何欣欣, 叶绍明*

(广西大学 林学院, 南宁 530004)

摘要: 在野外调查的基础上, 选择成土母质相同、坡向坡度相似、海拔基本一致的杉木-米老排、杉木-火力楠和杉木纯林 3 种杉木人工林采集土壤样品, 通过干筛法分离 >2 mm、 $2\sim 0.25$ mm 和 <0.25 mm 3 个团聚体组分, 研究其土壤团聚体有机碳、全氮、全磷的含量及其生态化学计量特征, 以阐明不同杉木林分类型土壤团聚体碳氮磷生态化学计量特征的指示意义。结果表明: (1) $0\sim 10$ cm 和 $10\sim 20$ cm 土层有机碳、全氮和全磷含量的变异系数分别为 21.37%、21.00%、21.46% 和 20.35%、16.51%、17.82%; 全氮的变异系数低于有机碳和全磷, 但三者含量呈极显著正相关关系。(2) 有机碳和全氮含量集中分布于小粒径团聚体 (<0.25 mm) 中, 全磷含量在各粒径团聚体中分布较为均匀; 在不同林分类型中土壤有机碳、全氮和全磷含量均表现为杉木-火力楠 $>$ 杉木-米老排 $>$ 杉木纯林; 在 $0\sim 10$ cm 和 $10\sim 20$ cm 土层的 C/N、C/P 和 N/P 的变异系数分别为 14.09%、19.75%、22.24% 和 19.56%、21.28%、24.49%; 土壤 C/N 的变异性较低, 土壤 C/P 和 N/P 均在大粒径团聚体 (>0.25 mm) 中较高, 土壤 C/N、C/P 和 N/P 对土壤有机碳储量具有良好的指示作用。研究表明, 在杉木与火力楠混交林中, 缺乏磷元素, 建议及时补充 P 元素, 避免土壤持续利用受到磷的限制。

关键词: 杉木人工林; 土壤团聚体; 碳氮磷; 生态化学计量

中图分类号: Q948.11; S152.4⁺9 **文献标志码:** A

Ecological Stoichiometry of Soil Carbon, Nitrogen, and Phosphorus within Soil Aggregates of Four Plantations in Different *Cunninghamia lanceolata* Stand Types

ZHANG Qianchun, WANG Shengqiang, HUANG Yongzhen,
YAO Xianyu, HE Xinxin, YE Shaoming*

(College of Forestry, Guangxi University, Nanning 530004, China)

Abstract: We analyzed soil samples from the plantation of Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Mytilaria laosensis*; *C. lanceolata* and *Michelia macclurei* and pure plantation of *C. lanceolata* in the Experimental Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry. The soil aggregates were classified into >2 mm, $0.25\sim 2$ mm, and <0.25 mm fractions by a dry-sieving procedure. Soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) and total phosphorus (TP) contents, and their stoichiometric ratios were calculated, and to examine the ecological stoichiometric characteristics of C, N and P within soil aggregates. The results showed that the coefficients of variation of SOC, TN and TP were 21.37%, 21.00% and 21.46%, respectively in the $0\sim 10$ cm soil layer and were 20.35%, 16.51% and 17.82%, respectively in the $10\sim 20$ cm soil layer. The spatial variation of TN was lower than that of SOC and TP but there were significant positive correlations among them. SOC and TN were distributed in the micro-aggregates

收稿日期: 2021-03-12; 修改稿收到日期: 2021-06-02

基金项目: 广西科技重大专项 (桂科 AA17204087-8); 国家自然科学基金 (31460196)

作者简介: 张钱春 (1997-), 女, 硕士研究生, 主要从事森林培育研究。E-mail: 1632449330@qq.com

* 通信作者: 叶绍明, 教授, 博士生导师, 主要从事森林可持续经营理论与技术研究。E-mail: yshaoming@163.com

and among of them had the greatest values in the *C. lanceolata* and *M. macclurei* plantation, however, the distribution of TP was relatively uniform among aggregates and ages. The coefficients of variation of C/N, C/P and N/P were 14.09%, 19.75% and 22.24%, respectively in the 0—10 cm soil layer and were 19.56%, 21.28% and 24.49%, respectively in the 10—20 cm soil layer. Variation of C/N was lower than that of C/P and N/P. Averaged C/P and N/P values in the macro-aggregates were higher than that in aggregates of other sizes. C/N, C/P and N/P had good indication for SOC storage. The results showed that there was a lack of phosphorus in the mixed forest of *C. lanceolata* and *M. macclurei*. It was suggested that P should be supplemented in time to avoid the limitation of phosphorus on the sustainable utilization of soil.

