中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响

于文睿南，潘　畅，郭佳欢，冯会丽，陈　杰，俞元春

Topsoil organic matter and its effect on the soil nutrients contents of *Cunninghamia lanceolata* plantations

YUWEN Ruinan, PAN Chang, GUO Jiahuan, FENG Huili, CHEN Jie, and YU Yuanchun

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13930/j.cnki.cjea.210211

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

短期增温及减少降雨对杉木人工林土壤DOM的数量及其光谱学特征的影响

Effects of short-term global warming and precipitation reduction on the quantity and spectral characteristics of soil DOM in *Cunninghamia lanceolata* plantation

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(7): 949-957

基于改进OK模型的土壤有机质空间分布预测——以宜都市红花套镇为例

Prediction of spatial distribution of soil organic matter based on improved OK models: A case study of Honghuatao Town in Yidu City

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(1): 131-141

离子界面行为在土壤有机无机复合体形成中的作用

The role of ionic interfacial behaviors in formation of soil organic-inorganic complexes

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(11): 1682-1691

冬小麦免耕覆盖与有机栽培对土壤微生物群落组成的影响

Effects of no-tillage, mulching and organic fertilization on soil microbial com-position in winter wheat field

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(2): 267-276

耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响

Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(2): 258-266

不同培肥方式对土壤有机碳与微生物群落结构的影响

Effect of fertilization managements on soil organic carbon and microbial community structure

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(12): 1866-1875

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2021 年 11 月 第 29 卷 第 11 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Nov. 2021, 29(11): 1931−1939

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.210211

于文睿南, 潘畅, 郭佳欢, 冯会丽, 陈杰, 俞元春. 杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2021, 29(11): 1931−1939

YUWEN R N, PAN C, GUO J H, FENG H L, CHEN J, YU Y C. Topsoil organic matter and its effect on the soil nutrients contents of *Cunninghamia lanceolata* plantations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(11): 1931−1939

杉木人工林表土有机质含量及其对土壤养分的影响*

于文睿南[1], 潘　畅[1], 郭佳欢[1], 冯会丽[1], 陈　杰[2], 俞元春[1**]

(1. 南京林业大学南方现代林业协同创新中心/南京林业大学生物与环境学院 南京　210037; 2. 福建省建阳范桥国有林场　南平　354200)

摘　要: 土壤有机质在森林生态系统中具有重要作用, 是估算土壤碳储量、评价土壤肥力和质量的重要指标。本文利用已发表文献中的数据, 从省域尺度上分析了杉木人工林土壤有机质的分布特征及其对土壤养分含量的影响, 为杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 人工林可持续经营提供理论依据。本文以文献中广东、广西、湖南、江西、浙江、福建 6 省 22 个林场 1092 个研究数据为基础, 分析了我国杉木人工林主产区表层 (0~20 cm) 土壤有机质含量特征、对土壤类型和地形等的响应及其对土壤养分的影响。结果显示, 杉木人工林表层土壤有机质平均含量为 (31.02±13.44) g·kg^{-1}, 养分等级为中, 变异系数为 43.33%, 属中等变异水平; 有效磷含量为 (5.41±8.01) mg·kg^{-1}, 养分等级为富, 属高度变异, 变异系数为 148.06%; 全磷含量 (0.49±0.38) g·kg^{-1}, 养分等级为极贫, 变异系数为 77.55%, 属中等变异。不同土壤类型有机质含量差异较大, 山地黄壤的含量最高, 为 (46.63±16.88) g·kg^{-1}, 暗红壤最低, 为 (15.81±4.38) g·kg^{-1}。林分密度、海拔、坡度和土壤 pH 是杉木人工林表土有机质含量变化的主要影响因素, 相对贡献量分别为−0.35、0.28、0.11 和 0.11。土壤有机质对全氮、有效氮、全钾、有效钾的贡献程度较高, 相对贡献量分别为 0.17、0.47、0.16 和 0.21。结果表明: 杉木人工林表层土壤有机质的养分等级为中。从样本量占比区间来看, 杉木人工林表层土壤有机质分布等级较为集中, 主要分级表现出“多中下, 少富级, 无极贫”的分布特征。海拔、坡度和土壤 pH 对土壤有机质含量变化的影响表现出明显的正效应, 林分密度则为负效应; 土壤有机质对土壤全氮、有效氮、全钾、有效钾含量有较明显的正面促进作用, 对全磷具有微弱的负面影响。

关键词: 杉木人工林; 土壤有机质; 土壤养分; 环境因子; 逐步回归分析; 结构方程模型

中图分类号: S714.2　　**开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Topsoil organic matter and its effect on the soil nutrients contents of *Cunninghamia lanceolata* plantations*

YUWEN Ruinan[1], PAN Chang[1], GUO Jiahuan[1], FENG Huili[1], CHEN Jie[2], YU Yuanchun[1**]

(1. Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing Forestry University / College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 2. Jianyang Fanqiao State-owned Forest Farm, Nanping 354200, China)

Abstract: Soil organic matter plays an important role in forest ecosystems and is an important index for estimating soil carbon storage and soil fertility and quality. In this study, the distribution of soil organic matter and its influence on soil nutrients were analyzed on a provincial scale and the impact of environmental factors on changes in the soil organic matter content of Chinese fir plantations

* 国家重点研发计划项目 (2016YFD0600304) 和江苏高校优势学科建设工程项目 (PAPD) 资助

** 通信作者: 俞元春, 主要从事森林土壤研究。E-mail: ycyu@njfu.edu.cn

于文睿南, 主要从事土壤生态研究。E-mail: 853255684@qq.com

收稿日期: 2021-04-07　接受日期: 2021-06-23

* This study was supported by the National Key Research and Development Project of China (2016YFD0600304) and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions (PAPD).

