

南亚热带杉木人工成熟林密度对土壤养分效应研究

胡小燕¹, 段爱国^{1*}, 张建国^{1,2}, 杜海伦¹, 张雄清¹, 郭文福³, 郭光智⁴

(1. 中国林业科学研究院林业研究所, 国家林业局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 北京 100091;

2. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心, 江苏 南京 210037; 3. 中国林业科学研究院热带林业实验中心,

广西 凭祥 532600; 4. 山东潍坊市林业局, 山东 潍坊 261061)

摘要: [目的] 研究5种不同密度林分土壤剖面养分含量的变化规律。[方法] 以广西大青山37年生杉木密度试验林为研究对象, 测定了A(1 667株·hm⁻²)、B(3 333株·hm⁻²)、C(5 000株·hm⁻²)、D(6 667株·hm⁻²)、E(10 000株·hm⁻²)5种密度下0~100 cm土层土壤养分含量。利用单因素方差分析和多重比较判断不同密度和不同土层土壤养分含量的差异。[结果] 表明:(1) 杉木人工成熟林大多数土层土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效性铁含量在A、B等低密度林分中最高, 并且在0~30 cm的土壤中, 随密度的增加表现出总体下降的变化趋势, 而土壤pH值与全钾、速效钾随密度的增加而上升, 交换性钙与交换性镁含量受密度影响不明显;(2) 土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁和有效性铁含量均随土层深度的增加而明显下降, 0~30 cm表层土壤的降幅较大, 密度对不同土壤深度养分含量的变化具有一定影响。[结论] 初植密度对杉木人工成熟林土壤养分含量影响明显, 低初植密度更有利于杉木人工林土壤肥力的长期维持, 南亚热带杉木林密度对土壤养分的影响深度可达60 cm。

关键词: 杉木; 成熟林; 初植密度; 土壤剖面; 养分含量

中图分类号: S714 S791.27

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2018)03-0015-09

Effect of Stand Density on Soil Nutrient of Chinese Fir Mature Plantations in South Asia Subtropical Zone

HU Xiao-yan¹, DUAN Ai-guo¹, ZHANG Jian-guo^{1,2}, DU Hai-lun¹,
ZHANG Xiong-qing¹, GUO Wen-fu³, GUO Guang-zhi⁴

(1. Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration, State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Beijing 100091, China; 2. Collaborative Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China,

Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China; 3. Experiment Center of Tropical Forestry, Chinese Academy of Forestry,

Pingxiang 532600, Guangxi, China; 4. Shandong Weifang Forestry Bureau, Weifang 261061, Shandong, China)

Abstract: [Objective] To study the effect of five initial planting densities and different soil profile on soil nutrient contents of Chinese fir (*Cunninghamia lanceolata*) mature plantation. [Method] The soil nutrient contents (0–100 cm soil layers) of *C. lanceolata* mature plantation in Daqingshan Forest Farm under five different planting densities of A (1 667 trees·hm⁻²), B (3 333 trees·hm⁻²), C (5 000 trees·hm⁻²), D (6 667 trees·hm⁻²), and E (10 000 trees·hm⁻²) were measured. One-way ANOVA and the least significant difference were applied to determine the soil nutrient contents in different densities and different soil layers. [Result] The results showed that: (1) The contents of organic matter, total N, P, available N and available Fe were the highest in most soil lay-

收稿日期: 2017-09-14

基金项目: 国家“十三五”重点研发计划课题“杉木速生材高效培育技术研究(2016YFD0600302)”; 国家“十二五”科技计划课题“杉木速生丰产林定向培育技术研究(2015BAD09B0101)”及国家自然科学基金面上项目(31570619)

作者简介: 胡小燕, 硕士研究生. 主要研究方向: 人工林定向培育. E-mail: 18235444042@163.com

* 通讯作者: 段爱国, 研究员. 主要研究方向: 人工林定向培育. E-mail: duanag@caf.ac.cn

ers of stands with density A or B. In general, as initial planting density increased, the contents of organic matter, total N, P, available N and available Fe in upper soil layers (0–30 cm) decreased. While soil pH, total K and available K increased with initial planting density. Moreover, the initial planting density did not significantly influence the contents of exchangeable Ca and Mg; (2) Soil organic matter, total N, available N, P, K, exchangeable Ca, Mg and Fe contents obviously decreased with increasing soil depths. This pattern was particularly evident in the top 0–30 cm. The initial planting density had obvious effect on nutrient content in different soil depths. [**Conclusion**] The nutrients in 60 cm soil are affected by stand density in South Asia, while the low initial planting density is more conducive to the long term conservation of soil fertility in Chinese fir plantation.

Keywords: *Cunninghamia lanceolata*; mature stand; planting density; soil profile; nutrient content

土壤是林木生长发育的基质,能够提供给植物大部分生命的必需元素,同时,林下植被以及凋落物的种类、数量都会影响土壤的理化性质和养分循环。杉木是我国南方重要针叶用材树种,分布遍及整个亚热带区域。杉木人工造林面积、蓄积已分别达 $8.5 \times 10^6 \text{ hm}^2$ 、 $6.2 \times 10^8 \text{ m}^3$,分别占我国人工乔木林面积、蓄积的 21.4% 和 31.6%^[1-2]。杉木凋落物养分含量低、分解速度慢,且枯枝落叶存在宿存特性,使其养分很难归还土壤^[3-4],逐渐导致杉木人工林土壤物理性质变劣,功能衰退,土壤肥力下降。研究杉木人工林土壤养分变化规律对杉木林可持续经营意义重大。

目前,杉木土壤养分研究主要集中在江西、福建等中亚热带地区^[5-8],研究内容集中在连栽^[9-10]、间伐强度^[11-12]及不同发育阶段^[13-14]杉木人工林土壤养分的变化,多关注中幼龄林,且大多为临时样地。对江西和福建不同林龄和栽植代数杉木人工林土壤性质的研究发现^[3],2~3代的杉木林与1代相比,土壤功能总体是下降的,从幼龄到中龄林,土壤的各种理化性质下降,直到近熟林土壤养分才回升,且不同发育阶段对连栽的影响略有差别,杉木中龄林的土壤随栽植代数的增加变得更加紧实,通透性变差,而对其他发育阶段的土壤通透性影响不显著^[9]。