Key words: Chinese fir plantation; soil aggregate; carbon, nitrogen, phosphorus; ecological stoichiometry

生态化学计量学是将生态学和化学等基本原理结合在一起,从元素比率角度出发研究生态系统能量平衡以及多重化学元素平衡的学科^[1-2],主要强调碳(C)、氮(N)、磷(P) 3 种主要组成元素之间的关系^[1]。其中,碳是植物积累最主要的元素,氮和磷是植物生长所需的大量元素,也是植物生长的限制性养分^[2]。研究土壤 C、N、P 的化学计量特征,对揭示土壤养分的限制情况以及 C、N、P 循环和平衡机制具有重要意义。目前,国内外对土壤 C、N、P 化学计量特征的研究主要是比较不同纬度、海拔、坡度、土地利用方式间差异^[3-5],且多数研究集中在全土层面,尚未在土壤微域环境中对其进行深入分析。土壤团聚体是土壤结构的基本单元,其结构特征能改变土壤水肥性质和固碳过程,最终影响养分的动态变化^[6]。不同粒径团聚体具有不同维持和供应土壤有机碳和养分的能力^[7-8],进一步研究土壤团聚体 C、N、P 生态化学计量特征对提升土壤肥力和增加土壤碳储量具有重要意义^[9]。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是中国人工林种植的重要速生用材树种,具有经济价值高、生长快、产量高、材质好等特点^[10],但是杉木纯林多代连栽会导致土壤地力衰退、林分结构单一,降低土壤肥力和生态系统稳定性^[11]。研究表明不同杉木林分类型对土壤团聚体有机碳以及氮磷养分变化存在不同程度的影响^[9],C、N、P 及其比例特征在土壤团聚体中的分布间接反映杉木生长状况,但关于杉木纯林及其混交林土壤 C、N、P 生态化学计量特征的研究却鲜见报道。因此,本研究选取中国林业科学研究院热带林业试验中心杉木米老排(*Mytilaria laosensis*)混交林、杉木火力楠(*Michelia macclurei*)混交林以及杉木纯林为研究对象,开展不同杉木林分类型土壤团聚体 C、N、P 在土壤团聚体间的协同趋势及响应特征,旨在揭示不同杉木林分类型土壤质量的演化机制,以期为杉木人工林土壤的综合管理与可持续利用提供科学依据。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

试验地位于广西壮族自治区凭祥市中国林业科学研究院热带林业实验中心大青山实验场(106°41′~106°59′E,21°57′~22°16′N),属南亚热带季风气候区,年平均气温为 20.5~21.7℃,最高气温 40.3℃,最低气温 -1.3℃,每年 10℃以上的积温为 6 000~7 600℃。典型的湿润半湿润气候,光照充足、降水充沛,水热资源丰富,全年日照时长 1 218~1 620 h,年平均降水量 1 200~1 500 mm,地貌类型为低山丘陵,土壤类型为红壤,成土母岩主要为砂岩、花岗岩和石灰岩,研究区域森林植被主要包括杉木、火力楠、米老排、三桠苦(*Evodia lepta*)和黄椿木姜子(*Litsea variabilis*)等。

1.2 样地设置与样品采集

2019 年 6 月,对中国林业科学研究院热带林业实验中心大青山实验场杉木林分进行全面综合考察,在野外调查的基础上,选择成土母质相同、坡向坡度相似、海拔基本一致,具有代表性的杉木-米老排混交林(I)、杉木-火力楠混交林(II)及杉木纯林(III)土壤为采样对象。3 种林分类型林龄均为 27 年,郁闭度 0.85,坡度为 27~32°。各林分均为 1992 年营造,种植株行距为 2 m×3 m,杉木米老排混交林和杉木火力楠混交林比例均为 3:1。

在每个林地内按随机原则设置 5 个 30 m×30 m 的标准样方,每个样方按“S”形设置 5 个采样点。取样时先铲除土壤表层的枯枝落叶,从表层向下按照 0~10 cm 和 10~20 cm 土层采集原状土样,将采集的土壤分层混合一共 10 个土壤,3 个林分共 30 个土样(5 个样方×2 个土层×3 个林分)。将采集好的原状土样装入塑料盒带回风干处理。将每个混合土样沿其自然结理分开,过 5 mm 筛除去小石块和动植物残体等,置于室内阴凉通风处风干。风干后的土样一部分用于测定全土基本理化性质,测定

结果见表 1。一部分用沙维洛夫干筛法^[12]分离出> 2 mm、2~0.25mm 和 <0.25 mm 粒径的团聚体。不同杉木林分类型土壤团聚体组成见表 2。

1.3 测定项目与方法

容重、有机碳(SOC)采用重铬酸钾-外加热,全氮(TN)采用消煮法并使用连续流动分析仪测定,全磷(TP)含量采用高氯酸-硫酸酸溶-钼锑抗比色法测定^[13]。土壤 C/N、C/P、N/P 均为各元素的质量比。各粒径团聚体质量百分含量=各粒径团聚体质量/土壤样品总质量×100%,变异系数=标准差/平均值×100%。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 SPSS 22.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素(one-way ANOVA)和 Duncan 法进行方差分析和多重比较($\alpha=0.05$),用

Pearson 法对不同林分 and 不同粒径 SOC、TN 和 TP 含量的相关性分析。用 SigmaPlot 12.5 和 Excel 2010 制图,图中数据均为平均值±标准差。

2 结果与分析

2.1 土壤团聚体 C、N、P 含量变化特征

2.1.1 土壤团聚体有机碳(SOC)含量分布 由表 3 可知,土壤团聚体 SOC 含量在 0~10 cm 和 10~20 cm 随粒径的减小而升高,平均范围分别为 8.20~17.59 和 7.64~14.15 g·kg⁻¹,不同土层变异系数分别为 21.37%和 20.35%。不同林分类型下,> 2 mm 和 1~0.25 mm 粒径团聚体 SOC 含量表现为林分Ⅱ>Ⅰ>Ⅲ,在<0.25 mm 粒径团聚体表现为林分Ⅱ显著高于林分Ⅰ和Ⅲ,而林分Ⅰ和Ⅲ无显著差异。