** Corresponding author, E-mail: ycyu@njfu.edu.cn

Received Apr. 7, 2021; accepted Jun. 23, 2021

(CFPs) was assessed to provide a theoretical basis for the sustainable management of CFPs. Data from 1092 forest farms in six provinces of China (Guangdong, Guangxi, Hunan, Jiangxi, Zhejiang, and Fujian) were used to characterize the distribution of soil organic matter and its effect on the soil nutrients in the topsoil (0–20 cm) in CFPs. The results showed that the average soil organic matter content of the CFPs was 31.02±13.44 $g \cdot kg^{-1}$, the nutrient grade was at a medium level, and the coefficient of variation was 43.33%, which represented a moderate variation level. The available phosphorus (AP) content was 5.41±8.01 $mg \cdot kg^{-1}$, the nutrient grade was rich, and the coefficient of variation was as high as 148.06%. The total phosphorus (TP) content was 0.49±0.38 $g \cdot kg^{-1}$, which was extremely poor, and the coefficient of variation was 77.55%, being moderately variable. The soil organic matter content of different soil types varied greatly. The content in mountain yellow soil was the highest (46.63±16.88 $g \cdot kg^{-1}$), and that in dark red soil was the lowest (15.81±4.38 $g \cdot kg^{-1}$). Stand density, elevation, slope, and soil pH were the main factors that affected the soil organic matter content in the topsoil of CFPs, with relative contributions of −0.35, 0.28, 0.11, and 0.11, respectively. The contributions of soil organic matter to total nitrogen (TN), available nitrogen (AN), total potassium (TK), and available potassium (AK) were positive, with relative contributions of 0.17, 0.47, 0.16, and 0.21, respectively. However, soil organic matter contributes less to soil TP, with a relative contribution of −0.09. In general, the nutrient grade of soil organic matter in the surface layer of CFPs was medium. The main grading performance was mainly characterized by moderate to inferior levels, and few rich levels and no extremely poor levels were observed. Altitude, slope, and soil pH had positive effects on soil organic matter, whereas stand density had a negative effect. Soil organic matter had a positive effect on soil TN, AN, TK, and AK and a weak negative effect on TP. The contribution of soil organic matter to TP was low; therefore, the lack of phosphorus in the soil may be the main factor limiting Chinese fir growth.

Keywords: Chinese fir plantations; Soil organic matter; Soil nutrients; Environmental factor; Stepwise regression analysis; Structural equation model

杉木 (*Cunninghamia lanceolata*) 是我国重要的速生用材树种, 具生长快、材质好、用途广等特点, 目前栽植面积占全国人工林面积的 30% 以上, 在我国林业生产和森林生态系统中发挥着重要作用[1-3]。然而, 随着栽植面积的不断扩大, 长期不合理的营林措施导致杉木人工林不同程度地出现了土壤肥力下降[4]、生产力降低[5]、土壤微生物群落结构和分解活动退化[6] 等严峻问题, 森林土壤质量退化严重威胁着我国杉木人工林的发展。

土壤有机质是土壤中含碳有机化合物的总称, 是土壤的重要组成物质, 与包括氮 (N)、磷 (P)、钾 (K) 等营养元素在内, 都是评价土壤肥力和质量的重要指标[7-9]。森林土壤有机质不仅是土壤有机养分库, 也是土壤无机养分库, 它不但以有机物形式储存矿质元素, 而且还以离子吸附方式保持一部分速效养分[10]。依据森林土壤功能与其组成、结构性质一致性原理[11], 森林土壤质量下降, 表明森林土壤的组成、结构发生了变化, 土壤性质发生了恶化, 这种变化在表层土壤中表现的尤为明显[12]。土壤有机质是土壤肥力的核心, 有机质含量的高低, 在某种程度上代表着土壤肥力水平[13]。因此, 研究杉木人工林表层土壤有机质的分布特征及其对林地土壤养分含量的影响, 对于防治杉木人工林土壤质量下降, 提高森林土壤生产力, 进而提高林木产量显得十分必要。

目前, 已有不少学者对森林土壤有机质进行了研究, 主要集中在有机质与酶活性的关系[14]、有机质数量与光谱学特征[15]、有机质与团聚体稳定性关系[16] 等方面的研究, 但是关于杉木人工林土壤有机质的分布特征及其对土壤养分含量变化影响的系统研究较少。王清奎等[17] 对杉木人工林土壤可溶性有机质中的可溶性有机碳 (DOC) 和可溶性有机氮 (DON) 与土壤养分的关系进行了研究, DOC 和 DON 与土壤全氮、全钾和速效钾的相关性均达极显著水平, 但土壤全氮、全钾和速效钾与 DOC 的相关性高于与 DON 的相关性, 而铵态氮与 DOC 的相关程度低于与 DON 的相关程度。刘飞鹏等[18] 研究了华南 3 种人工林土壤有机质和养分含量并对其进行了评价, 其中杉木林表层 (0~20 cm) 土壤有机质含量处于中上或富水平, 且土壤有机质、全氮、碱解氮、速效磷、速效钾、有效锌等呈现明显的表聚现象。以往研究表明, 土壤有机质和养分有明显的表聚现象, 即表层土壤含量高于下层[19], 鉴于此, 本研究以我国杉木主产区的杉木人工林为研究对象, 对其表层土壤有机质的分布特征及其对土壤养分含量的影响展开调查, 探讨环境因子对杉木人工林土壤有机质含量变化的影响, 为揭示土壤有机质对维持杉木人工林土壤肥力的作用机制及制定提高杉木人工林土壤肥力的管理措施提供科学依据。

1 研究方法

1.1 数据来源及选择标准

通过在中国知网 (CNKI) 和 Web of Science 数据库检索主题为“杉木人工林+土壤有机质+土壤养分”的文献后进行筛选, 文献筛选标准如下: 1) 研究

对象为杉木人工林; 2) 试验为实地研究; 3) 对于长期试验不同年份结果的数据, 原则上优选最后年份的数据; 4) 土壤样本包含采样深度为 0~20 cm 的表层土样; 5) 所有数据摘自文本、表格、图表和附录的出版物, 当数据以图形方式呈现时, 采用 Engauge 4.1 软件获取数字数据。经过筛选, 最终获得符合标准的有效文献 45 篇, 研究年份为 2001—2020 年, 提取了 13 种变量, 包含海拔 (altitude)、林分密度 (density)、坡度 (slope)、年平均温度 (MAT)、平均降水量 (MAP)、pH、土壤有机质 (SOM, 土壤有机质的测定方法采用重铬酸钾滴定法)、全氮 (TN)、全磷 (TP)、全钾 (TK)、有效氮 (AN, 指硝态氮和铵态氮)、有效磷 (AP)、有效钾 (AK) 共计 1092 个观测值, 分布于我国 6 个省 (区、市) 的 22 个实验林场 (站点), 涵盖 8 种土类。杉木人工林试验地基本情况如表 1。