除遗传、立地控制外,密度控制作为国际工业人工林高效培育的第三大控制技术,具有人为可调控性,作用于林分群体结构及竞争态势,通过影响森林群落的光、热、水分等生态因子的分配,对凋落物的形成、林下植被的覆盖度及生物量产生影响,从而影响林地的土壤养分^[3]。林分密度过高,林下植被覆盖度和生物量减少,同时土壤有机质、全 N、全 P、水解 N、速效 P 等含量会显著下降^[15-16]。通过间伐,适当降低林分密度,能够维护土壤肥力,提高林木的

生长环境^[17]。广西是我国杉木著名产区之一,但长期以来缺乏该地区杉木人工林密度对土壤养分效应的研究。鉴此,本文以广西凭祥市大青山 37 年生杉木密度试验林固定样地为研究对象,探究 5 种初植密度下杉木人工成熟林土壤养分的变化规律,为区域杉木人工林长期生产力维护提供参考。

1 试验区概况

试验区位于中国林业科学研究院林业研究所于国家“六·五”科技攻关初期设置于我国南亚热带广西凭祥的大青山试验林场(106°43' E, 22°06' N),海拔 500 m;地貌主要为低山,坡度 25°~30°;属北热带季风气候区,湿润半湿润气候;光热条件极好,降水充沛,但夏湿冬干,10 月至次年 3 月为干季,4—9 月为湿季;年平均气温 19.9℃,年降水量 1 400 mm,年蒸发量 1 200 mm。土壤以发育在花岗岩等母质上的红壤为主,土层厚度大于 1 m。林下植被主要有大沙叶(*Pavetta arenosa* Lour.)、桃金娘(*Rhodomyrtus tomentosa* (Ait.) Hassk)、金毛狗脊(*Cibotium barometz* (L.) J. Sm.)和铁线蕨(*Adiantum capillus-veneris* L.)等。

2 研究方法

2.1 样地设置

大青山杉木密度试验林于 1982 年春采用 2 年生苗营造,包括 5 种初植密度,分别为 1 667、3 333、5 000、6 667、10 000 株·hm⁻²(株行距分别为 2 m × 3 m、2 m × 1.5 m、2 m × 1 m、1 m × 1.5 m、1 m × 1 m,分别记为 A、B、C、D、E)。采用随机区组排列,每个密度各重复 3 次(A1、A2、A3; B1、B2、B3; C1、C2、C3; D1、D2、D3; E1、E2、E3),共 15 个样地,每个样地面积为 600 m²。不同密度杉木林分基本状况见表 1。

表1 杉木密度试验林样地基本情况

Table 1 Basic state of Chinese Fir plantations with different planting densities

区组 Plots	初植密度 Planting density/ (tree · hm ⁻²)	林分密度 Stand density/ (tree · hm ⁻²)	林分年龄 Stand age/a	平均胸径 Mean DBH/cm	平均树高 Mean tree height/m	优势木树高 DTH/m	林下植被生物量 Understory biomass/ (t · hm ⁻²)
A	1 667	1 044	36	19.76	18.82	15.70	9.76
B	3 333	1 428	36	17.26	18.08	15.09	13.56
C	5 000	1 533	36	16.28	16.95	14.16	9.71
D	6 667	1 511	36	17.61	18.93	16.01	8.11
E	10 000	1 356	36	15.67	16.69	14.56	8.05

2.2 土样的采集与测定

于2016年秋季杉木密度试验林达37年生时,在每个小区按“S”形选择3个土壤剖面,共挖土壤剖面45个。每个土壤剖面深度为100 cm,分0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70、70~80、80~90、90~100 cm取样。将样品带回实验室,风干,磨碎,过筛处理后,用于土壤养分各项指标测定。pH值采用电位计法测定(水土比2.5:1);有机质采用重铬酸钾外热法测定;全氮和碱解氮采用凯氏定氮法和扩散吸收法测定;全磷和有效磷采用NaOH碱溶—钼锑抗比色法和NaHCO₃碱溶—钼锑抗比色法测定;全钾和速效钾采用火焰光度法测定;交换性钙、镁和铁采用原子吸收分光光度计法测定^[18]。

2.3 数据处理

采用Excel 2013和SPSS 17.0进行数据统计及分析。利用单因素方差分析和多重比较判断不同密度和不同土层土壤养分含量的差异。

3 结果与分析

3.1 土壤pH值

从表2可看出:密度对土壤剖面不同土层的pH值影响明显,总体表现为高密度林分的土壤pH值比低密度林分的高,且不同土层pH值随密度的变化趋势基本一致。在0~10、10~20、20~30、30~40、40~50、50~60、60~70 cm土层内,A密度的土壤pH显著低于其它4种密度($P < 0.05$),而B、C、D、E 4种密度土壤的pH值变化较小。

15块样地1 m深土壤剖面的pH值为3.54~3.99,且随土壤深度的增加呈显著上升的趋势;不同密度下,不同土层的pH值存在一定的差异,其中,A密度下,0~60 cm各土层的pH值差异不显著,但与60 cm以下土层的pH值差异显著;B、C、D密度下,0~70 cm各土层的pH值差异不显著;E密度下,0~80 cm各土层的pH值差异不显著。高初植密度可以降低不同土层pH值的差异化。

表2 不同密度下各层土壤的pH值

Table 2 Soil pH in different layers under different stand densities

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	3.54 ± 0.19Db	3.77 ± 0.13Ca	3.74 ± 0.11Ca	3.80 ± 0.07Da	3.86 ± 0.06Ca
10~20	3.58 ± 0.17CDe	3.79 ± 0.10Cab	3.75 ± 0.11Cb	3.85 ± 0.06CDab	3.87 ± 0.05BCa
20~30	3.60 ± 0.16CDe	3.77 ± 0.10Cb	3.77 ± 0.10Cb	3.86 ± 0.09CDab	3.89 ± 0.07ABCa
30~40	3.62 ± 0.17CDe	3.79 ± 0.10Cab	3.76 ± 0.10Cb	3.85 ± 0.08CDab	3.89 ± 0.08ABCa
40~50	3.63 ± 0.18CDb	3.79 ± 0.09Ca	3.79 ± 0.10BCa	3.85 ± 0.10CDa	3.90 ± 0.09ABCa
50~60	3.66 ± 0.17CDb	3.83 ± 0.07Ca	3.80 ± 0.11BCa	3.86 ± 0.10CDa	3.91 ± 0.12ABCa
60~70	3.73 ± 0.15ABb	3.87 ± 0.07ABCa	3.85 ± 0.11BCa	3.92 ± 0.13ABCda	3.93 ± 0.12ABCa
70~80	3.81 ± 0.14ABb	3.92 ± 0.06ABab	3.89 ± 0.10ABab	3.96 ± 0.14ABCa	3.95 ± 0.12ABCa
80~90	3.84 ± 0.17Ab	3.94 ± 0.08ABab	3.91 ± 0.10Aab	3.97 ± 0.15ABa	3.97 ± 0.11ABa
90~100	3.82 ± 0.15ABb	3.94 ± 0.09Aab	3.92 ± 0.09Aab	3.99 ± 0.16Aa	3.99 ± 0.12Aa

