

DOI: 10.5846/stxb201801050030

张芸, 李惠通, 张辉, 黄彬彬, 刘春华, 蒋宗垚, 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): - .

Zhang Y, Li H T, Zhang H, Huang B B, Liu C H, Jiang Z K, Ma X Q. Soil C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(7): - .

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

张 芸¹, 李惠通^{1,2}, 张 辉¹, 黄彬彬¹, 刘春华³, 蒋宗垚³, 马祥庆^{1,*}

1 福建农林大学林学院, 福州 350002

2 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

3 福建农林大学莘口教学林场, 三明 36500

摘要:为了阐明林龄对杉木人工林土壤理化性质及碳氮磷(C:N:P)生态化学计量特征的影响,在福建农林大学三明莘口林场选取 4 个林龄(4, 20, 24, 33a)的杉木人工林为研究对象,测定 0—20, 20—40, 40—60 cm 深度土壤的水分-物理性质、pH、总碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK),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,为杉木人工林持续经营管理提供科学依据。结果表明:(1)随着林龄的增加,质量含水量、田间持水量和毛管孔隙度先减小后增加,在 20 a 达到最小,TN 和 TP 也有相似的变化趋势,但在 24 a 林分的深层土壤达到最小,TC 和 TK 保持不变;(2)随着林龄的增加,C:N 保持不变,C:P 和 N:P 在 24 a 成熟林达到最大,但只在 20—60 cm 达到显著差异;(3)TC 与多数水分-物理性质及 3 个生态化学计量比显著相关,质量含水量和孔隙度与 C:N:P 生态化学计量比均显著相关,TP 与 C:P 和 N:P 显著负相关。土壤物理性质与土壤养分循环存在一定关联,有机质与土壤结构及养分平衡的调节有关,研究区杉木林发育过程中土壤腐殖质化进程较缓慢,24 a 成熟林杉木的生长受到土壤磷的限制,在杉木速生阶段适当增施磷肥,保证林木的良好生长,促进土壤与植物的良性养分循环。
关键词:杉木;发育阶段;养分循环;养分限制

Soil C:N:P stoichiometry and its relationship with the soil physicochemical properties of different aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations

ZHANG Yun¹, LI Huitong^{1,2}, ZHANG Hui¹, HUANG Binbin¹, LIU Chunhua³, JIANG Zongkai³, MA Xiangqing^{1,*}

1 College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China

2 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

3 Xinkou Experimental Forest Farm, Fujian Agriculture and Forestry University, Sanming 365000, China

Abstract: To investigate the effect of stand age on soil physicochemical properties and C:N:P stoichiometry in *Cunninghamia lanceolata* plantations, an age sequence of *Cunninghamia lanceolata* stands (4 years old, 20 years old, 24 years old, and 33 years old) were selected in the Xinkou Experimental Forestry Centre of Fujian Agricultural and Forestry University, SanMing, Fujian. Soil water content, porosity, pH, total carbon (TC), total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), total potassium (TK), and soil C:N:P stoichiometry at soil depths of 0—20, 20—40, 40—60 cm were measured

基金项目:国家重点研发计划(2016YFD0600301);福建农林大学科技创新专项基金项目(CXZX2016059);福建农林大学林学院林学高峰学科建设经费

收稿日期:2018-01-05; **网络出版日期:**2018-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: lxxmxq@126.com

during stand development. The results showed that the soil gravimetric water content, water field capacity, and capillary porosity were lowest at 20 years old, and then increased thereafter. There was a similar trend in changes of TN and TP, which had the lowest values in deep soil of the 24 year old stand. Stand age did not significantly affect TC, TK, or C:N. C:P and N:P were higher in the 24 year old mature stand; however, significant differences were only detected at soil depths of 20—60 cm. The majority of soil physicochemical variables showed significantly correlations with TC. Gravimetric water content and capillary porosity showed significant correlations with C:N, C:P, and N:P. TP correlated negatively with C:P and N:P, indicating a firm linkage between soil physical properties and nutrient cycling in Chinese fir plantations. The regulation of soil structure and nutrient balance may be influenced by soil organic matter. Humification in our study area was slow during the development of *Cunninghamia lanceolata* plantations. The growth of the 24-year-old mature stand was limited by soil phosphorus. Therefore, P fertilization during the rapid growth period of *Cunninghamia lanceolata* may be important to sustain the growth of *Cunninghamia lanceolata* and to improve nutrient cycling between plant and soil.

Key Words: Chinese fir; development stage; nutrients cycling; nutrients limitation

生态系统及其各组分多个元素存在着一定的化学计量关系,这种化学计量关系具有内稳性,维持了个体生长甚至生态系统结构、功能及稳定性^[1-2]。碳、氮、磷(C, N, P)是土壤主要的养分成分,其相对组成影响了有机质分解、微生物种群动态、根系养分吸收等一系列生物化学进程,并进一步影响土壤C, N, P循环对全球变化的响应与反馈^[3]。土壤C:N:P计量比反应土壤肥力,指示植物营养状况,元素之间的耦合变化影响了植被的生长和分布^[4],但土壤在时空上具有高度异质性,土壤元素化学计量比受到土壤类型、植被群落特征、气候条件、植被发育阶段等因素地强烈影响^[5-6]。

在人工林生态系统中,林龄通过改变林分结构、物质组成和林内微气候影响土壤养分分配格局^[7],任璐璐等^[8]研究黄土高原刺槐林土壤C:N, C:P和N:P随着栽植年限的增加而增加,栽植刺槐具有显著的固磷能力,油松林土壤C:N和N:P随着的发育先增加后减小^[9],梭梭林的建立不改变土壤C:N,但C:P和N:P随林龄的增加明显增加,可能受到磷的限制^[6],胡启武等^[10]发现林龄对鄱阳湖沙山湿地松土壤C:N, C:P和N:P无显著影响。不同地区不同人工林生态系统养分循环特征表现出显著的差异性,这种差异来源于区域气候、植被生物学特性和人工林经营方式^[3,11],生态化学计量比研究为人工林经营过程中养分限制或养分循环提供重要的指示作用,在特定地区和植被条件开展土壤生态化学计量比研究显得尤为重要。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是我国乡土针叶用材树种,栽培历史悠久,全国杉木人工林面积达到 $8.54 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全国人工林面积的21.35%^[12],随着栽植面积的不断扩大、纯林连栽,以及不合理的营林措施,出现了土壤地力衰退、初级生产力下降等严峻问题,尽管国内学者对此已做了大量的工作,目前仍尚未弄清杉木人工林地力衰退的内在机制,从生态化学计量角度研究不同发育阶段杉木人工林土壤养分循环障碍,可为杉木人工林可持续发展提供新思路。目前杉木人工林生态化学计量比研究集中在氮沉降与土壤化学计量比^[13]、杉木器官的季节动态^[14]、不同杉木发育阶段凋落物化学计量比的变化^[15]以及施肥对杉木林下植被化学计量比的影响^[16],不同林龄杉木人工林土壤生态化学计量比的研究报道还不多^[17],尤其是土壤养分计量比特征与土壤理化性质及杉木生长量的关系尚不明确。有鉴于此,本文选择以4个林龄(4 a, 20 a, 24 a, 33 a)的杉木人工林为研究对象,分析杉木人工林土壤理化性质与C:N:P生态计量比随林龄变化及其之间相关关系,研究土壤C:N:P化学计量比对杉木的指标作用,本研究的开展可了解不同发育阶段杉木林的土壤养分限制状况,对综合评价杉木人工林养分循环速率和林木养分利用效率具有参考价值,也为退化土壤生态系统恢复和人工林持续经营管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地位于福建省三明市莘口镇的福建农林大学莘口教学林场(26°10' N, 117°27' E),为亚热带季风气