表 1　杉木人工林试验地概况

Table 1　General situation of experimental fields of Chinese fir plantations

省份 Province	试验地 Experimental field	土壤类型 Soil type	年份 Year	经纬度 Latitude and longitude
广东 Guangdong	天井山林场 Tianjingshan forest farm	红壤 Red soil	2011	113.0436E, 24.6919N
	梁化林场 Lianghua forest farm	赤红壤 Lateritic red soil	2014	114.7849E, 23.1966N
广西 Guangxi	大桂山林场 Daguishan forest farm	山地红壤 Mountain red soil	2016	111.5358E, 24.4171N
	黄冕林场 Huangmian forest farm	山地红壤 Mountain red soil	2016	109.7645E, 24.4867N
	林朵林场 Linduo forest farm	山地红壤 Mountain red soil	2016	107.1961E, 24.9829N
湖南 Hunan	会同生态站 Huitong ecological station	山地黄壤 Mountain yellow soil	2011	109.6012E, 26.7922N
	黄丰桥林场 Huangfengqiao forest farm	红壤 Red soil	2012	113.4488,E 27.2308N
	广坪林场 Guangping forest farm	山地黄壤 Mountain yellow soil	2006	109.6572E, 26.7572N
江西 Jiangxi	山下林场 Shanxia forest farm	红壤 Red soil	2003	114.6650E, 27.7447N
	上村林场 Shangcun forest farm	黄红壤 Yellow-red soil	2003	115.8537E, 27.7600N
	年珠林场 Nianzhu forest farm	红壤 Red soil	2003	114.5793E, 27.5785N
	大岗山林场 Dagangshan forest farm	红壤 Red soil	2011	114.5814E, 27.5793N
浙江 Zhejiang	丽水林场 Lishui forest farm	红黄壤 Red-yellow soil	2004	119.3744E, 27.8524N
	开化林场 Kaihua forest farm	红壤 Red soil	2018	118.4110E, 29.1459N
福建 Fujian	莘口教学林场 Xinkou teaching forest farm	山地红壤 Mountain red soil	2017	117.5497E, 26.1678N
	宁化林场 Ninghua forest farm	紫壤 Purple soil	2017	116.6971E, 26.2389N
	洋口林场 Yangkou forest farm	山地红壤 Mountain red soil	2017	117.9068E, 26.8177N
	溪后林场 Xihou forest farm	红壤 Red soil	2007	117.9799E, 26.6352N
	将乐林场 Jiangle forest farm	红壤 Red soil	2015	117.4771E, 26.7231N
	旧县林场 Jiuxian forest farm	红壤 Red soil	2001	118.7429E, 27.5378N
	溪东林场 Xidong forest farm	暗红壤 Dark red soil	2017	118.5982E, 27.0881N
	溪后村林场 Xihou Village forest farm	暗红壤 Dark red soil	2015	117.9798E, 26.6389N

1.2　数据分析与作图

相关性分析方法采用 Person 相关性分析, 描述性统计和相关性分析采用 SPSS 18.0, 多因子及互作项逐步回归方程拟合采用 DPS 7.05, 数据处理及作图采用 Excel 2007 和 Origin Pro 7.5, SEM 模型运行采用 Amos 7.0。

2　结果与分析

2.1　土壤有机质与土壤养分含量描述性统计

由土壤环境质量标准[20]可知, 杉木人工林表层土壤氮 N、P、K 元素均没有超过国家规定的标准。数据统计显示, 土壤有机质与 N、P、K 养分含量标准差的值均较高, 这说明不同试验地杉木人工林土壤有机质与 N、P、K 养分含量具有较高的差异性, 波动范围较大 (表 2)。按照反映离散程度的变异系数大小粗略估计的分级, 杉木人工林表层土壤有效磷属于高度变异 (>100%), 其余养分含量均属于中等变异程度 (10%~100%), 这说明杉木人工林表层土壤中有效磷变化更强烈, 它对杉木生长发育变化更加敏感。根据森林土壤养分分级标准[21]定级, 杉木人工林表层土壤有机质含量为 (31.02±13.44) $g\cdot kg^{-1}$, 养分等级为中 (30~40 $g\cdot kg^{-1}$); 全氮平均含量 1.48 $g\cdot kg^{-1}$, 养分等级为中下 (1.0~1.5 $g\cdot kg^{-1}$); 全磷平均含量 0.49 $g\cdot kg^{-1}$, 养分等级为极贫 (<0.5 $g\cdot kg^{-1}$); 全钾平均含量 14.17 $g\cdot kg^{-1}$, 养分等级为贫 (10~20 $g\cdot kg^{-1}$); 有效氮平均含量 120.29 $mg\cdot kg^{-1}$, 养分等级为富 (120~150 $mg\cdot kg^{-1}$); 有效磷平均含量 5.41 $mg\cdot kg^{-1}$, 养分等级为富 (5~10 $mg\cdot kg^{-1}$); 有效钾平均含量 52.13 $mg\cdot kg^{-1}$, 养

表 2 杉木人工林表层土壤有机质与养分含量的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil organic matter and nutrients contents in the topsoil of Chinese fir plantations

土壤性质 Soil property	样本量 Samples	最小值 Minimum	最大值 Maximum	均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficient of variation (%)
有机质 Organic matter ($g·kg^{-1}$)	84	8.14	74.79	31.02	13.44	43.33
全氮 Total N ($g·kg^{-1}$)	84	0.52	11.34	1.48	1.18	79.73
全磷 Total P ($g·kg^{-1}$)	84	0.10	3.31	0.49	0.38	77.55
全钾 Total K ($g·kg^{-1}$)	84	1.14	35.47	14.17	7.11	50.11
有效氮 Available N ($mg·kg^{-1}$)	84	25.80	464.62	120.29	61.68	51.28
有效磷 Available P ($mg·kg^{-1}$)	84	0.03	45.62	5.41	8.01	148.06
有效钾 Available K ($mg·kg^{-1}$)	84	3.30	154.64	52.13	33.44	64.15
pH	84	2.80	5.84	4.60	0.45	9.78

分等级为中下 (50~100 $mg·kg^{-1}$)。

2.2 土壤 pH 与土壤有机质分布特征

根据土壤酸碱度等级划分标准[22], 杉木人工林表层土壤 pH 为 4.60±0.45, 整体表现为强酸性 (pH 4.5~5.5) (表 2)。其中, pH<4.5 的极强酸性的土壤样本数占总样本数量的 36.90%, pH 为 4.5~5.5 的强酸性土壤样本数占总样本数量的 60.72%, pH 为 5.5~6.5 的弱酸性土壤样本占总样本数量的 2.38%, 总样本变异系数为 9.78%, 这说明我国不同地区杉木人工林表层土壤酸碱度波动范围较小 (图 1a)。