注:表中数字为平均值±标准差;同行不同小写字母表示不同密度间差异显著($P < 0.05$);同列不同大写表示不同土层间差异显著($P < 0.05$);下同。

Notes: The figures in the table are average ± standard deviation. Different lowercase letters in the same line indicated significant differences among different densities at 0.05 level, and different capital letters of the same density in the same column indicated significant differences among different soil layers at 0.05 level, The same below.

3.2 土壤有机质

从表3可以看出:密度对土壤各土层有机质含量的影响大多不显著($P > 0.05$),但A、B密度表层土壤(0~30 cm)的有机质含量高于其它密度,说明低密度有利于土壤有机质的积累。相比而言,D密度有机质含量较低,特别是0~10 cm土层,D密度土壤的有机质含量显著低于其它密度的($P < 0.05$)。

有机质含量随土壤深度的增加明显下降,但下降的幅度不同。与0~10 cm相比,90~100 cm土层的有机质含量降低了约4倍。除C密度外,其它林分0~30 cm土层的有机质含量明显高于30 cm以下土层的,且随土壤深度的增加降幅较大。30~60 cm土层内,有机质含量虽下降但幅度较小,而60~100 cm土层的有机质含量变化更小。

表3 不同密度下各层土壤有机质含量

Table 3 Soil organic matter in different layers under different stand densities

$g \cdot kg^{-1}$

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	42.91 ± 4.68Aa	41.21 ± 4.92Aa	38.82 ± 5.39Aa	37.17 ± 5.23Ab	38.68 ± 6.49Aa
10~20	29.98 ± 4.70Ba	32.23 ± 7.81Ba	29.09 ± 7.61Ba	25.75 ± 6.99Ba	28.04 ± 3.85Ba
20~30	21.70 ± 3.25Ca	22.16 ± 5.42Ca	20.06 ± 4.42Ca	21.11 ± 6.78Ca	21.49 ± 4.62Ca
30~40	17.96 ± 2.25Da	17.11 ± 2.94Da	18.69 ± 4.46Ca	15.88 ± 4.01Da	17.09 ± 2.06Da
40~50	16.27 ± 3.43Da	14.47 ± 1.83DEa	14.13 ± 2.10Da	14.01 ± 2.06DEa	16.55 ± 4.13Da
50~60	15.49 ± 4.70DEa	13.00 ± 1.90DEa	14.01 ± 2.98Da	12.61 ± 1.49DEFa	14.26 ± 2.66DEa
60~70	12.61 ± 2.39EFa	12.00 ± 1.98Ea	13.70 ± 4.53Da	12.12 ± 2.03DEFa	12.43 ± 0.80EFa
70~80	11.95 ± 2.37Fa	11.26 ± 1.65Ea	11.61 ± 1.64Da	10.86 ± 1.60EFa	10.97 ± 0.61Fa
80~90	11.04 ± 1.93Fa	9.91 ± 0.78Eab	11.13 ± 1.07Da	9.64 ± 1.34Fb	10.75 ± 1.13Fab
90~100	10.14 ± 1.66Fa	10.05 ± 2.77Ea	9.98 ± 1.14Da	10.57 ± 1.84EFa	9.51 ± 0.96Fa

3.3 土壤全氮与碱解氮

从表4、5可看出:随密度的增加,各层土壤的全氮和碱解氮含量变化很小;0~40 cm土层,A密度的全氮含量大多比其它密度的高,但同一土层的全氮和碱解氮含量在不同密度间差异不显著。

随土壤深度的增加,林分土壤全氮与碱解氮含量总体呈下降趋势。0~20 cm土层的全氮和碱解氮含量显著高于其它土层的($P < 0.05$)。0~30 cm土层内,全氮和碱解氮含量随土层的加深明显下降,而30 cm以下的土层,下降相对缓慢,其中,30~40

cm土层,A、B低密度林分的全氮与碱解氮含量显著高于60 cm以下土层,C、E相对高密度林分的全氮含量显著高于70 cm以下土层。

3.4 土壤全磷与有效磷

由表6可知:林分各层土壤的全磷含量在A、B密度间差异不显著,但大多高于C、D、E密度。与全磷含量不同,10~100 cm土层的有效磷含量均表现为C密度的高于A、B、D、E密度的(表7),且在某些土层差异显著($P < 0.05$);D密度林分的有效磷含量在0~30 cm表层土壤中最低。

表4 不同密度下各层土壤的全氮含量

Table 4 Soil total N in different layers under different stand densities

$g \cdot kg^{-1}$

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	1.51 ± 0.18Aa	1.38 ± 0.15Aa	1.33 ± 0.20Aa	1.35 ± 0.19Aa	1.44 ± 0.23Aa
10~20	1.10 ± 0.14Ba	1.12 ± 0.17Ba	1.06 ± 0.21Ba	1.00 ± 0.19Ba	1.08 ± 0.13Ba
20~30	0.91 ± 0.14Ca	0.88 ± 0.16Ca	0.80 ± 0.13Ca	0.84 ± 0.18Ca	0.87 ± 0.08Ca
30~40	0.77 ± 0.07Da	0.74 ± 0.10Da	0.76 ± 0.16DCa	0.72 ± 0.11Da	0.75 ± 0.06Da
40~50	0.72 ± 0.09DEa	0.66 ± 0.07DEFab	0.63 ± 0.09DEFb	0.66 ± 0.07DEab	0.72 ± 0.09Da
50~60	0.72 ± 0.13DEa	0.68 ± 0.10DEa	0.65 ± 0.14DEa	0.65 ± 0.07DEa	0.70 ± 0.07Da
60~70	0.62 ± 0.09EFa	0.58 ± 0.09EFa	0.65 ± 0.19DEa	0.64 ± 0.07DEa	0.65 ± 0.06DEa
70~80	0.62 ± 0.07EFa	0.55 ± 0.08EFb	0.56 ± 0.03EFab	0.61 ± 0.08DEab	0.58 ± 0.05Eab
80~90	0.51 ± 0.07Fab	0.49 ± 0.09EFb	0.55 ± 0.07EFab	0.59 ± 0.07Ea	0.57 ± 0.05Ea
90~100	0.61 ± 0.16EFa	0.53 ± 0.12Fa	0.50 ± 0.06Fa	0.60 ± 0.07DEa	0.54 ± 0.06Ea