表 1 不同林分类型土壤化学特征
Table 1 Soil chemical characteristics in the different stand types

土层 Soil layer /cm	林分类型 Stand type	有机碳 Organic carbon /(g·kg ⁻¹)	全氮 Total nitrogen /(g·kg ⁻¹)	全磷 Total phosphorus /(g·kg ⁻¹)	C/N	C/P	N/P
0~10	I	13.80±0.16B	1.03±0.01B	0.55±0.02A	13.46±0.23A	25.40±1.11AB	1.88±0.05A
	II	15.20±0.11A	1.12±0.01A	0.58±0.04A	13.59±0.15A	26.82±1.64A	1.97±0.11A
	III	10.10±0.12C	0.86±0.03C	0.45±0.01B	11.76±0.14B	22.55±0.85B	1.92±0.08A
10~20	I	9.97±0.06B	0.89±0.02B	0.50±0.01AB	11.17±0.17B	20.08±0.43B	1.80±0.05A
	II	13.07±0.09A	0.97±0.02A	0.52±0.02A	13.48±0.28A	25.46±1.18A	1.89±0.10A
	III	9.44±0.12C	0.81±0.02C	0.45±0.02B	11.71±0.36B	21.20±0.88B	1.82±0.13A

注:Ⅰ.杉木米老排混交林;Ⅱ.杉木火力楠混交林;Ⅲ.杉木纯林;下同。同列大写字母表示同一土层不同林分类型差异显著($P<0.05$)
Note:Ⅰ. Mixed plantation of *Cunninghamia lanceolata* and *Mytilaria laosensis*; Ⅱ. Mixed plantation of *C. lanceolata* and *M. macclurei*; Ⅲ. Pure plantation of *C. lanceolata*; The same as below. The difference of stand types in the same soil layer in the same column capital letters is significant at 0.05 level

表 2 不同杉木林分类型土壤团聚体分布特征
Table 2 Distribution of different soil aggregates in different stand types

土层 Soil layer/cm	林分类型 Stand type	土壤团聚体组成 Composition of soil aggregates/%		
		>2 mm	2~0.25 mm	<0.25 mm
0~10	I	45.01±1.77Ba	31.17±1.52Bb	23.82±1.89Bc
	II	51.94±1.33Aa	33.29±1.95Ab	14.77±2.03Cc
	III	32.36±1.36Ca	31.84±0.89Ca	35.81±2.23Aa
10~20	I	33.09±1.19Bb	27.88±0.86Bc	39.03±1.23Ba
	II	49.18±0.63Aa	31.50±1.50Ab	19.32±1.94Cc
	III	29.73±1.56Bb	24.81±1.28Bb	45.46±1.94Aa

注:同行数据后不同小写字母表示不同粒径团聚体间差异达显著水平($P<0.05$),同列大写字母表示同一土层不同林分类型差异显著($P<0.05$);下同
Note: Different normal letters in each column indicated significant difference among different particle size soil aggregates and there were significant differences among different stand types in the same soil layer at 0.05 level. The same as below

2.1.2 土壤团聚体全氮(TN)含量分布 由表 4 可知,土壤团聚体 TN 含量在不同粒径团聚体和林分类型中的变化与 SOC 含量变化相似,在不同粒径团聚体中,土壤团聚体 TN 含量随粒径的减小而升高,<0.25 mm 粒径 TN 含量最高。在不同林分类型中,TN 含量在林分类型 II 最高,其次是林分类型 I,林分类型 III 最低。其中在 0~10 和 10~20 cm 土层平均值变化范围分别是 0.77~1.31 和 0.67~1.14 g·kg⁻¹,变异系数分别为 21.00%和 16.51%。

2.1.3 土壤团聚体全磷(TP)含量分布 由表 5 可知,土壤团聚体 TP 含量在 0~10 和 10~20 cm 土层平均值变化范围分别是 0.43~0.64 和 0.33~

0.54 g·kg⁻¹,变异系数分别为 21.46%和 17.82%。不同粒径团聚体中,在 0~10 cm 土层,各粒径之间无显著差异,而在 10~20 cm 土层,林分类型 III 中,1~0.25 mm 和<0.25 mm 粒径与>2 mm 粒径团聚体具有显著差异。在不同林分类型下,土壤团聚体 TP 含量林分类型 II 最高,其次是林分类型 I,林分类型 III 最小,其中,在 0~10 cm 土层,>2 mm 和<0.25 mm 粒径中,林分类型 II 显著高于林分类型 III;在 10~20 cm 土层,>2 mm 粒径中,林分类型 II 显著高于林分类型 III。