根据森林土壤养分分级标准, 我国杉木人工林表层土壤有机质含量平均水平为中级 (30~40 $g·kg^{-1}$)。其中, 有机质含量<6 $g·kg^{-1}$ 的极贫级土壤样本数占总样本数量的 0%, 有机质含量为 6~20 $g·kg^{-1}$ 的贫级土壤样本数占总样本数量的 16.67%, 有机质含量为 20~30 $g·kg^{-1}$ 的中下级土壤样本占总样本数量的 36.90%, 有机质含量为 30~40 $g·kg^{-1}$ 的中级土壤样本占总样本数量的 23.81%, 有机质含量为 40~50 $g·kg^{-1}$ 的富级土壤样本占总样本数量的 13.10%, 土壤有机质含量>50 $g·kg^{-1}$ 的极富级土壤样本占总样本数量的 9.52%。从样本量占比区间来看, 我国不同地区杉木人工林表层土壤有机质分布等级较集中, 主要分级表现呈“多中下, 少富级, 无极贫”的分布特征 (图 1b)。

以地区为分类标准, 不同地区杉木人工林表层土壤 pH 高低顺序为: 浙江>广西>江西>福建>湖南>广东。其中广东省杉木人工林表层土壤 pH 最低, 平均为 4.12, 比综合平均值低 10.43%; 浙江省杉木人工林表层土壤 pH 最高, 平均为 4.98, 比综合平均值高 8.26% (图 2a)。以土壤类型为分类标准[23], 不同土壤类型杉木人工林表层土壤 pH 高低顺序为: 红黄壤>黄红壤>红壤>山地黄壤>山地红壤>紫壤>赤红壤>暗红壤。其中暗红壤的 pH 最低, 平均为 4.16, 比综合平均值低 9.57%; 红黄壤 pH 最高, 平均为 5.04, 比综合平均值高 9.57% (图 2b)。

以地区为分类标准, 不同地区杉木人工林表层土壤有机质含量高低顺序为: 湖南>广东>浙江>江西>广西>福建。其中, 福建省杉木人工林表层土壤有机质含量最低, 平均为 28.72 $g·kg^{-1}$, 比综合平均值低 7.41%; 湖南省杉木人工林表层土壤有机质含量最高, 平均为 45.18 $g·kg^{-1}$, 比综合平均值高 45.65% (图 2c)。以土壤类型为分类标准, 不同土壤类型杉木人工林表层土壤有机质含量高低顺序为: 山地黄壤>山地红壤>红壤>红黄壤>黄红壤>赤红壤>紫壤>暗红壤。其中暗红壤的有机质含量最低, 平均为 15.81 $g·kg^{-1}$, 比综合平均值低 51.06%; 山地黄壤的有机质含量最高, 平均为 46.63 $g·kg^{-1}$, 比综合平均值高

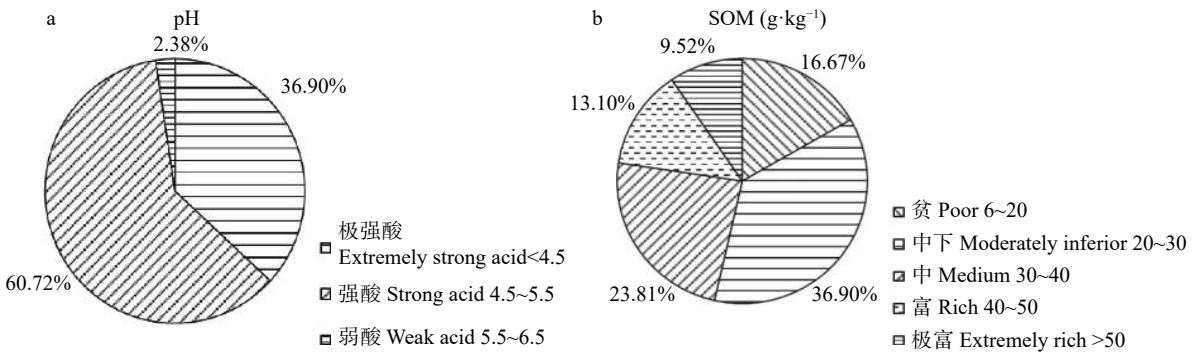

图 1 杉木人工林表层土壤 pH (a) 与土壤有机质 (SOM, b) 含量样本分布

Fig. 1 Samples distribution of surface soil pH (a) and soil organic matter content (SOM, b) in Chinese fir plantations

50.32% (图 2d)。

2.3　SOM 含量与土壤养分含量的关系

根据相关性统计显示 (表 3), 杉木人工林表层土壤有机质与土壤有效氮呈极显著 (P<0.01) 正相关; 土壤全氮与全磷、有效氮、有效钾呈极显著 (P<0.01) 正相关; 土壤全磷与全钾呈极显著 (P<0.01) 负相关, 与有效氮呈显著 (P<0.05) 正相关, 与有效磷呈极显著 (P<0.01) 正相关; 土壤全钾与有效磷呈极显著 (P<0.01) 负相关; 有效氮与有效钾呈显著 (P<0.05) 正相关; 其余指标间虽具有一定的相关性, 但相关性不显著。

采用多因子及互作项逐步回归方程拟合杉木人工林表层土壤有机质含量 (Y) 与全氮 (X_1)、全磷 (X_2)、全钾 (X_3)、有效氮 (X_4)、有效磷 (X_5)、有效钾 (X_6) 等养分因子之间的关系, 以调查土壤养分与有机质之间的关系。从表 4 方程中可以看出, 不同地区的土壤养分因子对杉木人工林表层土壤有机质的影响不同。统计数据显示, 不同方程对土壤有机质含量变