表5 不同密度下各层土壤的碱解氮含量

Table 5 Soil available N in different layers under different stand densities

mg · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	145.38 ± 15.50Aa	147.42 ± 26.96Aa	138.07 ± 13.16Aa	134.58 ± 20.79Aa	135.85 ± 12.28Aa
10~20	109.79 ± 12.30Ba	116.33 ± 20.57Ba	110.99 ± 20.53Ba	103.68 ± 17.76Ba	104.13 ± 15.72Ba
20~30	88.93 ± 9.93Ca	86.20 ± 12.00Ca	86.46 ± 14.52Ca	87.73 ± 20.32Ca	85.69 ± 13.72Ca
30~40	76.09 ± 14.00Da	79.14 ± 17.50CDa	75.20 ± 7.37CDa	74.00 ± 9.52Da	77.94 ± 14.03CDa
40~50	72.34 ± 11.87DEa	69.93 ± 8.73DEa	68.34 ± 10.60DEa	67.77 ± 4.75DEa	71.90 ± 13.72DEa
50~60	67.64 ± 13.00DEFa	64.84 ± 8.69DEa	64.97 ± 11.71DEFa	60.58 ± 3.95Ea	64.08 ± 12.29EFa
60~70	62.30 ± 11.07EFa	62.55 ± 5.88Ea	64.14 ± 16.75DEFa	65.10 ± 6.12DEa	61.73 ± 7.90EFa
70~80	58.80 ± 8.42Fa	57.79 ± 9.55Ea	59.76 ± 10.33EFa	63.76 ± 9.90DEa	56.89 ± 10.60Fa
80~90	60.52 ± 13.23EFa	53.14 ± 6.10Ea	57.15 ± 8.07EFa	59.50 ± 8.51Ea	55.75 ± 8.53Fa
90~100	58.10 ± 5.24Fa	54.61 ± 12.03Ea	52.32 ± 6.83Fa	56.96 ± 6.86Ea	51.68 ± 8.38Fa

表6 不同密度下各层土壤的全磷含量

Table 6 Soil total P in different layers under different stand densities

g · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	0.30 ± 0.02Aa	0.29 ± 0.03Aa	0.25 ± 0.01Abc	0.28 ± 0.03Aab	0.26 ± 0.03Ab
10~20	0.26 ± 0.03Ba	0.26 ± 0.04ABa	0.23 ± 0.01ABb	0.26 ± 0.03ABa	0.23 ± 0.01ABb
20~30	0.25 ± 0.03Ba	0.25 ± 0.05ABa	0.22 ± 0.01ABb	0.24 ± 0.04Bab	0.21 ± 0.02BCb
30~40	0.25 ± 0.02Ba	0.24 ± 0.04Babc	0.21 ± 0.01Bbc	0.24 ± 0.04Bab	0.21 ± 0.02BCc
40~50	0.25 ± 0.02Ba	0.23 ± 0.04Bab	0.20 ± 0.01Bc	0.23 ± 0.04Babc	0.21 ± 0.02BCbc
50~60	0.25 ± 0.02Ba	0.24 ± 0.04Babc	0.21 ± 0.01Bc	0.24 ± 0.04Bab	0.21 ± 0.02Cbc
60~70	0.24 ± 0.03Ba	0.23 ± 0.04Ba	0.23 ± 0.09ABa	0.25 ± 0.04ABa	0.21 ± 0.02Ca
70~80	0.24 ± 0.02Ba	0.23 ± 0.04Bab	0.20 ± 0.01Bc	0.24 ± 0.04Ba	0.21 ± 0.03Cbc
80~90	0.24 ± 0.02Ba	0.23 ± 0.04Bab	0.20 ± 0.01Bc	0.23 ± 0.04Bab	0.20 ± 0.02Cbc
90~100	0.24 ± 0.03Ba	0.23 ± 0.04Ba	0.20 ± 0.01Bb	0.24 ± 0.04Ba	0.20 ± 0.02Cb

表7 不同密度下各层土壤有效磷含量

Table 7 Soil available P in different layers under different stand densities

mg · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	2.29 ± 0.82Aa	1.89 ± 0.66Aa	2.21 ± 0.81Aa	1.58 ± 0.70Aa	1.88 ± 0.55Aa
10~20	0.82 ± 0.34Bab	1.04 ± 0.35Bab	1.30 ± 0.83Ba	0.73 ± 0.35Bb	1.02 ± 0.31Bab
20~30	0.63 ± 0.24Ca	0.56 ± 0.16Ca	0.78 ± 0.48Ca	0.49 ± 0.26BCa	0.72 ± 0.26Ca
30~40	0.46 ± 0.19CDab	0.37 ± 0.07CDB	0.66 ± 0.45Ca	0.38 ± 0.16CDB	0.52 ± 0.14CDab
40~50	0.32 ± 0.14Db	0.37 ± 0.09CDab	0.53 ± 0.26Ca	0.28 ± 0.08CDB	0.43 ± 0.18DEab
50~60	0.30 ± 0.19Db	0.26 ± 0.08Db	0.56 ± 0.34Ca	0.19 ± 0.05Db	0.40 ± 0.24DEab
60~70	0.26 ± 0.08Db	0.28 ± 0.08Db	0.50 ± 0.39Ca	0.20 ± 0.08Db	0.32 ± 0.08DEb
70~80	0.21 ± 0.09Db	0.19 ± 0.07Db	0.44 ± 0.25Ca	0.19 ± 0.07Db	0.31 ± 0.06DEb
80~90	0.24 ± 0.14Dab	0.18 ± 0.05Db	0.38 ± 0.32Ca	0.19 ± 0.07Db	0.33 ± 0.08DEab
90~100	0.18 ± 0.08Db	0.27 ± 0.14Dab	0.39 ± 0.34Ca	0.21 ± 0.10Dab	0.23 ± 0.09Eab