2.1.4 土壤团聚体 C、N、P 的相关性 由图 1 可知,不同杉木林分各粒径团聚体 C、N、P 存在极显著

表 3 不同杉木林分类型土壤团聚体有机碳(SOC)含量的分布

Table 3 Soil aggregate organic carbon content in different stand types/(g·kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	林分类型 Stand type	土壤团聚体粒径 Particle size of soil aggregates/mm		
		>2	2~0.25	<0.25
0~10	I	12.67±0.12Bc	13.60±0.19Bb	16.23±0.19Ba
	II	14.26±0.12Ac	15.60±0.17Ab	17.59±0.10Aa
	III	8.20±0.13Cc	10.56±0.16Cb	11.40±0.12Ca
10~20	I	8.30±0.09Bc	10.12±0.18Bb	11.30±0.23Ba
	II	12.64±0.15Ab	13.05±0.30Ab	14.15±0.19Aa
	III	7.64±0.15Cc	8.70±0.19Cb	11.05±0.16Ba

表 4 不同杉木林分类型土壤团聚体全氮(TN)含量的分布

Table 4 Soil aggregate total nitrogen content in different stand types/(g·kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	林分类型 Stand type	土壤团聚体粒径 Particle size of soil aggregates/mm		
		>2	2~0.25	<0.25
0~10	I	0.77±0.17Ab	1.08±0.02Aab	1.13±0.02Ba
	II	1.06±0.01Ac	1.13±0.01Ab	1.31±0.03Aa
	III	0.77±0.01Ac	0.86±0.02Bb	0.93±0.01Ca
10~20	I	0.79±0.02Bb	0.88±0.03Bb	1.00±0.05Ba
	II	0.87±0.02Ac	1.01±0.04Ab	1.14±0.04Aa
	III	0.67±0.03Cb	0.82±0.02Ba	0.90±0.03Ba

表 5 不同杉木林分类型土壤团聚体全磷(TP)含量的分布

Table 5 Soil aggregate total phosphorus content in different stand types/(g·kg⁻¹)

土层 Soil layer/cm	林分类型 Stand type	土壤团聚体粒径 Particle size of soil aggregates/mm		
		>2	2~0.25	<0.25
0~10	I	0.51±0.03ABa	0.54±0.06Aa	0.63±0.05Aa
	II	0.56±0.04Aa	0.56±0.04Aa	0.64±0.05Aa
	III	0.43±0.04Ba	0.48±0.04Aa	0.44±0.03Ba
10~20	I	0.46±0.03Aa	0.51±0.03Aa	0.52±0.02Aa
	II	0.51±0.02Aa	0.53±0.03Aa	0.54±0.02Aa
	III	0.33±0.05Bb	0.45±0.01Aa	0.47±0.04Aa

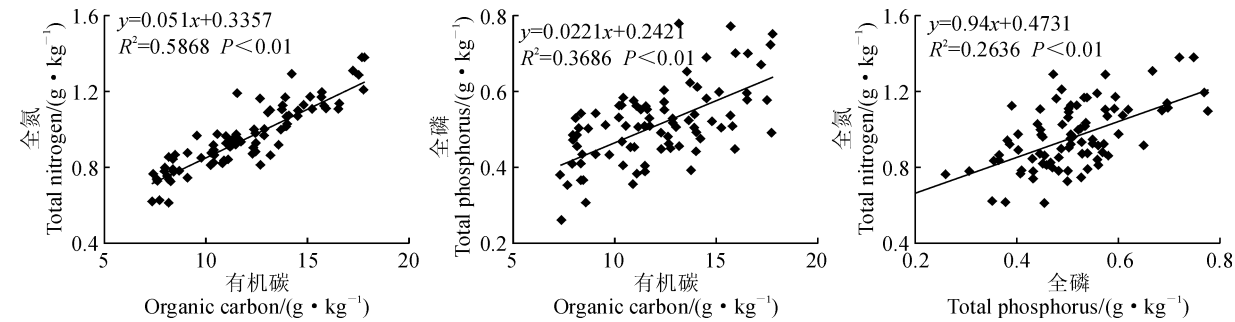


图 1 不同杉木林分类型土壤团聚体 C、N、P 的相关性 (n=90)

Fig. 1 The correlations between C, N, P and each stand types (n=90)

表 6 不同粒径土壤团聚体 C、N、P 相关性分析			
Table 6 The correlations between C, N, P and each aggregate fraction			
粒径 Particle size/mm	C-N	C-P	N-P
>2	0.496 **	0.625 **	0.347
2~0.25	0.871 **	0.336	0.294
<0.25	0.853 **	0.649 **	0.630 **

注: * 相关系数在 0.05 水平显著. ** 相关系数在 0.01 水平上显著 (n=30)

Note: * The significant correlation coefficient at 0.05 level. ** The significant correlation coefficient at 0.01 level (n=30)

的正相关关系 ($P<0.01$), 其中 C 和 N 之间呈线性相关, 变化规律相似. C 和 P 及 N 和 P 之间的线性拟合程度较低. P 含量的变化滞后于 C 和 N. 由表 6 可知不同团聚体粒径中 C 和 N 存在极显著的正相关关系 ($P<0.01$); P 与 C 在 >2 mm 和 <0.25 mm 粒径的相关性极显著; P 与 N 在 <0.25 mm 粒径的相关性极显著.