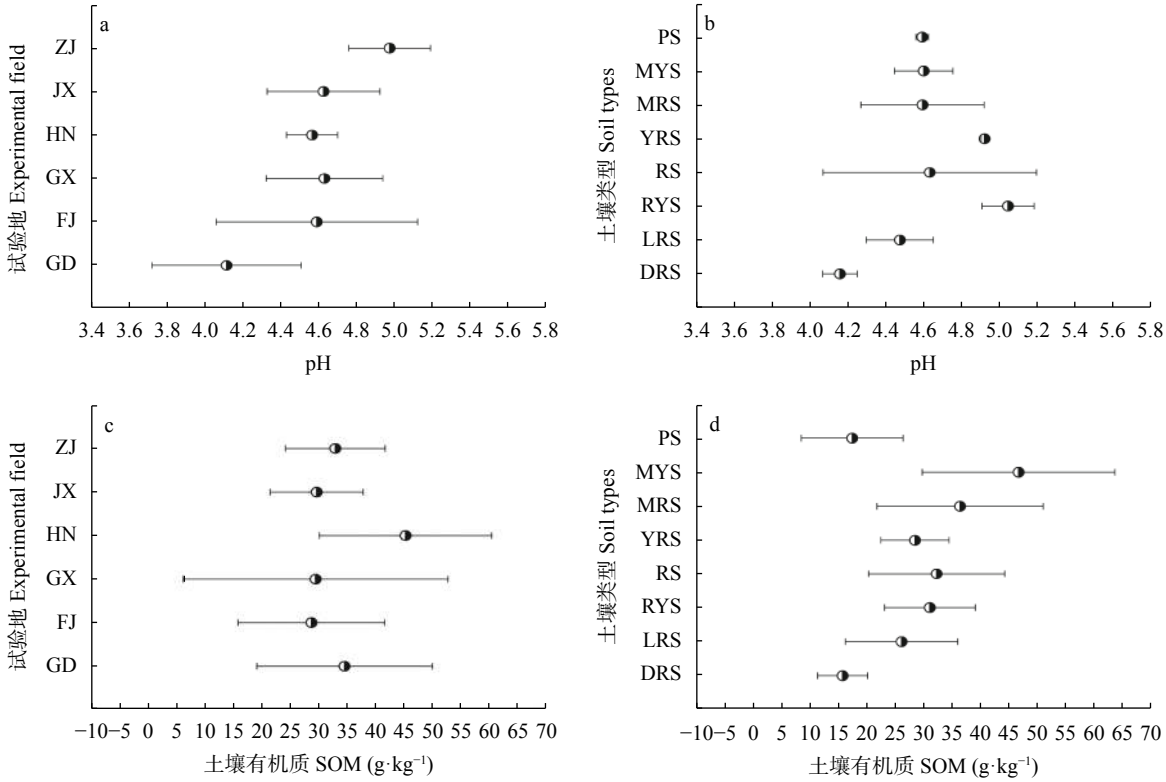

图 2　不同省份 (a, c) 和不同土壤类型 (b, d) 杉木人工林表层土壤 pH(a, b) 与土壤有机质 (SOM; c, d) 含量分布特征

Fig. 2　Distribution characteristics of pH (a, b) and soil organic matter content (SOM; c, d) in the topsoil of Chinese fir plantations of different soil types (b, d) and different provinces (a, c)

ZJ、JX、HN、GX、FJ 和 GD 分别代表浙江省、江西省、湖南省、广西省、福建省和广东省; PS、MYS、MRS、YRS、RS、RYS、LRS 和 DRS 分别代表紫壤、山地黄壤、山地红壤、黄红壤、红壤、红黄壤、赤红壤和暗红壤。ZJ, JX, HN, GX, FJ and GD represent Zhejiang Province, Jiangxi Province, Hunan Province, Guangxi Province, Fujian Province and Guangdong Province, respectively. PS, MYS, MRS, YRS, RS, RYS, LRS and DRS represent purple soil, mountain yellow soil, mountain red soil, yellow-red soil, red soil, red-yellow soil, lateritic red soil and dark red soil, respectively.

表 3　杉木人工林表层土壤有机质与养分指标间的相关性

Table 3　Correlation between soil organic matter and soil nutrients in the topsoil of Chinese fir plantations

变量 Variable	土壤有机质 Soil organic matter	全氮 Total N	全磷 Total P	全钾 Total K	有效氮 Available N	有效磷 Available P	有效钾 Available K
土壤有机质 Soil organic matter	1.000						
全氮 Total N	0.168	1.000					
全磷 Total P	−0.084	0.301**	1.000				
全钾 Total K	0.160	−0.042	−0.281**	1.000			
有效氮 Available N	0.462**	0.305**	0.245*	0.077	1.000		
有效磷 Available P	−0.029	−0.009	0.504**	−0.331**	0.173	1.000	
有效钾 Available K	0.210	0.429**	0.175	−0.078	0.247*	−0.070	1.000

表示在P<0.01水平上极显著相关, *表示在P<0.05水平上显著相关。样本数量为84。 and * indicate significant correlation at P<0.01 and P<0.05 levels, respectively. The number of samples is 84.

化的决定系数分别为 99.91%、92.09%、100.00%、99.62%、87.17%、83.78% 和 100.00%。从解释率上来讲, 方程能够很好地描述土壤养分对有机质的影响。逐步回归分析显示, 广东省杉木人工林土壤有机质含量与全氮 (X_1) 正相关, 与有效氮 (X_4) 负相关; 福建省的杉木人工林有机质含量与全氮×有效钾 (X_1X_6) 正相关, 与有效磷×有效钾 (X_5X_6) 负相关; 广西的杉木人工林土壤有机质与全钾 (X_3)、全磷×有效钾 (X_2X_6)、有效磷×有效钾 (X_5X_6) 均为负相关, 与全氮×有效磷 (X_1X_5) 正相关; 湖南省的杉木人工林有机质与有效磷 (X_5)、全磷×全钾 (X_2X_3) 负相关, 与全磷×有效钾 (X_2X_6)、有效磷×有效钾 (X_5X_6) 正相关; 江西省的杉木人工林土壤有机质与全氮 (X_1)、全磷×有效磷 (X_2X_5) 正相关, 与有效钾 (X_6) 负相关; 浙江省的杉木人工林土壤有机质与全氮 (X_1)、全钾×有效氮 (X_3X_4) 正相关。综合分析显示, 我国杉木人工林表层土壤有机质主要影响因子为全氮 (X_1)、有效磷 (X_5)、全磷×全钾 (X_2X_3)、全钾×有效磷 (X_3X_5) (表 4)。

表 4 不同省份杉木人工林表层土壤有机质含量 (*Y*) 与土壤养分含量 (*X*) 的多因子及互作项逐步回归结果

Table 4 Stepwise regression results of multiple factors and interactions of soil organic matter content (*Y*) and soil nutrients contents (*X*) in the topsoil of Chinese fir plantations in different provinces

省份 Province	拟合方程 Fitting equator	决定系数 Coefficient of determination	剩余通径系数 Residual path coefficient
广东 Guangdong	Y=52.016+101.111X_1−1.118X_4	0.9991	0.0299
福建 Fujian	Y=3.918+0.494X_1X_6−0.0519X_5X_6	0.9209	0.2812
广西 Guangxi	Y=3.948−0.570X_3+18.086X_1X_5−0.072X_2X_6−0.203X_5X_6	1.0000	0.0001
湖南 Hunan	Y=81.848−1.330X_5−5.071X_2X_3+0.309X_2X_6+0.033X_5X_6	0.9962	0.0618
江西 Jiangxi	Y=−2.433+29.916X_1−0.4X_6+8.463X_2X_5	0.8717	0.3581
浙江 Zhejiang	Y=−0.906+15.984X_1+0.01X_3X_4	0.8378	0.4028
综合 Comprehensive	Y=29.848−2.729X_1−2.134X_5+0.105X_2X_3+0.234X_3X_5	1.0000	0.0018

X_1: 全氮; X_2: 全磷; X_3: 全钾; X_4: 有效氮; X_5: 有效磷; X_6: 有效钾。X_1: total N; X_2: total P; X_3: total K; X_4: available N; X_5: available P; X_6: available K.