候,年平均气温 19.1℃,年平均降雨量 1749 mm。

2016 年在福建农林大学莘口教学林场沙阳工区选择 4 个不同林龄的杉木人工林为研究对象,造林时间分别为 2012 年(4 a)、1996 年(20 a)、1992 年(24 a)和 1983 年(33 a),所有林分均为二代杉木人工林,根据杉木生长规律和林分发育特点,这 4 个林分分别处于幼龄林、近熟林、成熟林和过熟林的典型发育阶段^[18]。4 个林分最大直线距离不超过 2.3 km,土壤均为粗粒花岗岩发育的砂质红壤,土层厚度 1 m 以上。

不同林龄的杉木人工林具有一致的土地利用历史,造林前采用炼山整地造林,造林后 3 年每年除草抚育 2 次,除了 4 a 杉木林,20 a、24 a 和 33 a 杉木林均间伐过一次。每个林龄设置 3 个 20 m×20 m 标准(上坡设置 2 个样地,下坡设置 1 个样地),共设 12 个样地。

林下植物群落结构简单,主要优势种为山苍子(*Litsea cubeba* (Lour.) Pers.)、乌毛蕨(*Lechnum orientale* L.)、地苣(*Melastoma dodecandrum* Lour.)、枇杷叶紫珠(*Callicarpa kochiana* Makino)等。

表 1 样地基本概况
Table 1 Basic situation of plots

林龄 Stand age	样地号 Plot No.	海拔 Altitude/m	坡向 Slope aspect	坡度 Slope/(°)	坡位 Slope position	平均胸径 DBH/cm	平均树高 Height/m	林分密度 Density/ (株/hm ²)
4a	1	319	南偏东 40	30	下	5.90	5.22	1732
	2	324	南偏东 30	33	上	5.83	5.15	1729
	3	335	正东	25	上	5.99	5.30	1683
20a	1	192	南偏东 10	28	下	17.29	15.87	1091
	2	202	南偏东 30	28	上	15.64	14.64	1218
	3	205	南偏东 25	25	上	17.47	16.46	1274
24a	1	221	正西	31	上	16.97	15.96	1137
	2	233	北偏西 10	32	上	17.30	16.30	1120
	3	199	北偏西 20	29	下	17.91	16.90	1086
33a	1	202	西偏南 25	33	下	19.88	18.86	1000
	2	209	正西	30	上	19.52	18.51	1088
	3	213	西偏南 10	28	上	18.51	17.50	1125

1.2 样品采集及处理

在每个林龄的杉木林样地内按 S 形挖取 3 个土壤剖面,为防止边缘效应的影响,取样剖面距离样方边缘至少 4 m,不同林龄杉木人工林共挖取 36 个土壤剖面。分别按 0—20、20—40、40—60 cm 土层取 1 kg 左右土样,同一样地 3 个剖面相同层次的土样混合均匀,取混合均匀的土壤 1 kg 风干,挑去石砾和植物残体,过 2 mm 土壤筛装入自封袋保存,四分法取部分风干土样研磨过 0.149 mm 筛;同时在样地的中间剖面按 0—20、20—40、40—60 cm 土层用环刀(200 cm³)取原状土,测定土壤水分物理性质。

1.3 土壤理化性质的测定

测定土壤总碳(TC)、全氮(TN)、全磷(TP)和全钾(TK),TC 和 TN 直接用元素分析仪(德国 Elementar 公司,VARIO MAX CN)测定,土壤样品加入 2.0 mol/L HCl 处理后加入过量 NaOH,用标定的 HCl 滴定^[19],发现土样无无机碳的存在,可以认定土样中 TC 含量等于有机碳。钼锑抗比色法^[19]测定 TP 含量,TK 采用火焰光度法^[19]测定。pH 值采用电位法(土:水=1:2.5)测定,采用环刀法测定土壤的水分-物理性质^[19],即质量含水量、田间持水量、容重和毛管孔隙度。

1.4 数据分析

利用 SPSS 软件分析林龄或土层深度对杉木人工林土壤理化性质和化学计量比的影响(One-way ANOVA),并采用 Tukey 多重比较分析不同林龄或不同土层深度之间的差异。采用一般线性模型(GLM)分析林龄和土层深度及其交互作用对土壤理化性质和化学计量比的影响(Two-way ANOVA)。利用杉木通用立木

生物量模型估算不同发育阶段杉木地上部分生物量^[20],运用线性回归拟合分析土壤 C:N:P 化学计量比与杉木生长(杉木地上生物量和 DBH 年生长量)的关系。采用 Pearson Correlation 分析化学计量比与土壤水分-物理性质、pH、TC、TN、TP、TK 的相关性,所有统计分析均采用 IBM SPSS 22.0 完成。运用 Excel 和 Origin Pro 2015 处理图表。

2 结果与分析

2.1 不同林龄杉木人工林土壤理化性质的比较

林龄对杉木人工林土壤容重、质量含水量、田间持水量、毛管孔隙度及 pH 值均有显著影响(表 2),从图 1 可以看出随着林分发育,土壤容重在 20 年达到最大,随后降低。质量含水量和田间持水量在 20 a 杉木林最小,在 20—40 cm 土层与其他林分具有显著差异。不同林龄 0—20 cm 层田间持水量、毛管孔隙度和 pH 无明显差异,而在 20 cm 以下土层,田间持水量和毛管孔隙度以 20 a 和 33 a 最小,pH 值在 24 a 和 33 a 杉木林最低,表明林龄对土壤含水量、孔隙度和 pH 值的影响在深层土壤更为深刻。

表 2 林龄和土层深度对杉木人工林土壤理化性质及 C:N:P 化学计量比的影响

Table 2 Effects of stand age and soil depth on soil physico-chemical properties and C:N:P stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* plantations