2.2 土壤团聚体 C、N、P 生态化学计量特征

2.2.1 C/N 由图 2 所示, 土壤团聚体 C/N 在 0~10 和 10~20 cm 土层平均值变化范围分别是 10.61~14.36 和 10.59~14.50, 变异系数分别为 9.32% 和 12.85%. 不同林分类型在 0~10 cm 土层中 C/N 比值为林分类型 II 最高, 其次是林分类型 I, 林分类型 III 最小, 且林分类型 II 与 III 差异显著 ($P<0.05$). 同时, 10~20 cm 土层 C/N 比值变化规律与 0~10 cm 相似.

2.2.2 C/P 由图 3 所示, 土壤团聚体 C/P 在 0~10 和 10~20 cm 土层平均值变化范围分别是 20.04~28.73 和 18.22~26.53, 变异系数分别为 19.75% 和 21.28%. 土壤 C/P 在不同粒径之间无显著差异 ($P>0.05$), 在不同林分类型中, C/P 为林

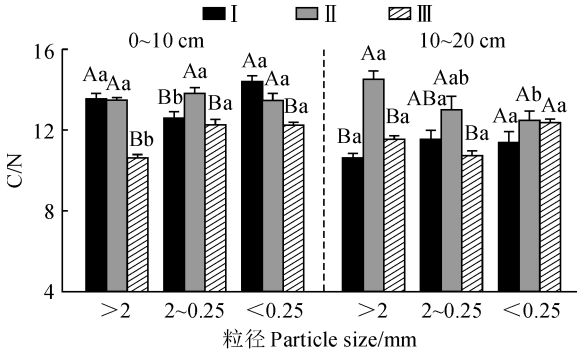


图 2 不同杉木林分类型土壤团聚体中 C/N 的分布

Fig. 2 Distribution of C/N ratios in different stand types

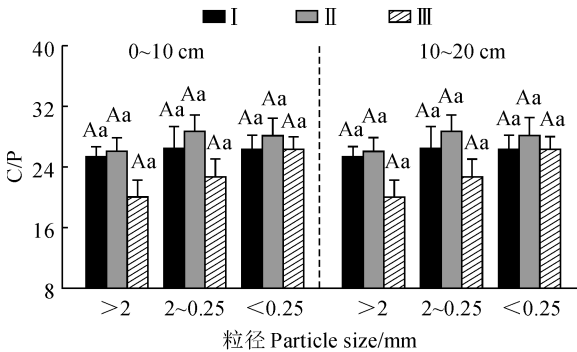


图 3 不同杉木林分类型土壤团聚体中 C/P 的分布

Fig. 3 Distribution of C/P ratios in different stand types

分类型 II 最高, 其次是林分类型 I, 林分类型 III 最小, 各林分之间无显著差异.

2.2.3 N/P 由图 4 所示, 土壤团聚体 N/P 在 0~10 和 10~20 cm 土层平均值变化范围分别是 1.55~2.16 和 1.73~2.35, 变异系数分别为 22.24% 和 24.49%. 0~10 cm 土层, N/P 在林分间和粒径间均无显著差异 ($P>0.05$). 10~20 cm 土层, 在不同林分类型下, N/P 表现为林分类型 II 最高, 其次是林分类型 I, 林分类型 III 最小. 其中, <0.25 mm 粒径中, 林分类型 II 显著高于林分类型 III, 而各粒径团聚体间差异不显著 ($P>0.05$).

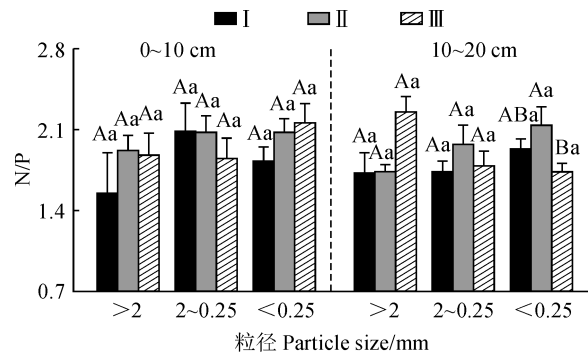


图4 不同杉木林分类型土壤团聚体中 N/P 的分布
Fig.4 Distribution of N/P ratios in different stand types

3 讨 论

3.1 土壤团聚体 C、N、P 含量变化特征

不同林分因树种组成不同,凋落物数量、质量及其分解速率不同,导致营养元素向土壤分解的养分含量不同,对土壤碳库的影响也不同^[2]。研究表明针阔混交凋落物归还量显著高于针叶纯林,且不同树种凋落物分解速率存在明显差异,凋落物高归还量的针阔混交林土壤 C 和 N 含量高于针叶纯林^[2, 14-15],本试验研究结果与其高度一致,即杉木与火力楠混交土壤碳氮含量高于杉木纯林。同时,团聚体 C、N 受土壤层次的影响,土壤表层凋落物产量大通常集中在土壤表层,有利于土壤 C、N 的积累和转移,其含量均表现出土壤上层(0~10 cm)高于下层(10~20 cm),这与前人研究结果^[14, 16]一致。此外,值得注意的是,在不同杉木林分类型中,土壤团聚体 C、N 含量均随着粒径的减小呈递增趋势变化,其中有机碳和全氮的含量在< 0.25 mm 粒径团聚体中显著高于> 0.25 mm 粒径团聚体,这是因为土壤团聚体对养分的吸附能力与团聚体中含量呈正比。同时,黏粒矿物多包含于小粒径团聚体中,促使土壤养分被这些黏粒矿物吸附,从而向小粒径团聚体积累^[17]。磷分布较为均一,这可能是由于土壤磷的来源相对较为固定,因为磷含量受林下植被、土壤形成、耕作和施肥管理等影响^[18],且亚热带地区呈现普遍缺磷现象,易与土壤中铁铝结合而不被植物利用,通常在同一区域磷含量基本一致^[19]。因此,本研究中不同杉木林分类型和不同粒径团聚体中土壤磷素分布较为均一。然而,由于磷是细粒土壤有机质形成的重要因素,后期仍需进一步研究磷在土壤中的动态机制^[20]。