2.4 土壤有机质对土壤养分的贡献

从结构方程模型的路径系数可见 (图 3), 杉木人工林中表层土壤有机质含量分布受海拔、林分密度、坡度、年平均温度、平均降水量和土壤 pH 等环境因子的共同影响, 其影响路径系数分别为 0.28、−0.35、0.11、−0.08、0.03 和 0.11。与此同时, 海拔对林地年平均温度和平均降水量也会产生影响, 其影响路径系数分别为−0.25 和−0.22, 林地土壤 pH 则受林分密度、坡度和年平均温度的共同作用, 影响路径系数分别为 0.05、−0.08 和−0.12。土壤有机质对全氮、有效氮、全磷、有效磷、全钾和有效钾的影响路径系数分别为 0.17、0.47、−0.09、−0.03、0.16 和 0.21。根据结构方程模型路径系数分析的原则, 路径系数绝对值大的数列代表外生显变量对内生显变量的影响程度较大, 反之则小[24]。可见, 海拔、林分密度、坡度和土壤 pH 对杉木人工林表层土壤有机质含量变化有较显著的影响, 其中海拔、坡度和土壤 pH 对土壤有机质含量变化的影响表现出明显的正效应, 林分密度则为负效应, 土壤有机质对土壤中全氮、有效氮、全钾、有效钾含量有较明显的正贡献, 对全磷、有效磷具有微弱的负贡献。

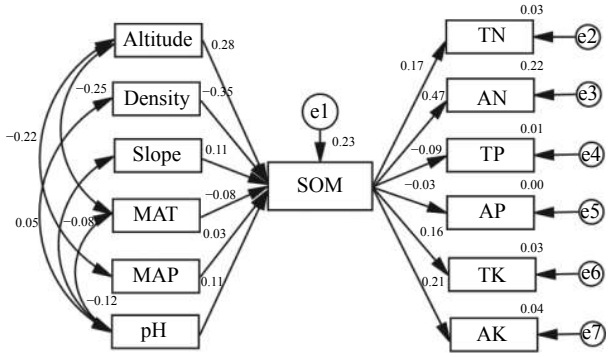

图 3 杉木人工林表层土壤有机质对土壤养分含量影响的结构方程模型图

Fig. 3 Structural equation model for the effect of soil organic matter on soil nutrient content in Chinese fir plantations

模型左侧为环境影响因子 [Altitude: 海拔, m; Density: 林分密度, 株·hm^{-2}; Slope: 坡度, (°); MAT: 年平均温度, ℃; MAP: 平均降水量, mm; pH]; 模型右侧为土壤养分因子 (TN: 全氮, g·kg^{-1}; TP: 全磷, g·kg^{-1}; TK: 全钾, g·kg^{-1}; AN: 有效氮, mg·kg^{-1}; AP: 有效磷, mg·kg^{-1}; AK: 有效钾, mg·kg^{-1}); 模型中部为土壤有机质 (SOM, g·kg^{-1})。The left side of the model is the environmental impact factors [altitude, m; density, plant·hm^{-2}; slope, (°); MAT: mean annual temperature, ℃; MAP: mean annual precipitation, mm; pH]; the right side of the model is the soil nutrient factor (TN: total N, g·kg^{-1}; TP: total P, g·kg^{-1}; TK: total K, g·kg^{-1}; AN: available N, mg·kg^{-1}; AK: available K, mg·kg^{-1}; AP: available P, mg·kg^{-1}); the medium of the model is the soil organic matter (SOM, g·kg^{-1}).

3 讨论

土壤有机质是来源于植物、动物、微生物的有机化合物在不同分解阶段的非均相混合物, 是森林生态系统的重要组成部分[25]。土壤有机质在提供植物生长所需要养分的同时, 还能有效改良土壤结构,

使土壤疏松, 促进土壤形成水稳定性团聚体, 增加土壤持水和保肥能力, 有利于根系的生长、土壤微生物和土壤动物活动[26]。本研究发现, 我国杉木主产区人工林表层土壤有机质养分等级为中级 (30~40 g·kg^{-1}), 表层土壤有机质含量普遍较低, 这可能是由于营造单一纯林使得林下植被多样性下降、生物量降低[27], 加上杉木本身凋落物有限[28], 林农放火炼山[29−30] 从而导致表层土壤有机质含量下降。统计分析显示, 不同省域和不同土壤类型的杉木人工林表层土壤有机质含量差异明显, 这种差异主要是由于各地区杉木生长的环境条件、成土母质及管理水平的差异所导致[31]。

通常情况下, 土壤有机质的分解主要受土壤微生物、土壤酶活性、土壤动物以及环境因素所影响, 其中环境因子占主要作用[32]。本研究发现, 海拔、林分密度、坡度和土壤 pH 对杉木人工林表层土壤有机质含量变化有较显著的影响, 其中海拔、坡度和土壤 pH 对土壤有机质含量变化的影响表现出明显的正效应, 林分密度则为负效应。由此可见, 林分密度过大、土壤 pH 降低是直接导致杉木人工林表层土壤有机质含量下降的主要影响因素[33]。植物正常生长发育需要适宜的土壤 pH 环境, 土壤 pH 过低会导致土壤中交换性酸、铝增加, 抑制植物根系对 N 和 K 的吸收、同化和转移, 植物容易发生酸化伤害[34]。本研究发现, 我国杉木人工林表层土壤 pH 平均为 4.60, 为强酸性。其中, pH<4.5 的极强酸性和 pH 为 4.5~5.5 的强酸性土壤样本数占总样本数量的 97.62%。一般情况下, 自然界中土壤 pH 降低是一个非常缓慢的过程, 出现这种情况很可能是由于化学肥料的使用, 杉木人工林多代连栽、酸沉降等, 使得土壤酸度增加, 土壤性质进一步恶化。此外, 由于杉木凋落物有机质分解产生的有机酸和酚类物质及酸雨污染的日益严重, 可能进一步加剧了杉木人工林土壤的酸化程度[35]。