因素 Factors	F 值 F value											
	土壤容重 Soil bulk density	质量含水量 Gravimetric water content	田间 持水量 Field capacity	毛管孔隙 Capillary porosity	pH	TC: 总碳 Total carbon	TN: 全氮 Total nitrogen	TP: 全磷 Total phosphorus	TK: 全钾 Total potassium	C:N	C:P	N:P
林龄 Stand age	16.306 ***	11.581 ***	14.646 ***	10.506 ***	17.838 ***	0.449	4.521 *	12.587 ***	8.674 ***	2.885	13.444 ***	23.626 ***
土层深度 Soil depth	6.185 **	6.324 **	7.003 **	2.667	4.926 *	45.706 ***	39.704 ***	9.205 **	0.376	26.918 ***	11.387 ***	2.747
林龄×土层深度 Stand age × Soil depth	0.414	0.343	0.269	0.921	0.762	0.567	0.407	1.056	0.131	0.632	1.216	1.708

*表示 $P<0.05$ 的显著性;**表示 $P<0.01$ 的显著水平;***表示 $P<0.001$ 的显著水平

土壤容重、质量含水量和田间持水量均受到土层深度的影响(表 2),大体表现为随着土层加深容重增加,质量含水量、田间持水量和毛管孔隙度下降(图 1)。

林龄对 TC 含量没有显著影响,对 TN、TP 和 TK 含量有显著影响(表 2),通过对同一土层不同林龄的 TN、TP 和 TK 含量进行单因素方差分析发现,不同林龄 0—40 cm 表层土 TN 和 TK 没有显著差异,4 a 的杉木幼林 40—60 cm TN 和 TK 含量低于其他林分,24 a 杉木成熟林的 TP 含量在 20—60 cm 土层显著低于其他 3 个林龄。

TC 和 TN 含量随着土层加深明显下降,4 个林龄 TP 含量在 0—20、20—40 cm 和 40—60 cm 的平均值分别为 0.41、0.31、0.29 mg/kg,也表现为随着土层的增加而减少,TK 在不同土层深度无差异(图 2)。

2.2 不同林龄杉木人工林土壤 C:N:P 生态计量比的比较

由于不同龄组土壤 TC 和 TN 的变化不大,导致 3 个土层的林龄间 C:N 差异不显著,C:P 与 N:P 主要受到 TP 含量变化的影响,24 a 杉木土壤 TP 含量低使 C:P 和 N:P 整体上高于其他 3 个林分,但不同林龄 C:P 统计上的差异只体现在 20—40 cm。

C:N 随着土层加深明显下降,C:P 也大致表现为随着土层的加深而下降,不同土层 N:P 不存在显著差异(表 2)。

2.3 杉木人工林土壤 C:N:P 生态计量比与杉木生长及土壤理化性质的相关性

杉木地上生物量随着林龄的增加而增加,4 a、20 a、24 a 和 33 a 杉木的胸径年增加量分别为 1.48、0.84、

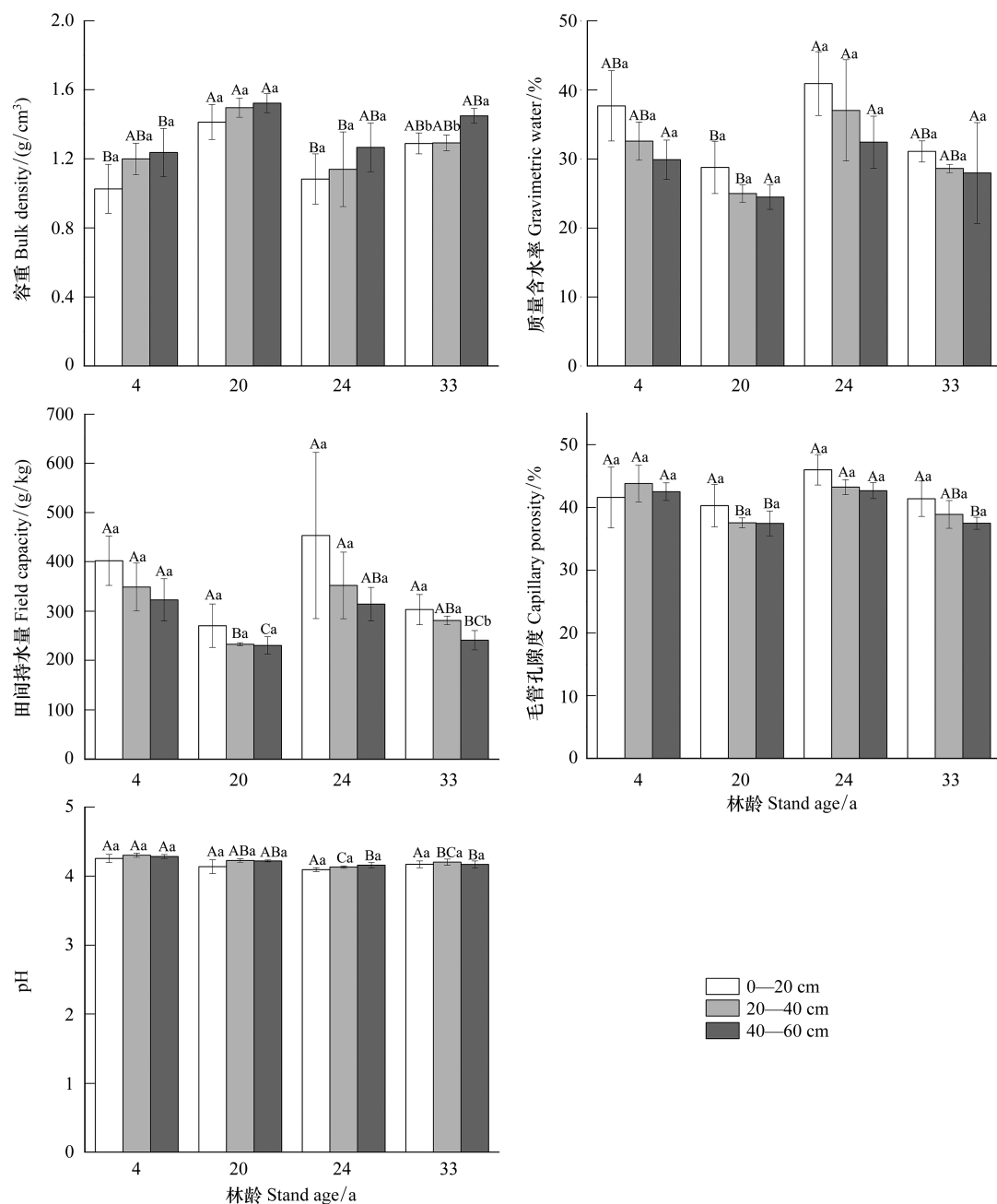


图1 不同林龄杉木人工林土壤容重、含水量、孔隙度及 pH 值

Fig.1 Soil bulk density, water content, porosity and pH value in different stand age of *Cunninghamia lanceolata* plantation