本研究中,土壤 C、N 之间存在显著耦合关系,土壤 TN 的分布情况与有机碳具有一致性,且两者

相关性达极显著水平($P < 0.01$),这是由于土壤 TN 主要来源于植物残体分解与合成所形成的有机质。< 0.25 mm 粒径团聚体 TN 含量较高,这不仅受到土壤 SOC 含量的影响,也与小粒径团聚体对 NH_4^+ 的吸附能力较强有关^[21]。而不同林分类型土壤团聚体 TP 的变异性小于 SOC 和 TN,主要由于土壤磷素是一种沉积性矿物,在土壤中的迁移率很低,但其与有机碳和全氮含量依然存在极显著的相关关系($P < 0.01$)。

3.2 土壤团聚体 C、N、P 生态化学计量特征

土壤 C/N、C/P 和 N/P 是有机质或其他成分中 C、N、P 总质量的比值,是土壤有机质组成和质量的重要指标之一,直接反映土壤养分的限制情况以及土壤内部碳氮磷循环特征^[22]。土壤 C/N 常被用来衡量有机质的分解速率以及土壤氮素的矿化能力^[23]。本试验结果表明,3 种杉木人工林土壤 C/N 的平均值分别为杉木火力楠混交林>杉木米老排混交林>杉木纯林,均高于中国 C/N 的平均值(10.1~12.1)^[22],这可能是因为凋落物质量不同,致使分解速率产生差异。以往的研究发现,凋落物分解速率与凋落物初始营养元素 N、P 含量呈正相关^[24]。本研究区域中,杉木-火力楠 N、P 相对含量最高,可能是火力楠凋落物分解速率更快。

土壤 C/P 和 N/P 的空间变异性较 C/N 大,这主要是由于 C、P 与 N、P 的空间分布不尽一致,这与王维奇等^[25]的研究结果相似。杉木混交林土壤各粒径团聚体中 C/P 和 N/P 均高于杉木纯林,原因在于营造混交林使土壤以及各粒径团聚体中有机碳和氮素含量均有不同程度的升高,同时磷的来源相对固定,从而混交林的 C/P 和 N/P 相对较高。此外,植被类型和微生物对 N、P 元素的同化吸收利用具有不稳定性^[26],因而可增强土壤团聚体 C/P 和 N/P 的变异程度。

土壤中的 N、P 是植物生长所必需的矿质营养元素和生态系统中最常见的限制性元素^[27],土壤 N/P 可以作为养分限制类型的有效预测指标^[28]。从各粒径团聚体上看,0~10 cm 和 10~20 cm 土层不同杉木林分类型中土壤 N/P 总体在>0.25 mm 粒径团聚体中较大,表明大团聚体中限制类型以 P 为主;从不同杉木林分类型看,0~10 cm 和 10~20 cm 土层各粒径土壤 N/P 在杉木火力楠混交林中最大,表明磷的限制性最大。此外,土壤 C、N、P 元素的输入量和需求量之间的平衡及其有效性决定了生态系统碳循环和碳固定效率^[22, 27]。因此,本研究结

合前期在该区计算的碳储量数据^[9], 将其与土壤 C/N、C/P 和 N/P 进行比较。结果显示, 土壤 C/N、C/P 和 N/P 对土壤碳储量具有良好的指示作用, 这与人研究结果一致^[23]。因此在该研究区也可用 C/N、C/P 和 N/P 间接表征杉木人工林土壤固碳效应。结果表明, 不同林分类型土壤的 C/N、C/P 和 N/P 均低于全球平均值 14.5%、21.7% 和 14.6%^[29-30], 这表明亚热带的土壤环境可能受到 N、P 的限制和 C 的积累率低^[31]

4 结 论

本研究发现, 杉木与火力楠和米老排混交后, 土壤团聚体中 SOC 和 TN 含量显著增加, 促进了有机质的恢复和团聚体的形成, 提高了团聚体的稳定性。不同杉木林分类型土壤<0.25 mm 粒径团聚体含