全磷含量随土壤深度的增加而下降,5种密度林分在0~10 cm土层中的全磷含量高于10 cm以下土层;A密度0~10 cm土层中的全磷含量与10 cm以下土层的差异显著($P < 0.05$),10~100 cm土层的全磷含量变化较小;在B、E密度林分中,0~10 cm土层的全磷含量均显著高于30 cm以下土层($P < 0.05$)。随土壤深度的增加,有效磷含量逐渐

下降,在0~30 cm土层中,这种下降趋势比全磷更明显,且在0~20 cm土层间垂直下降趋势更明显($P < 0.05$)。

3.5 土壤全钾与速效钾

由表8可知:除40~50、50~60 cm土层外,各层土壤的全钾含量随密度的增加总体呈先下降后上升的趋势。D、E密度林分土壤的全钾含量高于其它

3种密度,B密度林分土壤的全钾含量最低,E密度的最高,且10~20、20~30、30~40、40~50、60~70、70~80、90~100 cm土层E密度的全钾含量均显著高于B密度($P < 0.05$)。这表明,高密度林分有利于土壤全钾的积累。土壤中速效钾含量随密度的增加总体呈先上升后下降的趋势(表9),D密度林分土壤的速效钾含量最高(10~20 cm除外),并在70~80、80~90 cm土层中,显著高于其他4种密度($P < 0.05$)。

全钾含量随土壤深度的增加总体呈缓慢增加趋势,除B密度外,其它密度土壤的全钾含量在不同土层间均差异不显著;而速效钾含量随土壤深度的增

加呈明显下降趋势,其中,0~30 cm土层的速效钾含量随土壤深度的增加下降较快,且0~10 cm到10~20 cm土层存在突降现象。方差分析表明:0~10 cm土层的速效钾含量显著高于10~20 cm及以下土层($P < 0.05$)。此外,不同密度林分土壤的速效钾含量随土壤深度的变化不同,A密度在50~100 cm土层中的速效钾含量差异不显著,B、C密度在40~100 cm不同土层的速效钾含量差异不显著,而在D密度,这种现象出现在30~100 cm,表明相对高密度林分的土壤速效钾含量稳定层更接近表土层,而低密度林分土壤速效钾含量具有更深的变化层。

表8 不同密度下各层土壤的全钾含量

Table 8 Soil total K in different layers under different stand densities

$g \cdot kg^{-1}$

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	1.26 ± 0.13Aa	0.93 ± 0.18BCa	1.00 ± 0.24Aa	1.49 ± 0.96Aa	1.62 ± 1.08Aa
10~20	1.16 ± 0.25Aab	0.91 ± 0.15Cb	0.95 ± 0.22Ab	1.56 ± 0.88Aab	1.64 ± 1.12Aa
20~30	1.27 ± 0.23Aab	0.95 ± 0.16ABCb	1.02 ± 0.24Aab	1.49 ± 0.77Aab	1.66 ± 1.19Aa
30~40	1.30 ± 0.28Aab	0.98 ± 0.20ABCb	1.16 ± 0.22Aab	1.59 ± 0.82Aab	1.73 ± 1.15Aa
40~50	1.28 ± 0.31Aab	1.01 ± 0.22ABCb	1.15 ± 0.25Aab	1.59 ± 0.80Aa	1.48 ± 0.44Aa
50~60	1.34 ± 0.25Aab	1.04 ± 0.21ABCb	1.15 ± 0.24Aab	1.55 ± 0.73Aa	1.45 ± 0.40Aab
60~70	1.42 ± 0.27Aab	1.06 ± 0.18ABCb	1.16 ± 0.26Ab	1.62 ± 0.72Aab	1.87 ± 1.21Aa
70~80	1.32 ± 0.26Aab	1.09 ± 0.18ABCb	1.20 ± 0.23Aab	1.63 ± 0.77Aab	1.87 ± 1.17Aa
80~90	1.42 ± 0.32Aa	1.16 ± 0.23Aa	1.19 ± 0.28Aa	1.62 ± 0.81Aa	1.87 ± 1.16Aa
90~100	1.42 ± 0.26Aab	1.14 ± 0.23ABb	1.20 ± 0.17Ab	1.64 ± 0.74Aab	1.88 ± 1.02Aa

表9 不同密度下各层土壤的速效钾含量

Table 9 Soil available K in different layers under different stand densities

$mg \cdot kg^{-1}$

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	26.41 ± 6.19Aa	23.72 ± 6.44Aa	28.70 ± 7.13Aa	30.06 ± 11.45Aa	24.59 ± 7.25Aa
10~20	15.38 ± 1.81Ba	18.04 ± 5.63Ba	20.68 ± 8.75Ba	19.72 ± 7.70Ba	17.18 ± 5.20Ba
20~30	11.88 ± 1.56Cb	11.87 ± 2.48Cb	14.61 ± 5.09Cab	18.91 ± 7.28Ba	14.57 ± 6.60BCab
30~40	10.70 ± 1.75CDb	9.44 ± 1.08CDb	12.29 ± 3.92CDab	14.81 ± 6.53BCa	11.74 ± 2.06CDab
40~50	9.54 ± 1.89CDab	8.19 ± 0.93DEb	10.25 ± 2.93CDEab	13.30 ± 7.02BCa	10.09 ± 2.42DEab
50~60	8.96 ± 2.86DEFab	7.70 ± 1.01DEb	10.06 ± 3.35CDEab	11.69 ± 6.46BCa	9.84 ± 2.81DEab
60~70	7.81 ± 1.21EFb	6.99 ± 0.94DEb	9.83 ± 3.22CDEab	14.73 ± 9.35BCa	10.28 ± 4.90DEab
70~80	7.24 ± 1.00EFb	6.69 ± 0.89DEb	7.99 ± 1.95DEb	14.46 ± 7.24BCa	9.46 ± 3.82DEb
80~90	6.59 ± 1.32Fb	6.09 ± 0.75Eb	7.42 ± 2.01Eb	10.53 ± 5.76Ca	7.41 ± 2.10DEb
90~100	7.09 ± 1.19EFb	6.11 ± 1.26Eb	7.01 ± 1.85Eb	10.29 ± 5.52Ca	6.91 ± 1.53Eb

3.6 土壤钙、镁、铁

由表10、11可知:不同密度间各土层的交换性钙、镁含量均存在一定差异,B密度林分0~30 cm土层的交换性钙含量低于其它4种密度,但方差分析结果表明,密度对土壤交换性钙、镁含量影响不显