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

0.72、0.58 cm/a(图4)。地上生物量和胸径年增加量与土壤 C:N 和 C:P 比均不相关,生物量与 N:P 比呈正相关($r = 0.347, P = 0.031$),胸径年增加量与 N:P 比呈负相关($r = 0.390, P = 0.019$)。

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(表3),pH 值与所有的水分-物理性质及基本元素含量均不存在相关关系。TC 与多个土壤理化性质显著相关,其中与土壤容重负相关,与质量含水量、田间持水量正相关,TN 与田间持水量正相关,与 TC 和 TP 极显著正相关,而 TP 与所有土壤水分-物理性质无关,与 TC 和 TN 显著正相关,K 与田间持水量和毛管孔隙负相关,与土壤容重正相关。

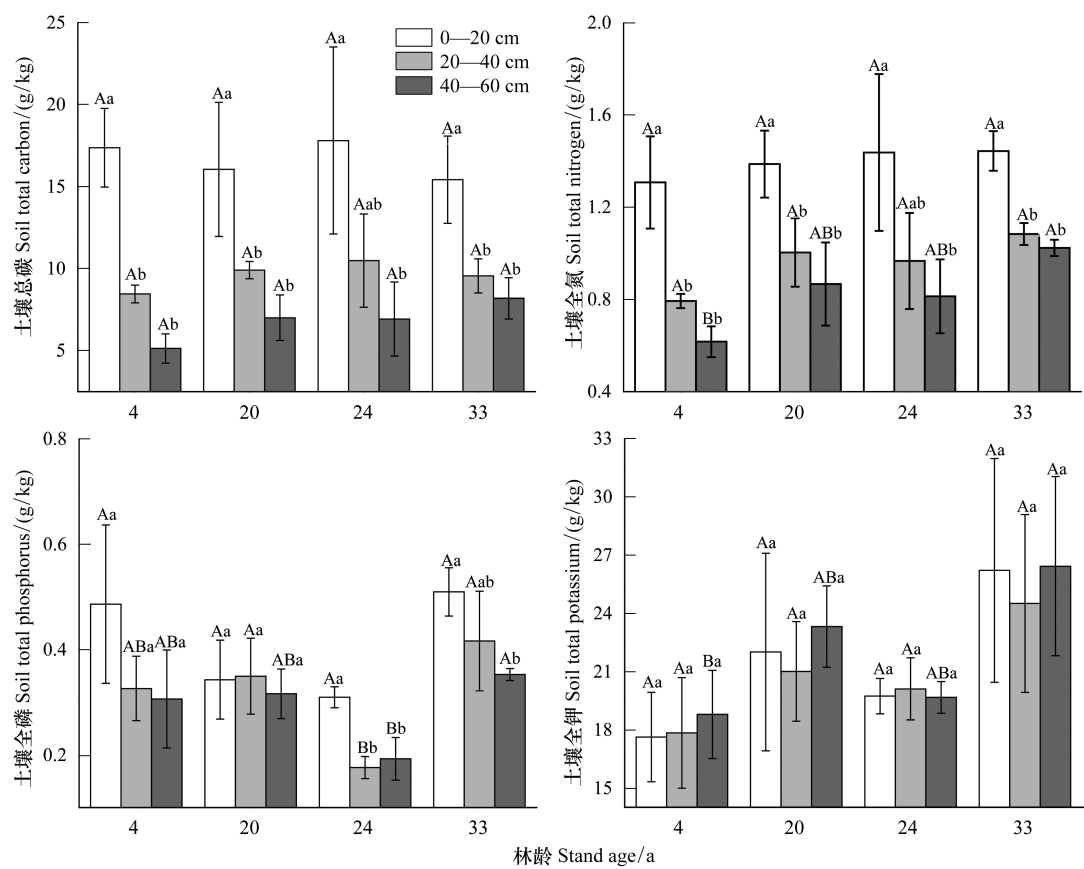


图2 不同林龄杉木人工林土壤总碳、全氮、全磷和全钾含量

Fig.2 Soil TC, TN, TP and TK content in different stand age of *Cunninghamia lanceolata*

表3 杉木人工林土壤理化性质和 C:N:P 计量比的相关性分析

Table 3 Correlation between the different soil physico-chemical properties and C:N:P stoichiometry under *Cunninghamia lanceolata* plantations

组分 Items	土壤容重 Soil bulk density	质量 含水量 Gravimetric water content	田间 持水量 Field capacity	毛管孔隙 Capillary porosity	pH	TC	TN	TP	TK	C:N	C:P	N:P
土壤容重 Soil bulk density	1.000											
质量含水量 Gravimetric water content	-0.900 **	1.000										
田间持水量 Field capacity	-0.896 **	0.885 **	1.000									
毛管孔隙 Capillary porosity	-0.675 **	0.718 **	0.757 **	1.000								
pH	-0.106	-0.076	0.006	0.105	1.000							
C	-0.394 *	0.451 **	0.531 **	0.323	-0.061	1.000						
N	-0.174	0.285	0.335 *	0.149	-0.179	0.924 **	1.000					
P	0.002	-0.048	0.005	-0.142	0.261	0.427 **	0.527 **	1.000				
K	0.385 *	-0.259	-0.388 *	-0.449 **	-0.268	-0.137	0.090	0.221	1.000			
C:N	-0.531 **	0.492 **	0.558 **	0.416 *	0.142	0.835 **	0.586 **	0.196	-0.380 *	1		
C:P	-0.395 *	0.497 **	0.507 **	0.449 **	-0.307	0.643 **	0.504 **	-0.366 *	-0.275	0.677 **	1	
N:P	-0.212	0.364 *	0.314	0.335 *	-0.451 **	0.360 *	0.321	-0.588 **	-0.168	0.324	0.904 **	1

*表示 $P<0.05$ 的显著性; **表示 $P<0.01$ 的显著水平; ***表示 $P<0.001$ 的显著水平

质量含水量及毛管孔隙度与土壤 3 个化学计量比呈显著正相关,而土壤容重及田间持水量与 C:N 和 C:P 显著相关;pH 与 N:P 显著负相关。TC 含量与 3 个计量比均显著正相关,TN 含量与 C:N 和 C:P 极显著正相关,TP 与 C:P 和 N:P 显著负相关,TK 仅与 C:N 显著负相关,3 个计量比两两之间的相关性表现为 C:N 与 C:P 存在显著正相关,C:P 与 N:P 极显著相关。