量高于>0.25 mm 粒径,<0.25 mm 粒径团聚体 SOC 和 TN 含量最高, 不同杉木林分类型 SOC、TN 和 TP 含量均为 0~10 cm 土层高于 10~20 cm 土层; SOC 和 TN 主要分布于<0.25 mm 粒径团聚体中, 土壤 TP 含量在各粒径团聚体中分布较为均匀, 其中 SOC 和 TN 含量为杉木-火力楠>杉木-米老排>杉木纯林。说明选择火力楠与杉木混交有利于土壤 SOC、TN、TP 的积累, 但不同粒径团聚体对 C、N、P 的保持能力存在差异。此外, 不同杉木林分类型土壤各粒径团聚体 SOC、TN、TP 含量间呈极显著相关。0~10 cm 和 10~20 cm 土层 C/N 在各粒径团聚体中的变化相对较小, C/P 和 N/P 的变异性则相对较大。土壤 C/P 和 N/P 均在大粒径中较高, 且杉木火力楠混交林值最大, 建议在杉木火力楠混交林中配施磷肥, 避免土壤持续利用受到磷的限制。

参考文献:

[1] 李 玮, 郑子成, 李廷轩. 不同植茶年限土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用生态学报, 2015, **26**(1): 9-16.
LI W, ZHENG Z C, LI T X. Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen and phosphorus within soil aggregates in tea plantations with different ages[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2015, **26**(1): 9-16.

[2] 家 伟, 聂富育, 杨万勤, 等. 四川盆地西缘 4 种人工林土壤团聚体碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 应用与环境生物学报, 2018, **24**(1): 112-118.
JIA W, NIE F Y, YANG W Q, *et al.* Ecological stoichiometry of soil carbon, nitrogen, and phosphorus within soil aggregates of four plantations in the western edge of Sichuan Basin [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2018, **24**(1): 112-118.

[3] ZHU G Y, DENG L, SHANGGUAN Z P. Effects of soil aggregate stability on soil N following land use changes under erodible environment[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 262: 18-28.

[4] 洪江涛, 吴建波, 王小丹. 全球气候变化对陆地植物碳氮磷生态化学计量学特征的影响[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(9): 2 658-2 665.
HONG J T, WU J B, WANG X D. Effects of global climate change on the C, N, and P stoichiometry of terrestrial plants[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, **24**(9): 2 658-2 665.

[5] 范少辉, 申景昕, 刘广路, 等. 毛竹向杉木林扩展对土壤养分含量及计量比的影响[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(8): 1 455-1 462.
FAN S H, SHEN J X, LIU G L, *et al.* Soil nutrients and ecological stoichiometry characteristics after *Phyllostachys edulis* expansion to *Cunninghamia lanceolata* forest[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(8): 1 455-1 462.

[6] XU C Y, PU L J, LI J G, *et al.* Effect of reclamation on C, N, and P stoichiometry in soil and soil aggregates of a coastal wetland in Eastern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(3): 1 215-1 225.

[7] 田 甜, 白彦锋, 张旭东, 等. 杉木人工林地力衰退的原因及对策研究[J]. 林业科技通讯, 2019, (4): 6-10.
TIAN T, BAI Y F, ZHANG X D, *et al.* The reason and countermeasure of the soil degradation of Chinese fir plantation [J]. *Forest Science and Technology*, 2019, (4): 6-10.

[8] 王 涛, 万晓华, 王 磊, 等. 杉木采伐迹地营造阔叶树对不同层次土壤磷组分和有效性的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(4): 1 088-1 096.
WANG T, WAN X H, WANG L, *et al.* Effects of broad-leaved tree plantation on soil phosphorus fractions and availability in different soil layers in a logged *Cunninghamia lanceolata* woodland [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(4): 1 088-1 096.

[9] 黄永珍, 王晟强, 叶绍明. 杉木林分类型对表层土壤团聚体有机碳及养分变化的影响[J]. 应用生态学报, 2020, **31**(9): 2 857-2 865.
HUANG Y Z, WANG S Q, YE S M. Effects of *Cunninghamia lanceolata* stand types on the changes of aggregate-related organic carbon and nutrients in surface soil[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, **31**(9): 2 857-2 865.

[10] 李 宪, 廖良宁, 杨海鹏, 等. 杉木与米老排人工混交林群落木本植物空间格局研究[J]. 西北植物学报, 2019, **39**(10): 1 842-1 850.
LI X, LIAO L N, YANG H P, *et al.* Spatial pattern of woody plants in artificial mixed forest of *Cunninghamia lanceolata* and *Mytilaria laosensis* [J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2019, **39**(10): 1 842-1 850.

[11] 汪思龙, 廖利平, 邓仕坚, 等. 杉楠混交与人工杉木林自养机制的恢复[J]. 应用生态学报, 2000, **11**(1): 34-37.

WANG S L, LIAO L P, DENG S J, *et al.* Mixing of *Cunninghamia lanceolata* with *Michelia macclurei* and restoration of self sustaining mechanism in *G. lanceolata* plantation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, **11**(1): 34-37.

[12] SINGH R A. Soil Physical Analysis[M]. New Delhi-Ludhiana; Kalyani Publishers, 1980: 52-56.

[13] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.

[14] 喻林华, 方 晰, 项文化, 等. 亚热带 4 种林分类型枯落物层和土壤层的碳氮磷化学计量特征[J]. 林业科学, 2016, **52**(10): 10-21.

YU L H, FANG X, XIANG W H, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus in litter and soil of four types of subtropical stand[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2016, **52**(10): 10-21.