著。随土壤深度的增加土壤交换性钙、镁含量总体呈下降的变化趋势,绝大多数密度林分0~10 cm土层的交换性钙、镁含量显著高于10~20 cm及以下土层($P < 0.05$),交换性钙含量在10~100 cm各土层间差异不显著。

表 10 不同密度下各层土壤的交换性钙含量

Table 10 Soil exchangeable Ca in different layers under different stand densities

mg · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	61.65 ± 17.80Aa	44.34 ± 11.08Aa	60.82 ± 29.79Aa	52.88 ± 15.60Aa	46.87 ± 12.69Aa
10~20	42.71 ± 10.34Ba	34.82 ± 6.01ABa	38.73 ± 17.27Ba	40.21 ± 8.17Ba	36.08 ± 9.55ABa
20~30	36.83 ± 17.78Ba	29.22 ± 6.16Ba	34.63 ± 14.19Ba	40.22 ± 15.55Ba	32.34 ± 11.71Ba
30~40	38.66 ± 11.38Ba	32.25 ± 15.94Ba	36.06 ± 18.45Ba	31.84 ± 11.91Ba	32.83 ± 14.61Ba
40~50	33.85 ± 9.46Ba	29.85 ± 9.65Ba	29.81 ± 12.18Ba	32.47 ± 7.61Ba	37.10 ± 22.24ABa
50~60	33.89 ± 6.61Ba	31.93 ± 11.82Ba	31.08 ± 10.19Ba	28.89 ± 5.39Ba	29.12 ± 11.53Ba
60~70	37.34 ± 19.68Ba	33.60 ± 11.19Ba	36.22 ± 17.44Ba	39.28 ± 19.33Ba	29.28 ± 9.31Ba
70~80	35.29 ± 16.02Ba	30.79 ± 7.59Ba	29.04 ± 11.54Ba	35.69 ± 11.23Ba	27.01 ± 9.73Ba
80~90	28.80 ± 2.86Ba	26.34 ± 8.11Ba	27.88 ± 10.99Ba	30.13 ± 9.78Ba	26.14 ± 13.13Ba
90~100	32.68 ± 9.11Ba	29.30 ± 12.75Ba	27.97 ± 10.69Ba	32.01 ± 10.84Ba	26.08 ± 5.79Ba

表 11 不同密度下各层土壤的交换性镁含量

Table 11 Soil exchangeable Mg in different layers under different stand densities

mg · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	7.89 ± 1.21Aa	6.82 ± 1.79Aa	7.77 ± 1.36Aa	7.76 ± 2.6Aa	6.27 ± 1.01Aa
10~20	5.20 ± 1.04Ba	4.72 ± 0.56Ba	5.60 ± 2.14Ba	5.00 ± 1.50Ba	4.92 ± 2.01ABa
20~30	4.17 ± 1.06CDa	3.77 ± 0.61BCa	4.41 ± 1.15BCa	4.56 ± 2.01Ba	3.76 ± 1.09BCa
30~40	4.31 ± 0.80Ca	3.64 ± 1.04BCa	4.48 ± 1.87BCa	3.68 ± 1.90Ba	4.11 ± 2.36BCa
40~50	3.63 ± 0.51CDa	3.34 ± 0.90Ca	3.87 ± 1.21Ca	3.74 ± 1.20Ba	3.93 ± 1.77BCa
50~60	3.79 ± 0.67CDa	3.87 ± 1.06BCa	4.43 ± 1.25BCa	3.44 ± 1.40Ba	4.01 ± 1.36BCa
60~70	3.94 ± 1.30CDa	4.13 ± 1.59BCa	4.82 ± 1.74BCa	3.90 ± 1.27Ba	3.84 ± 1.22BCa
70~80	3.76 ± 0.98CDa	3.76 ± 1.40BCa	4.23 ± 1.44BCa	4.46 ± 1.78Ba	3.62 ± 1.56BCa
80~90	3.23 ± 0.33Da	3.11 ± 0.90BCa	3.96 ± 1.37Ca	3.53 ± 1.25Ba	3.06 ± 1.32Ca
90~100	3.35 ± 0.62CDa	3.35 ± 1.57Ca	3.78 ± 1.06Ca	3.84 ± 1.63Ba	3.09 ± 0.94Ca

由表 12 可看出:A、C 密度 0~30 cm 土层的有效性铁含量高于 B、D、E 密度的,0~10 cm 土层的有效性铁含量,除 A 密度的显著高于 B、E 密度的外($P < 0.05$),其它密度间均差异不显著。与交换性钙、镁相比,有效性铁随土层深度的增加而下降的趋势更明显;0~10、10~20、20~30 cm 土层的有效

性铁由上而下依次显著下降($P < 0.05$);A、C 密度在 0~30 cm 土层的有效性铁含量显著高于 30~100 cm 各土层的有效性铁含量($P < 0.05$);5 种密度林分 40~100 cm 各土层的有效性铁含量差异不显著。从下降量看,60~100 cm 土层的有效性铁含量比 0~10 cm 土层的下降了 20~30 倍。

表 12 不同密度下各层土壤的有效性铁含量

Table 12 Soil available Fe in different layers under different stand densities

mg · kg⁻¹

土层 Soil layers/cm	初植密度 Planting density/(tree · hm ⁻²)				
	A(1 667)	B(3 333)	C(5 000)	D(6 667)	E(10 000)
0~10	108.21 ± 19.33Aa	80.52 ± 17.12Ab	101.91 ± 25.01Aab	93.76 ± 37.43Aab	80.59 ± 25.39Ab
10~20	65.02 ± 15.99Ba	52.88 ± 18.60Ba	63.68 ± 22.51Ba	50.67 ± 17.13Ba	49.39 ± 21.38Ba
20~30	30.73 ± 13.34Ca	26.99 ± 15.43Ca	29.17 ± 14.31Ca	27.86 ± 12.14Ca	28.07 ± 15.66Ca
30~40	16.39 ± 8.23Da	15.43 ± 11.35CDa	15.71 ± 5.39Da	16.63 ± 6.31CDa	17.31 ± 11.24CDa
40~50	12.14 ± 7.41DEa	9.21 ± 4.34Da	9.17 ± 2.89Da	10.10 ± 2.40Da	11.71 ± 8.29Da
50~60	11.09 ± 11.83DEa	6.21 ± 2.35Da	8.32 ± 4.98Da	6.49 ± 1.41Da	9.20 ± 5.79Da
60~70	5.50 ± 2.36Ea	4.72 ± 1.33Da	8.56 ± 8.53Da	5.91 ± 1.77Da	7.21 ± 4.65Da
70~80	5.32 ± 3.10Ea	4.06 ± 0.89Da	5.03 ± 1.18Da	5.30 ± 1.79Da	5.42 ± 3.40Da
80~90	4.12 ± 1.85Ea	2.99 ± 0.77Da	4.46 ± 1.33Da	4.33 ± 1.32Da	5.43 ± 4.43Da
90~100	3.50 ± 1.14Ea	2.87 ± 1.54Da	3.67 ± 0.79Da	4.13 ± 1.11Da	4.20 ± 2.80Da