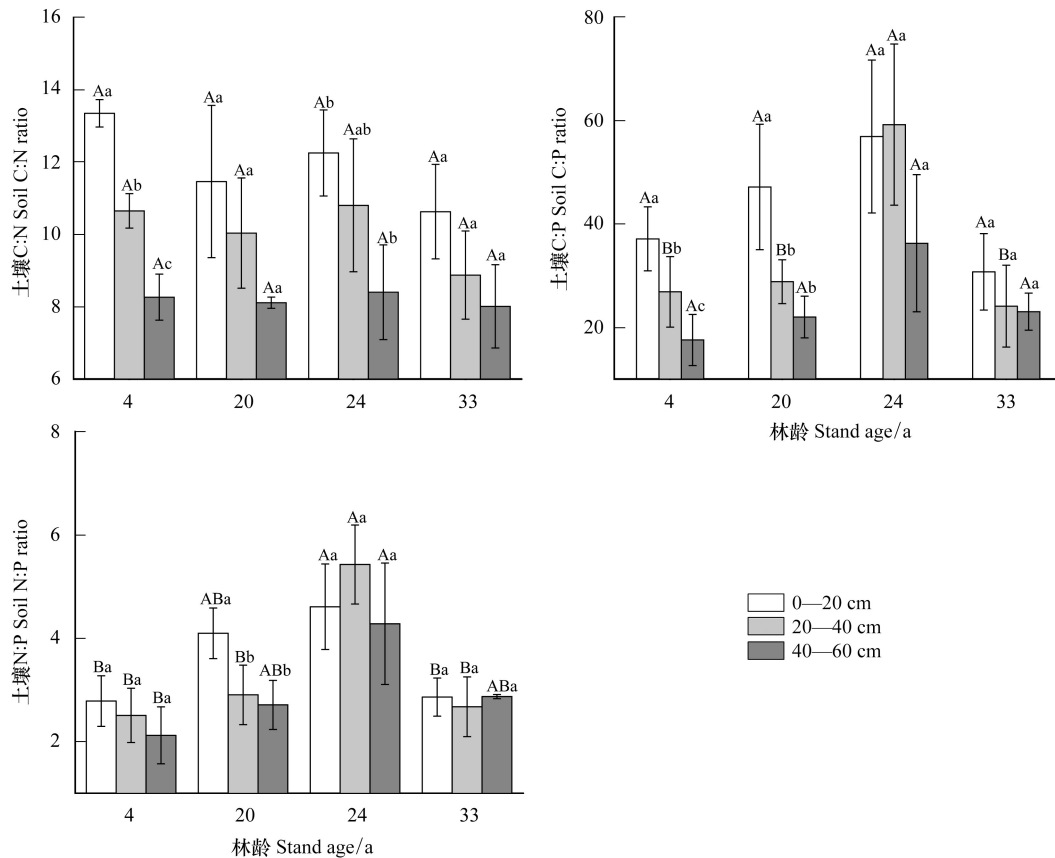


图 3 不同林龄杉木人工林土壤 C:N, C:P 及 N:P

Fig.3 Soil C:N, C:P and N:P ratios in different stand age of *Cunninghamia lanceolata* plantations

图中不同小写字母表示同一林龄不同土层计量比差异显著;大写字母表示同一土层不同林龄计量比的差异程度

3 讨论

3.1 不同林龄人工林土壤理化性质的变化

大量研究表明,林龄显著影响人工林土壤理化性质,但土壤理化性质随林龄的变化与树种有关^[21-23]。在本研究中,随着林分的发展,土壤容重逐渐增加,在 20 a 达到最大,20 cm 以下土层田间持水量、毛管孔隙度也以 20 a 林分最低,该研究结果与王宏星等^[21]对甘肃小陇山日本松人工林的研究相似,可能与两个研究在样地发育阶段的选择上较为接近有关。研究地杉木种植前仍采用炼山这一传统的林地清理方式,但炼山后土壤会经历短暂激肥效应^[24],林地整地活动在一定程度上也促进了土壤水分和物理性质^[25],林分发育到中龄林,郁闭度提高,林下植被盖度和生物量显著减少^[21, 26],导致土壤紧实、孔隙度减小、持水能力减弱。

不同林龄杉木人工林土壤碳含量没有显著差异,这一结果与 Chen 等^[27]对 7 个不同林龄杉木人工林土壤有机碳含量的研究相似,但兰斯安等^[28]和王丹等^[29]发现不同发育阶段杉木人工林土壤有机碳呈现先下降后上升的趋势,即中龄林最低。有机碳的积累与许多因素有关,如气候、土壤类型、树种和森林经营方式^[30],在预测不同林龄人工林土壤碳库变化上需要综合考虑各个因素的影响。本研究地杉木生长在粗粒花岗岩发育土壤上,而粘粒具有吸附和稳定有机碳的作用^[31],推测本研究地砂质壤土的质地不利于土壤有机碳的固持。