N、P、K 作为植物生长发育所必需的养分三要素, 植物对其需求量大, 是土壤中极为重要的养分元素, 也是衡量土壤肥力的重要指标[36]。本研究中, 不同试验地的杉木人工林表层土壤 N、P、K 养分含量差异性较大, 波动范围广。杉木人工林表层土壤中全氮和有效氮的含量较高, 养分等级分别为中下和富; 全磷含量极低, 平均含量仅为 0.49 g·kg^{-1}, 处于极贫水平; 全钾平均含量为 14.17 g·kg^{-1}, 养分等级为贫, 有效钾养分等级为中下。杉木人工林表层土壤养分整体表现出“缺磷少钾”的分布特征。与此同时, 有效磷的样本最大值为 45.62 mg·kg^{-1}, 最低值仅为 0.03 mg·kg^{-1}, 变异程度高达 148.06%。这说明在杉木人工林中, 有效磷在表层土壤变化最强烈, 它对杉木生长发育变化更加敏感。

大量研究表明, 林地土壤有机质含量与土壤质量和林木生长量密切相关[37-39]。本研究发现, 杉木人工林表层土壤有机质与土壤有效氮之间具有正相关关系, 相关性极显著, 这说明表层土壤有机质是土壤中有效氮的重要来源, 土壤有机质含量降低可能会导致有效氮的缺乏, 林木产量下降。同时还发现, 土壤有机质对全氮、全磷、全钾和有效氮、有效磷、有效钾的影响路径系数分别为 0.17、−0.09、0.16、0.47、−0.03、0.21。这说明杉木人工林表层土壤有机质分解可促进 N 和 K 等养分元素的释放, 有利于土壤肥力的增加。有机质含量降低则会导致土壤中全氮、有效氮、全钾、有效钾等养分含量的降低, 最终导致土壤肥力下降。

4　结论

杉木人工林表层土壤有机质含量平均为 (31.02±13.44) g·kg^{-1}, 养分等级为中, 变异系数为 43.33%, 属中等变异水平, 主要分级表现为“多中下, 少富级, 无极贫”的分布特征。不同土壤类型有机质含量差异较大, 山地黄壤的含量最高, 为 (46.63±16.88) g·kg^{-1}, 暗红壤最低, 为 (15.81±4.38) g·kg^{-1}。林分密度、海拔、坡度和土壤 pH 是杉木人工林表土有机质含量变化的主要影响因素, 其对土壤有机质的贡献量分别为 −0.35、0.28、0.11 和 0.11。土壤有机质对全氮、有效氮、全钾、有效钾的贡献程度较高, 贡献量分别为 0.17、0.47、0.16 和 0.21。土壤有机质对土壤全磷的贡献程度较低, 贡献量为−0.09 和−0.03。因此, 土壤中磷的缺乏可能是限制杉木生长的主要因素。

参考文献　References

[1] YU Y C, YANG J Y, ZENG S C, et al. Soil pH, organic matter, and nutrient content change with the continuous cropping of *Cunninghamia lanceolata* plantations in South China[J]. Journal of Soils and Sediments, 2017, 17(9): 2230−2238

[2] FANG X M, ZHANG X L, ZONG Y Y, et al. Soil phosphorus functional fractions and tree tissue nutrient concentrations influenced by stand density in subtropical Chinese fir plantation forests[J]. PLoS One, 2017, 12(10): e0186905

[3] 国家林业局. 第八次全国森林资源清查结果[J]. 林业资源管理, 2014, (1): 1−2
National Forestry Administration. Results of the eighth national forest resources inventory[J]. Forest Resources Management, 2014, (1): 1−2

[4] 唐健, 覃祚玉, 王会利, 等. 广西杉木主产区连栽杉木林地土壤肥力综合评价[J]. 森林与环境学报, 2016, 36(1): 30−35
TANG J, QIN Z Y, WANG H L, et al. Assessment of soil fertility of continuous plantation of *Cunninghamia lanceolata* in main producing regions in Guangxi[J]. Journal of Forest and Environment, 2016, 36(1): 30−35

[5] 范少辉, 盛炜彤, 马祥庆, 等. 多代连栽对不同发育阶段杉木人工林生产力的影响[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 560−567
FAN S H, SHENG W T, MA X Q, et al. Effect of successive planting on productivity of Chinese fir of different age plantations[J]. Forest Research, 2003, 16(5): 560−567

[6] WU Z Y, LI J J, ZHENG J, et al. Soil microbial community structure and catabolic activity are significantly degenerated in successive rotations of Chinese fir plantations[J]. Scientific Reports, 2017, 7: 6691

[7] MTAMBANENGWE F, MAPFUMO P. Organic matter management as an underlying cause for soil fertility gradients on smallholder farms in Zimbabwe[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2005, 73(2/3): 227−243

[8] LUAN J W, XIANG C H, LIU S R, et al. Assessments of the impacts of Chinese fir plantation and natural regenerated forest on soil organic matter quality at Longmen Mountain, Sichuan, China[J]. Geoderma, 2010, 156(3/4): 228−236

[9] USSIRI D A N, JOHNSON C E. Characterization of organic matter in a northern hardwood forest soil by ^{13}C NMR spectroscopy and chemical methods[J]. Geoderma, 2003, 111(1/2): 123−149

[10] WICKLAND K P, NEFF J C. Decomposition of soil organic matter from boreal black spruce forest: environmental and chemical controls[J]. Biogeochemistry, 2008, 87(1): 29−47

[11] 杨承栋. 我国人工林土壤有机质的量和质下降是制约林木生长的关键因子[J]. 林业科学, 2016, 52(12): 1−12
YANG C D. Decline of quantity and quality of soil organic matter is the key factor restricting the growth of plantation in China[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2016, 52(12): 1−12

[12] SIMARD M, LECOMTE N, BERGERON Y, et al. Forest productivity decline caused by successional paludification of boreal soils[J]. Ecological Applications, 2007, 17(6): 1619−1637

[13] MANLAY R J, FELLER C, SWIFT M J. Historical evolution of soil organic matter concepts and their relationships with the fertility and sustainability of cropping systems[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2007, 119(3/4): 217−233