3.7 土壤养分与林分密度的相关性分析

由表 13 可知:从土壤养分和林分密度的相关系

数看,土壤 pH 值、全钾、速效钾与林分密度呈极显著正相关,全磷与林分密度呈极显著负相关,其它养分

与林分密度不显著相关,其中,有机质、全氮、碱解氮、交换性钙、交换性镁、有效性铁与林分密度的相关系数均为负值。从土壤养分与土层的相关系数看,土壤

有机质、全氮、全磷、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、镁、有效性铁与土层呈极显著负相关,全钾与土层呈显著负相关,pH值与土层呈极显著正相关。

表 13 土壤养分与林分密度的相关性系数

Table 13 the correlation analysis of soil nutrition and density

	pH	有机质	全氮	全磷	全钾	碱解氮	有效磷	速效钾	交换性钙	交换性镁	有效性铁	密度	土层
pH	1												
有机质	-0.165 **	1											
全氮	-0.107 *	0.959 **	1										
全磷	0.049	0.409 **	0.438 **	1									
全钾	0.301 **	-0.161 **	-0.110 *	0.169 **	1								
碱解氮	-0.102 *	0.935 **	0.914 **	0.393 **	-0.104 *	1							
有效磷	-0.103 *	0.859 **	0.837 **	0.292 **	-0.178 **	0.821 **	1						
速效钾	0.003	0.728 **	0.737 **	0.442 **	0.158 **	0.769 **	0.660 **	1					
交换性钙	-0.042	0.402 **	0.387 **	0.307 **	0.118 *	0.491 **	0.318 **	0.532 **	1				
交换性镁	0.003	0.597 **	0.595 **	0.219 **	0.039	0.621 **	0.565 **	0.594 **	0.701 **	1			
有效性铁	-0.219 **	0.915 **	0.876 **	0.355 **	-0.150 **	0.896 **	0.830 **	0.700 **	0.451 **	0.572 **	1		
密度	0.335 **	-0.048	-0.015	-0.257 **	0.294 **	-0.040	0.000	0.142 **	-0.071	-0.013	-0.032	1	
土层	0.228 **	-0.822 **	-0.796 **	-0.328 **	0.107 *	-0.798 **	-0.653 **	-0.649 **	-0.365 **	-0.467 **	-0.755 **	0.000	1

注:表中*和**分别表示相关系数达0.05和0.01水平。

Note: The correlation coefficients of * and ** in the table are respectively 0.05 and 0.01.

4 讨论

本研究区域土壤为酸性火山岩和花岗岩发育而成的砖红壤,故土壤pH值较低,为3.5~4.0,呈强酸性,低于杉木生长的土壤pH值4.5~6.5^[19],且pH值随林分密度和土壤深度的增加而增大,因表层土壤枯落物分解产生有机酸所致。低密度和表层土壤的pH值较低,原因是低密度下,林下植被以及凋落物丰富,加上光照充足,温度水分等条件适宜,凋落物分解迅速而产生大量的酸性物质聚集在表层土壤^[20],使得表层土壤的pH值较低,酸性较强。

土壤有机质是植物生长发育提供养分的仓库,其含量与土壤肥力水平密切相关,是评价土壤养分的重要指标之一。森林土壤有机质含量主要取决于凋落物和林下植被的生物量,根据笔者对样地林下植被的调查,A、B低密度林分下,草本和灌木植物丰富,林下植被生物量为9.76~13.56 t·hm⁻²,透光性强,在这样的环境下,土壤动物、微生物及各种酶活性增加^[3],凋落物分解较快,对林地土壤特别是表层土壤肥力有明显的促进作用^[7],因此,表层土壤的有机质含量较高;在C、D、E中高密度条件下,林木竞争激烈,产生大量枯枝落叶,但林下植被发展缓慢,覆盖度较低,不利于凋落物分解,导致有机质含量较低。

土壤中的全氮大部分来源于有机质,所以,二者

变化趋势基本一致,随林分密度的增加缓慢下降。A、B低密度林分的碱解氮和全磷含量较高,这可能与林下植被的种类和覆盖度有关。有学者对杉木和马尾松等树种研究,同样发现低密度林分的土壤肥力优于中高密度林分^[21-22]。全钾和速效钾含量随密度的增加变化不规律,E密度林分土壤的全钾含量最高,而D密度林分土壤的速效钾含量最高。土壤全氮、碱解氮、有效磷和速效钾含量随土壤深度的增加显著下降,而土壤全钾含量变化趋势与前者不同,随土壤深度的增加缓慢上升,可能与成土母岩有关。这与王纪杰等^[23]对不同林龄巨尾桉人工林土壤养分土层效应研究结果相似。不同土壤深度全磷含量保持稳定,由于磷的迁移率很小,不易从剖面上层淋溶下移^[24]。

钙、镁和铁作为土壤中含量较高的微量元素,对植物细胞以及叶绿体的结构和功能有重要作用。A密度林分土壤中的交换性钙和有效性铁含量最高,但交换性钙、镁及有效性铁的含量与大部分土壤养分含量的变化趋势一致,随土层深度的增加,均呈明显的下降趋势。由于分解后营养元素富集在土壤表层,0~10 cm土层中的养分含量明显高于其余土层,且上层土壤的养分含量随密度变化规律性较强,很多研究也表现出相同的规律^[25-28]。