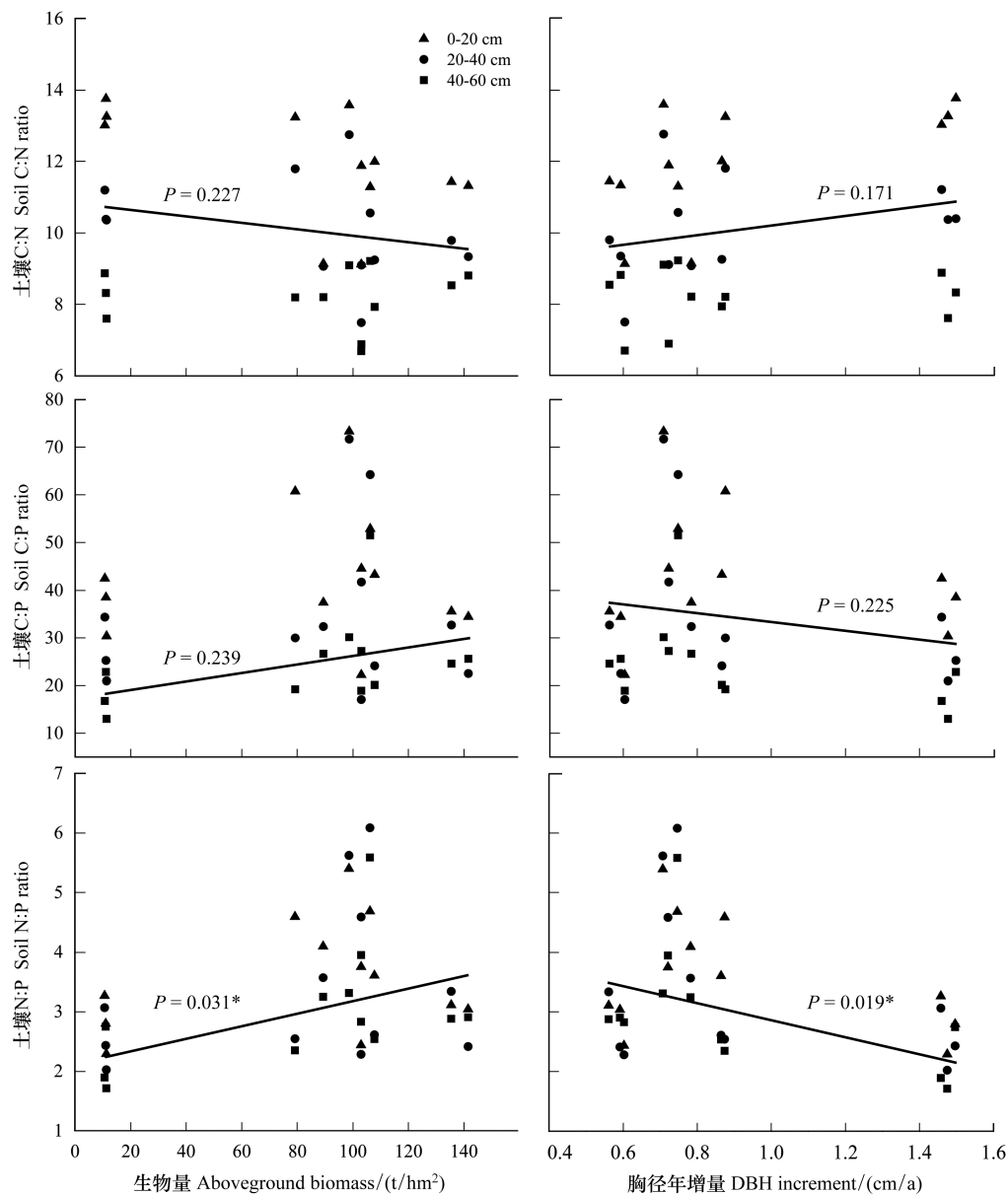


图4 土壤 C:N:P 化学计量比与杉木地上生物量及胸径年增量的相关关系

Fig.4 The relationship between soil C:N:P stoichiometry, aboveground biomass and annual DBH increment of *Cunninghamia lanceolata*

大量研究表明土壤氮是影响土壤碳库吸存的关键参数^[30, 32], 本研究中全氮与总碳含量极显著相关, 为了保持土壤碳库的长期稳定甚至增加固碳潜力, 维持合理的氮素水平是一项重要的土壤管理措施^[30]。土壤全磷和全钾由土壤养分供应、养分归还和植被吸收利用之间的平衡决定, 从杉木的生长周期看 24 a 杉木处于成熟期, 林木对磷的需求达到最大^[33], 但杉木凋落物质量低和宿存枝上的特性^[34], 分解缓慢, 养分循环过程长, 使土壤磷的损耗在 24 a 达到最大导致全磷含量最低, 钾在不同林龄 0—40 cm 土层无显著差异, 这与樟子松和油松人工林的研究结果相似^[22, 35], Zhou 等^[36]通过比较不同发育阶段杉木人工林鲜叶和枯叶的化学计量比, 发现杉木具有较高的钾重吸收效率, 且重吸收率随着林龄的增加而下降, 因此钾可能不是杉木生长的限制因素, 导致不同林龄土壤全钾无显著性差异。林龄对杉木人工林深层土壤全氮、全磷和全钾的影响更为深刻, 这可通过林木生长对土层养分的重新分配作用来解释。Wang 等^[37]发现随着林分的发展, 落叶松在深层土壤分配更高的细根生物量, 促进深层土壤的养分吸收, 凋落物分解联合降雨活动又使来自深层土壤的养分“反哺”表土层, 深层土壤较高的土壤容重和毛管孔隙度使养分难以下渗, 底土层养分的向上输移效应随着植物的生

长发育,尤其在人工林速生阶段愈加明显^[38]。

所有林龄杉木人工林土壤田间持水量、质量含水量、毛管孔隙度、总碳、全氮和全磷含量均随着土层加深而减少,容重随土层加深而增加,这与许多研究结果一致^[5, 21-22, 35]。表土丰富的有机质来源和根系活动使表土较疏松多孔,增强了土壤容蓄能力,本文研究结果显示总碳和全氮与多个土壤物理性质极显著相关,表明有机质在促进土壤通气透水性上具有一定作用。

3.2 不同林龄人工林土壤 C:N:P 化学计量比的变化

本研究中 C:N, C:P 和 N:P 分别为 10.63—13.35, 30.75—56.94 和 2.79—4.61,与中国陆地土壤平均水平(C:N, C:P 和 N:P 分别为 11.9, 61.0 和 5.2)相比,本研究土壤 C:N 与平均水平相当,但 C:P 和 N:P 均位于平均水平之下,这与亚热带红壤地区磷背景值低有关。不同地区的杉木人工林土壤 C:P 和 N:P 之间存在较大变异(表 4),这与全国土壤 C:N:P 化学计量比分布结果一致^[39],C:N 在不同气候带、土壤类型、风化程度和土层因素的空间分布变异小,C:P 和 N:P 存在较大的空间异质性。但距离本研究地不远的杉木人工林土壤的 C:N:P 化学计量比^[36]均明显低于本研究 4 个林分,两个试验地在气候、土地利用和植被条件相似,表明土壤条件是影响 C:N:P 化学计量比地区分布的关键因素。

表 4 本研究与其他地区杉木人工林表层土壤 C:N:P 生态计量比的比较

Table 4 Comparisons of soil C:N:P stoichiometry with studies about *Cunninghamia lanceolata* in other planting regions

研究区 Study area	林龄 Stand age/a	土壤取样 深度/cm	母质/土壤类型 Parent material/ Soil type	C:N	C:P	N:P	参考文献 Reference
中国陆地土壤				11.9	61.0	5.2	[39]
福建三明	4,20,24,33	0—20	花岗岩/红壤	10.63—13.35	30.75—56.94	2.79—4.61	本研究
福建南平	8,14,21,46	0—10	绿泥片岩/黄壤	10.59—18.11	64.43—98.54	4.70—6.96	[15]
湖南会同	7,17,25	0—20	变色页岩和砂岩	8.68—11.50	42.2—64.90	4.70—5.52	[17]
福建三明	10,22,34	0—20	砂岩和页岩/红壤	7.99—10.66	5.80—12.85	0.73—1.20	[36]
湖南会同	18	0—15	灰绿色板岩/山地黄壤	—	—	2.53	[40]
湖南会同	25	0—15	灰绿色板岩/山地黄壤	13.50—17.90	17.93—34.31	1.88—2.17	[41]

C:N 反映了能为微生物所利用土壤有机质的有效性^[42],本研究中杉木林土壤 C 和 N 含量随林龄保持恒定使 C:N 比在林龄间变化相对稳定,表明土壤有机质的有效性并没有随杉木林的生长发育而发生改变,这与 Zhou 等^[36]对 10 a, 22 a 和 34 a 杉木人工林土壤 C:N:P 计量比的研究结果一致。土壤 C:N 的时间变化与凋落物 C 和 N 的时间动态变化是紧密匹配的^[2, 30],Yang 等^[30]收集了 39 个森林林龄序列的鲜叶、凋落物层和土壤碳氮数据进行统计分析,发现枯落物与土壤 C:N 随着林龄序列的变化相对恒定。植物器官凋亡后内部的碳和氮元素不再因为植物代谢活动发生改变,土壤中碳氮主要来源于植物残体的分解,微生物严密遵守元素计量比分解植物残体^[43],使得植物残体进入土壤中保持 C:N 的稳态^[44]。