[15] 齐 瑞, 刘锦乾, 李 波, 等. 青藏高原东缘亚高山针叶林碳氮磷生态化学计量特征[J]. 西北植物学报, 2020, **40**(12): 2 140-2 147.

QI R, LIU J Q, LI B, *et al.* Stoichiometry of carbon, nitrogen, and phosphorus of subalpine coniferous forests on the eastern edge of Qinghai-Tibet plateau[J]. *Acta Botanica Borreali-Occidentalia Sinica*, 2020, **40**(12): 2 140-2 147.

[16] BANDYOPADHYAY P K, SAHA S, MANI P K, *et al.* Effect of organic inputs on aggregate associated organic carbon concentration under long-term rice-wheat cropping system[J]. *Geoderma*, 2010, **154**(3-4): 379-386.

[17] ZHENG Z C, HE S Q, LI T X, *et al.* Effect of land use patterns on stability and distributions of organic carbon in the hilly region of Western Sichuan, China[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2011, **10**(61): 13 107-13 114.

[18] ADESODUN J K, ADEYEMI E F, OYEGOKE C O. Distribution of nutrient elements within water-stable aggregates of two tropical agro-ecological soils under different land uses [J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, **92**(1-2): 190-197.

[19] 谢路路, 胡雪凤, 刘庆华, 等. 云杉碳氮化学计量比对土壤水分和氮有效性的响应[J]. 生态学报, 2020, **40**(15): 5 377-5 387.

XIE L L, HU X F, LIU Q H, *et al.* Response of C : N stoichiometry of *Picea asperata* to soil water and nitrogen availabilities [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, **40**(15): 5 377-5 387.

[20] WRIGHT S J, TURNER B L, YAVITT J B, *et al.* Plant responses to fertilization experiments in lowland, species-rich, tropical forests[J]. *Ecology*, 2018, **99**(5): 1 129-1 138.

[21] KIRKBY C A, RICHARDSON A E, WADE L J, *et al.* Accurate measurement of resistant soil organic matter and its stoichiometry[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, **67**(5): 695-705.

[22] 郑子成, 何淑勤, 王永东, 等. 不同土地利用方式下土壤团聚体中养分的分布特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 170-174.

ZHENG Z C, HE S Q, WANG Y D, *et al.* Distribution feature of soil nutrients in aggregate under different land use[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(3): 170-174.

[23] 王绍强, 于贵瑞. 生态系统碳氮磷元素的生态化学计量学特征[J]. 生态学报, 2008, **28**(8): 3 937-3 947.

WANG S Q, YU G R. Ecological stoichiometry characteristics of ecosystem carbon, nitrogen and phosphorus elements [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, **28**(8): 3 937-3 947.

[24] 李占斌, 周 波, 马田田, 等. 黄土丘陵区生态治理对土壤碳氮磷及其化学计量特征的影响[J]. 水土保持学报, 2017, **31**(6): 312-318.

LI Z B, ZHOU B, MA T T, *et al.* Effects of ecological management on characteristics of soil carbon, nitrogen, phosphorus and their stoichiometry in loess hilly region, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, **31**(6): 312-318.

[25] 王维奇, 全 川, 贾瑞霞, 等. 不同淹水频率下湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征[J]. 水土保持学报, 2010, **24**(3): 238-242.

WANG W Q, TONG C, JIA R X, *et al.* Ecological stoichiometry characteristics of wetland soil carbon, nitrogen and phosphorus in different water-flooded frequency[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2010, **24**(3): 238-242.

[26] 王传杰, 王齐齐, 徐 虎, 等. 长期施肥下农田土壤-有机质-微生物的碳氮磷化学计量学特征[J]. 生态学报, 2018, **38**(11): 3 848-3 858.

WANG C J, WANG Q Q, XU H, *et al.* Carbon, nitrogen, and phosphorus stoichiometry characteristics of bulk soil, organic matter, and soil microbial biomass under long-term fertilization in cropland[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, **38**(11): 3 848-3 858.

[27] 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): 1 628-1 637.

CHENG B, ZHAO Y J, ZHANG W G, *et al.* The research advances and prospect of ecological stoichiometry[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, **30**(6): 1 628-1 637.

[28] 陈印平, 潘开文, 吴 宁, 等. 凋落物质量和分解对中亚热带栲木荷林土壤氮矿化的影响[J]. 应用与环境生物学报, 2005, **11**(2): 146-151.

CHEN Y P, PAN K W, WU N, *et al.* Effect of litter quality and decomposition on nmineralization in soil of *Castanopsis platyacantha*-*Schima sinensis* forest[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2005, **11**(2): 146-151.

[29] GUO Y P, JIANG M W, LIU Q, *et al.* Climate and vegetation together control the vertical distribution of soil carbon, nitrogen and phosphorus in shrublands in China[J]. *Plant and Soil*, 2020, **456**(1-2): 15-26.

[30] GUO X, JIANG Y F. Spatial characteristics of ecological stoichiometry and their driving factors in farmland soils in Poyang Lake Plain, Southeast China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2019, **19**(1): 263-274.

[31] ZHANG C, LIU G B, XUE S, *et al.* Soil organic carbon and total nitrogen storage as affected by land use in a small watershed of the Loess Plateau, China[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2013, **54**: 16-24.

(编辑:潘新社)