从以上分析得出,杉木人工成熟林大多数土层的有机质、全氮、碱解氮、全磷、有效性铁含量在A、B

低密度林分土壤中最高,且在0~30 cm土层中随密度的增加总体呈下降的变化趋势。土壤有效磷含量随林分密度的增大更多地表现为先增加后减少,且在C密度(5 000株·hm⁻²)林分中含量最高;土壤的pH值、全钾、速效钾随林分密度的增加呈上升的变化趋势,且A密度(1 667株·hm⁻²)林分土壤的pH值在0~70 cm的土壤中显著低于其他4种密度($P < 0.05$);交换性钙、镁含量随密度的变化较小。土壤有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾、交换性钙、交换性镁和有效性铁含量均随土层深度的增加而明显下降,土壤pH值和全钾含量随土层深度的增加而上升,其中,交换性钙、镁在0~10 cm土层与其以下土层间存在突降现象,有机质、全氮、碱解氮、有效磷、速效钾在0~30 cm土层内急剧下降,有效性铁在0~40 cm土层内急剧下降;此外,高密度林分下,更多下层土壤的pH值、速效钾和有效性铁含量随土壤深度的增加无显著变化,密度对土壤养分含量的垂直变化有一定的影响。

5 结论

通过对广西大青山5种初植密度的37年生杉木成熟林不同土层土壤养分变化规律的分析,发现林分密度对杉木人工成熟林的土壤养分含量具有明显影响,低密度(1 667株·hm⁻²)有利于杉木在由幼龄林到成熟龄林的生长发育期内土壤有机质、全氮、碱解氮、全磷以及有效性铁的积累,而中密度(5 000株·hm⁻²)有利于有效磷的累积,高密度则利于全钾、速效钾的累积。总体上,低密度更有利于杉木人工林土壤肥力的长期维持。不同养分元素在土壤剖面的纵向渐变规律不一,密度对杉木林土壤养分的影响深度可达60 cm。考虑到0~30 cm土层多种养分元素的剧烈变化,南亚热带杉木林土壤剖面研究至少要到40 cm深度。

参考文献:

[1] Wang Q K, Wang S L, Zhang J W. Assessing the effects of vegetation types on carbon storage fifteen years after reforestation on a Chinese fir site[J]. *Forest Ecology and Management*, 2009, 258(7): 1437-1441.

[2] Zuo S D, Ren Y, Wang X K, et al. Biomass estimation factors and their determinants of *Cunninghamia lanceolata* forests in China[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2014, 50(11): 1-12.

[3] 盛炜彤,杨承栋,范少辉. 杉木人工林的土壤性质变化[J]. *林业科学研究*, 2003, 16(4): 377-385.

[4] 盛炜彤,范少辉. 杉木及其人工林自身特性对长期立地生产力的

影响[J]. *林业科学研究*, 2002, 15(6): 629-636.

[5] 胡亚利,孙向阳,张建国,等. 杉木人工林土壤养分变化规律[J]. *河北林业科技*, 2007(1): 9-11.

[6] 方禄明. 福建省将乐县杉木人工林林地土壤养分状况[J]. *福建林业科技*, 2016, 43(3): 138-143.

[7] 林开敏,俞新妥,洪伟,等. 杉木人工林下植物对土壤肥力的影响[J]. *林业科学*, 2001, 37(z1): 94-98.

[8] 王刚. 杉木人工林土壤肥力指标及其评价[D]. 南京:南京林业大学, 2008.

[9] 俞元春,邓西海,盛炜彤,等. 杉木连栽对土壤物理性质的影响[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2000, 24(6): 36-40.

[10] 吕理兴. 杉木人工林连栽地力下降的原因及保持地力的途径[J]. *广东科技*, 2011(24): 76-77.

[11] 王东,王艳平,陈信力,等. 间伐对杉木人工林土壤理化性质的季节影响[J]. *水土保持研究*, 2015, 22(2): 69-73.

[12] 赵朝辉,方晰,田大伦,等. 间伐对杉木林林地地被物生物量及土壤理化性质的影响[J]. *中南林业科技大学学报*, 2012, 32(5): 102-107.

[13] 郭琦,王新杰,衣晓丹. 不同林龄杉木纯林林下生物量与土壤理化性质的相关性[J]. *东北林业大学学报*, 2014, 42(3): 85-88, 98.

[14] 苏木荣,张卫强,洗伟光,等. 南亚热带不同林龄杉木针阔混交林土壤理化性质分析[J]. *林业与环境科学*, 2014, 30(5): 43-47.

[15] 盛炜彤. 杉木林的密度管理与长期生产力研究[J]. *林业科学*, 2001, 37(5): 2-9.

[16] 黄永诚. 密度对杉木人工林林下植物和土壤肥力的影响[J]. *安徽农学通报*, 2007, 13(11): 94-95.

[17] 孙德权. 不同强度间伐对辽东蒙古栎林及杂木林土壤理化性质的影响[J]. *防护林科技*, 2016(1): 46-49.

[18] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京:中国农业出版社, 2000: 25-114.

[19] 陈世友. 杉木栽培技术的探讨[J]. *现代园艺*, 2014(16): 43-43.

[20] 王岳,王海燕,李旭,等. 不同密度下近天然落叶松云冷杉林各土层土壤理化特征[J]. *草业科学*, 2014, 31(8): 1424-1429.

[21] 黄新荣,黄承标,覃其云,等. 不同密度马尾松人工林土壤肥力的差异[J]. *贵州农业科学*, 2015, 43(1): 135-139.

[22] 刘勇,李国雷,李瑞生,等. 密度调控对油松人工林土壤肥力的影响[J]. *西北林学院学报*, 2008, 23(6): 18-23.

[23] 王纪杰,王炳南,李宝福,等. 不同林龄巨尾桉人工林土壤养分变化[J]. *福建林学院学报*, 2016, 36(1): 8-14.

[24] 史吉平,张夫道,林葆. 长期施用氮磷钾化肥和有机肥对土壤氮磷钾养分的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 1998(1): 7-10.

[25] 渠开跃,代力民,冯慧敏,等. 辽东山区不同林型土壤有机质和NPK分布特征[J]. *土壤通报*, 2009, 40(3): 558-562.

[26] 张景,蒋新革,何介南,等. 森林土壤有机碳含量与不同形态氮含量的相关性[J]. *中南林业科技大学学报*, 2013, 33(7): 114-118.

[27] 贺志龙,张芸香,郭跃东,等. 不同密度华北落叶松林天然林土壤养分特征研究[J]. *生态环境学报*, 2017, 26(1): 43-48.

[28] 孙嘉,王海燕,丁国栋,等. 不同密度华北落叶松人工林土壤理化性质研究[J]. *林业资源管理*, 2011(1): 62-66.

(责任编辑:徐玉秀)