C:P 反映了土壤微生物对土壤有效磷的代谢趋势^[9],N:P 常常被作为 N 和 P 限制的有效预测指标^[3]。本研究中,林龄对 C:P 和 N:P 均有显著影响,C:P 和 N:P 均在 24 a 杉木成熟林的深层土壤达到最大,且 C:P 和 N:P 与土壤总碳正相关,与全磷呈显著负相关性,N:P 与全氮不相关,总碳随林龄变化没有显著差异,24 a 杉木林土壤全磷含量最低,C:P 和 N:P 也低于全国土壤平均水平,因此磷是影响研究区土壤 C:P 和 N:P 生态计量比的关键因素,由此推测杉木经过速生阶段发育到成熟林的过程对磷需求大,土壤磷没有得到及时的补充,使林地处于磷过度消耗的状态^[17]。在亚热带红壤地带土壤无机磷以 Al-P, Fe-P, Ca-P 为主,植物可吸收利用的有效态少,人工林发展到后期往往受到强烈的磷限制,研究表明鼎湖山三种森林类型根际土壤酸性磷酸酶活性随着林龄的增加而增加,根际土有效磷含量也随之下降^[45],桉树人工林土壤 C:P 和 N:P 随着林龄增加而增加^[46],表明在亚热带红壤区,随着森林的生长,磷受限将加剧,在人工林发育中后期应适当增施磷肥,以保证林木的良好生长,促进土壤与植物的良性养分循环。

植物器官的养分计量比能用于指示植物生长^[47],但森林土壤养分库的变化受到多方面(凋落物分解、根动态和根系吸收)的同时影响,而且在土壤养分不足的情况下,植物还具有体内和枯死器官养分重吸收的养分内循环机制^[48],因此土壤化学计量比是否与植物生长相适应尚不明确,本研究发现不同林龄杉木林土壤 C:N 和 C:P 与杉木生物量及胸径年增加量没有相关性,N:P 与杉木生物量呈正相关,与年增长量呈负相关性($P<0.05$),Fan 等也发现土壤 N:P 与桉树 DBH 年增长量和林下植被生物量有关,土壤 N:P 与桉树及林下植被的叶片显著相关^[46],表明在磷匮乏的亚热带红壤区,土壤 N:P 计量比与杉木人工林生长有关,大量研究显示,植株叶片 N:P 与植物生长速度和养分吸收有关^[47,49-50],但土壤 N:P 对植物生长的影响机理还不明确。

森林生态系统过程和功能是植物个体、土壤和凋落物 3 个系统成分相互作用的结果,单一组分的生态化学计量比不能很好地反应生态系统的养分状况^[3],开展植物-凋落物-土壤 C:N:P 计量比的变化特征及其相互关系的分析和探讨,对诊断或评估杉木长期生产力具有指示作用,也可为长期维持杉木人工林地力提供理论依据,从植物-凋落物-土壤系统层面研究杉木人工林化学计量特征将是我们未来研究的方向。

4 结论

分析 4 a, 20 a, 24 a 和 33 a 杉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,发现除了总碳和 C:N 外,林龄对大部分土壤理化性质和生态化学计量比均有显著影响,尤其是对 20 cm 以下土层的影响更为显著。20 a 杉木林土壤持水能力最弱,土壤密度最大,毛管孔隙度最低,表明发育到近熟林土壤的水分-物理条件恶化。土壤总碳与大多数水分-物理性质和 3 个生态化学计量比显著相关,表明有机质动态与土壤结构及养分平衡的调节有关,质量含水量和孔隙度与土壤 C:N:P 生态化学计量比均显著相关,表明土壤物理结构与土壤养分有效性有关。24 a 的杉木人工林土壤 TP 含量显著低于其他林分,C:P 和 N:P 均高于其他林分,TP 与 C:P 和 N:P 显著相关,表明 24 a 杉木的生长受到土壤磷的限制,在杉木速生阶段适当增施磷肥,保证林木的良好生长,促进土壤与植物的良性养分循环。土壤 N:P 比与不同发育阶段杉木生物量及胸径年生长量均存在相关性,表明土壤 N:P 对指示杉木生长具有一定作用。

致谢:福建农林大学林学院 2013 级林学专业本科生蔡海峰、王虎、李宝成、郭丽倩、邓明明,2014 级硕士研究生魏志超及博士研究生李莹参加了野外调查和室内分析,福建农林大学莘口教学林场提供外业调查支持,特此感谢!

参考文献(References):

- [1] Elser J J, Fagan W F, Denno R F, Dobberfuhl D R, Folarin A, Huberty A, Interlandi S, Kilham S S, McCauley E, Schulz K L, Siemann E H, Sterner R W. Nutritional constraints in terrestrial and freshwater food webs. *Nature*, 2000, 408(6812): 578-580.
- [2] McGroddy M E, Daufresne T, Hedin L O. Scaling of C:N:P stoichiometry in forests worldwide: implications of terrestrial redfield-type ratios. *Ecology*, 2004, 85(9): 2390-2401.
- [3] 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.
- [4] Bui E N, Henderson B L. C:N:P stoichiometry in Australian soils with respect to vegetation and environmental factors. *Plant and Soil*, 2013, 373(1/2): 553-568.
- [5] 吕金林, 闫俊杰, 宋变兰, 关晋宏, 时伟宇, 杜盛. 黄土丘陵区刺槐、辽东栎林地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征. *生态学报*, 2017, 37(10): 3385-3393.
- [6] 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.
- [7] Lucas-Borja M E, Hedo 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.
- [8] 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.
- [9] 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.