[14] WEINTRAUB S R, WIEDER W R, CLEVELAND C C, et al. Organic matter inputs shift soil enzyme activity and allocation patterns in a wet tropical forest[J]. Biogeochemistry, 2013, 114(1/2/3): 313−326

[15] GAO J K, LIANG C L, SHEN G Z, et al. Spectral characteristics of dissolved organic matter in various agricultural soils throughout China[J]. Chemosphere, 2017, 176: 108−116

[16] ZENG Q C, DARBOUX F, MAN C, et al. Soil aggregate stability under different rain conditions for three vegetation types on the Loess Plateau (China)[J]. CATENA, 2018, 167: 276−283

[17] 王清奎, 汪思龙, 冯宗炜. 杉木人工林土壤可溶性有机质及其与土壤养分的关系[J]. 生态学报, 2005, 25(6): 1299−1305
WANG Q K, WANG S L, FENG Z W. A study on dissolved organic carbon and nitrogen nutrients under Chinese fir plantation: Relationships with soil nutrients[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(6): 1299−1305

[18] 刘飞鹏, 储双双, 裴向阳, 等. 华南3种人工林土壤有机质和养分含量及其综合评价[J]. 南京林业大学学报: 自然科学版, 2014, 38(2): 81−85
LIU F P, CHU S S, PEI X Y, et al. Soil organic matter and nutrient contents and integrated evaluation of them under three typical planted forests in south China[J]. Journal of Nanjing Forestry University: Natural Sciences Edition, 2014, 38(2): 81−85

[19] 田大伦, 方晰, 项文化. 湖南会同杉木人工林生态系统碳素密度[J]. 生态学报, 2004, 24(11): 2382−2386
TIAN D L, FANG X, XIANG W H. Carbon density of the Chinese fir plantation ecosystem at Huitong, Hunan Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(11): 2382−2386

[20] 陈怀满, 牛树奎, 刘艳红. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002
CHEN H M, NIU S K, LIU Y H. Behavior of Chemical Substances in Soil and Environmental Quality[M]. Beijing: Science Press, 2002

[21] 李俊清. 森林生态学[M]. 2版. 北京: 高等教育出版社, 2010
LI J Q. Forest Ecology[M]. Second edition. Beijing: Higher Education Press, 2010

[22] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000
BAO S D. Soil Agrochemical Analysis[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000

[23] 龚子同, 张甘霖, 陈志城. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007
GONG Z T, ZHANG G L, CHEN Z C. Pedogenesis and Soil Taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007

[24] SALES M V S, ALEIXO S, GAMA-RODRIGUES A C, et al. Structural equation modeling for the estimation of interconnections between the P cycle and soil properties[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2017, 109(2): 193−207

[25] 刘效东, 乔玉娜, 周国逸. 土壤有机质对土壤水分保持及其有效性的控制作用[J]. 植物生态学报, 2011, 35(12): 1209−1218
LIU X D, QIAO Y N, ZHOU G Y. Controlling action of soil organic matter on soil moisture retention and its availability[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2011, 35(12): 1209−1218

[26] LOAIZA PUERTA V, PUJOL PEREIRA E I, WITTWER R, et al. Improvement of soil structure through organic crop management, conservation tillage and grass-clover ley[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 180: 1−9

[27] 王瑞华, 葛晓敏, 唐罗忠. 林下植被多样性、生物量及养分作用研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, 27(1): 43−48
WANG R H, GE X M, TANG L Z. A review of diversity, biomass and nutrient effect of understory vegetation[J]. World Forestry Research, 2014, 27(1): 43−48

[28] WANG Q K, ZHONG M C. Composition and mineralization of soil organic carbon pools in four single-tree species forest

soils[J]. Journal of Forestry Research, 2016, 27(6): 1277−1285

[29] MERINO A, FONTURBEL M T, FERNÁNDEZ C, et al. Inferring changes in soil organic matter in post-wildfire soil burn severity levels in a temperate climate[J]. Science of the Total Environment, 2018, 627: 622−632

[30] 陈杰. 炼山对闽北杉木人工林土壤理化性质的影响[J]. 热带林业, 2020, 48(2): 60−62
CHEN J. Effects of slash burning on the soil properties of Chinese fir plantation in northern Fujian[J]. Tropical Forestry, 2020, 48(2): 60−62

[31] 赵明松, 张甘霖, 李德成, 等. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5058−5066
ZHAO M S, ZHANG G L, LI D C, et al. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(16): 5058−5066

[32] QIU H S, GE T D, LIU J Y, et al. Effects of biotic and abiotic factors on soil organic matter mineralization: Experiments and structural modeling analysis[J]. European Journal of Soil Biology, 2018, 84: 27−34

[33] 林起财. 杉木成熟林不同密度条件下土壤肥力比较研究[J]. 农村经济与科技, 2020, 31(23): 100−102
LIN Q C. Soil fertility of Chinese fir mature forest under different densities[J]. Rural Economy and Science-Technology, 2020, 31(23): 100−102

[34] 于天一, 孙秀山, 石程仁, 等. 土壤酸化危害及防治技术研究进展[J]. 生态学杂志, 2014, 33(11): 3137−3143
YU T Y, SUN X S, SHI C R, et al. Advances in soil acidification hazards and control techniques[J]. Chinese Journal of Ecology, 2014, 33(11): 3137−3143

[35] SHEN Q H, SUAREZ-ABELENDA M, CAMPS-ARBESTAIN M, et al. An investigation of organic matter quality and quantity in acid soils as influenced by soil type and land use[J]. Geoderma, 2018, 328: 44−55

[36] LIU C C, LIU Y G, GUO K, et al. Effects of nitrogen, phosphorus and potassium addition on the productivity of a Karst grassland: Plant functional group and community perspectives[J]. Ecological Engineering, 2018, 117: 84−95

[37] TIESSEN H, CUEVAS E, CHACON P. The role of soil organic matter in sustaining soil fertility[J]. Nature, 1994, 371(6500): 783−785

[38] LI J C, RAMIREZ G H, KIANI M, et al. Soil organic matter dynamics in long-term temperate agroecosystems: rotation and nutrient addition effects[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2018, 98(2): 232−245

[39] PARSAPOUR M K, KOOCH Y, HOSSEINI S M, et al. Litter and topsoil in *Alnus subcordata* plantation on former degraded natural forest land: a synthesis of age-sequence[J]. Soil and Tillage Research, 2018, 179: 1−10