- [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] 国家林业局. 中国森林资源报告: 第七次全国森林资源清查. 北京: 中国林业出版社, 2009.
- [13] 郭虎波, 吴建平, 袁颖红, 刘文飞, 樊后保, 许鲁平, 张子文, 孟庆银. 氮沉降对杉木人工林土壤化学计量特征的影响. 福建林业科技, 2014, 41(1): 1-5.
- [14] 陈婵, 王光军, 赵月, 周国新, 李栋, 高吉权. 会同杉木器官间 C、N、P 化学计量比的季节动态与异速生长关系. 生态学报, 2016, 36(23): 7614-7623.
- [15] 邱岭军, 胡欢甜, 林宝平, 汪凤林, 林宇, 何宗明, 刘桌明. 不同林龄杉木养分重吸收率及其 C:N:P 化学计量特征. 西北林学院学报, 2017, 32(4): 22-27.
- [16] 王艳, 胡小飞, 王方超, 张宇飞, 陈少凤. 施氮磷肥对杉木人工林 3 种林下植物养分动态及化学计量比的影响. 江西农业大学学报, 2016, 38(2): 304-311.
- [17] 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.
- [18] 俞新妥. 杉木栽培学. 福州: 福建科学技术出版社, 1997: 155-157.
- [19] 国家林业局. 中华人民共和国林业行业标准: 森林土壤分析方法. 北京: 中国标准出版社, 1999: 21-151.
- [20] 曾伟生. 我国杉木通用性立木生物量模型研究. 中南林业调查规划, 2013, 32(4): 4-11, 15-15.
- [21] 王宏星, 孙晓梅, 陈东升, 沈亚洲, 马建伟. 甘肃小陇山日本落叶松人工林不同发育阶段土壤理化性质的变化. 林业科学研究, 2012, 25(3): 294-301.
- [22] 牛沙沙, 周永斌, 刘丽颖, 秦胜金, 殷有, 宋晓东, 肖薇. 不同林龄樟子松人工林土壤理化性质. 东北林业大学学报, 2015, 43(2): 47-50, 62-62.
- [23] 李小容, 白礼姣, 陈本莉, 蓝慧卡, 符春丁, 李蕾. 不同林龄木麻黄林地土壤理化性质与生化活性分析. 西北林学院学报, 2014, 29(2): 37-41.
- [24] 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.
- [25] 马祥庆, 刘爱琴, 何智英, 俞立垣, 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.
- [26] 焦如珍, 杨承栋, 屠星南, 盛炜彤. 杉木人工林不同发育阶段林下植被、土壤微生物、酶活性及养分的变化. 林业科学研究, 1997, 10(4): 373-379.
- [27] Chen G S, Yang Z J, Gao R, Xie J S, Guo J F, Huang Z Q, Yang Y S. Carbon storage in a chronosequence of Chinese fir plantations in southern China. Forest Ecology and Management, 2013, 300: 68-76.
- [28] 兰斯安, 杜虎, 曾馥平, 宋同清, 彭晚霞, 韩畅, 陈莉, 苏樑. 不同林龄杉木人工林碳储量及其分配格局. 应用生态学报, 2016, 27(4): 1125-1134.
- [29] 王丹, 王兵, 戴伟, 李萍, 胡文, 郭浩. 不同发育阶段杉木林土壤有机碳变化特征及影响因素. 林业科学研究, 2009, 22(5): 667-671.
- [30] Yang Y H, Luo Y Q, Finzi A C. Carbon and nitrogen dynamics during forest stand development: a global synthesis. New Phytologist, 2011, 190(4): 977-989.
- [31] Shen Y H. Sorption of natural dissolved organic matter on soil. Chemosphere, 1999, 38(7): 1505-1515.
- [32] Luo Y Q, Field C B, Jackson R B. Does nitrogen constrain carbon cycling, or does carbon input stimulate nitrogen cycling? Ecology, 2006, 87(1): 3-4.
- [33] Ma X Q, Heal K V, Liu A Q, Jarvis P G. Nutrient cycling and distribution in different-aged plantations of Chinese fir in southern China. Forest Ecology and Management, 2007, 243(1): 61-74.
- [34] Zhou L L, Shalom A D D, Wu P F, Li S B, Jia Y Y, Ma X Q. Litterfall production and nutrient return in different-aged Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations in South China. Journal of Forestry Research, 2015, 26(1): 79-89.
- [35] 张洋, 刘华, 王得祥, 王宇超, 吴昊, 张丽楠, 黄青平. 商洛地区不同林龄油松人工林土壤理化性质研究. 水土保持研究, 2012, 19(3): 82-85, 89-89.
- [36] Zhou L L, Addo-Danso S D, Wu P F, Li S B, Zou X H, Zhang Y, Ma X Q. Leaf resorption efficiency in relation to foliar and soil nutrient concentrations and stoichiometry of *Cunninghamia lanceolata* with stand development in southern China. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(5): 1448-1459.
- [37] Wang W J, Wang H M, Zu Y G. Temporal changes in SOM, N, P, K, and their stoichiometric ratios during reforestation in China and interactions with soil depths: Importance of deep-layer soil and management implications. Forest Ecology and Management, 2014, 325: 8-17.
- [38] Jobbágy E G, Jackson R B. The uplift of soil nutrients by plants: biogeochemical consequences across scales. Ecology, 2004, 85(9): 2380-2389.
- [39] 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.
- [40] 赵月, 王光军, 陈婵, 陈安娜, 李瑾. 杉木不同器官与土壤的 N:P 生态化学计量相关性. 中南林业科技大学学报, 2016, 36(11): 73-79.
- [41] 高吉权, 周国新, 王光军, 李栎, 赵月. 杉木林凋落物与土壤 C:N:P 生态化学计量学的相关关系. 湖南林业科技, 2016, 43(4): 1-6.
- [42] Paul K I, Polglase P J, Nyakuengama J G, Khanna P K. Change in soil carbon following afforestation. Forest Ecology and Management, 2002, 168(1/3): 241-257.
- [43] Cleveland C C, Liptzin D. C:N:P stoichiometry in soil: is there a "Redfield ratio" for the microbial biomass?. Biogeochemistry, 2007, 85(3): 235-252.
- [44] Yang Y H, Fang J Y, Guo D L, Ji C J, Ma W H. Vertical patterns of soil carbon, nitrogen and carbon: nitrogen stoichiometry in Tibetan grasslands. Biogeosciences Discuss, 2010, 7(1): 1-24.
- [45] Huang W J, Liu J X, Wang Y P, Zhou G Y, Han T F, Li Y. Increasing phosphorus limitation along three successional forests in southern China. Plant and Soil, 2013, 364(1/2): 181-191.
- [46] Fan H B, Wu J P, Liu W F, Yuan Y H, Hu L, Cai Q K. Linkages of plant and soil C:N:P stoichiometry and their relationships to forest growth in subtropical plantations. Plant and Soil, 2015, 392(1/2): 127-138.
- [47] Elser J J, Fagan W F, Kerkhoff A J, Swenson N G, Enquist B J. Biological stoichiometry of plant production: metabolism, scaling and ecological response to global change. New Phytologist, 2010, 186(3): 593-608.
- [48] Wright I J, Westoby M. Nutrient concentration, resorption and lifespan: leaf traits of Australian sclerophyll species. Functional Ecology, 2003, 17(1): 10-19.
- [49] Yan Z B, Kim N, Han W X, Guo Y L, Han T S, Du E Z, Fang J Y. Effects of nitrogen and phosphorus supply on growth rate, leaf stoichiometry, and nutrient resorption of *Arabidopsis thaliana*. Plant and Soil, 2015, 388(1/2): 147-155.
- [50] Niklas K J, Owens T, Reich P B, Cobb E D. Nitrogen/phosphorus leaf stoichiometry and the scaling of plant growth. Ecology Letters, 2005, 8(6): 636-642.