

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.05.017.

陈梦, 袁丛军, 舒德远, 等. 黔东南丘陵山地 5 种林分类型土壤有机碳与理化性质间的关系[J]. 水土保持研究, 2024, 31(5): 26-34.

Chen Meng, Yuan Congjun, Shu Deyuan, et al. The Relationship Between Soil Organic Carbon and Physicochemical Properties in Different Forest Types[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(5): 26-34.

# 黔东南丘陵山地 5 种林分类型土壤有机碳与 理化性质间的关系

陈梦<sup>1,2</sup>, 袁丛军<sup>1,2</sup>, 舒德远<sup>3</sup>, 龙文峰<sup>4</sup>, 戴晓勇<sup>1,2</sup>, 丁访军<sup>1,2</sup>

(1.贵州省林业科学研究院, 西南喀斯特山地生物多样性保护国家林业和草原局重点实验室,

贵阳 550005; 2.贵州雷公山森林生态系统国家定位观测研究站, 贵州 雷山 557100;

3.贵州大学 林学院, 贵阳 550025; 4.天柱县林业局, 贵州 天柱 556600)

**摘要:** [目的] 阐明贵州省黔东南地区不同林分类型土壤有机碳含量与土壤理化因子间的关系, 以期营造合理的林分类型和树种结构, 有效提升森林碳汇潜力提供科学参考。[方法] 以天柱国营林场马尾松林、杉木林、针叶混交林、阔叶混交林及针阔混交林为研究对象, 在 5 种林分类型中分别设置 3 个 25.82 m × 25.82 m 样地, 采集各样地 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 层土样, 测定土壤有机总碳、pH、含水量、容重、石砾含量、氮、磷、钾等理化指标及相关性, 并分析不同林分类型土壤有机碳及土壤理化性质间的相关性。[结果] (1) 马尾松林土壤总有机碳含量 22.25~42.08 g/kg, 杉木林土壤总有机碳含量 30.12~50.33 g/kg, 针叶混交林土壤总有机碳含量 22.93~48.17 g/kg, 阔叶混交林土壤总有机碳含量 24.01~67.68 g/kg, 针阔混交林土壤总有机碳含量 32.99~92.36 g/kg。针阔混交林土壤有机碳含量最高, 且各林分类型均出现表层富集特征。(2) 马尾松林土壤有机碳含量与水解氮极显著正相关; 杉木林与全氮、水解氮显著负相关; 针叶混交林与土壤 pH 显著负相关, 与土壤含水量、全氮及全钾显著正相关; 阔叶混交林与土壤 pH 极显著正相关; 针阔混交林与土壤含水量、全氮、全磷、全钾含量极显著正相关。(3) 各相关因子中, 水解氮是马尾松林土壤有机碳含量的主导因子, 全氮是杉木林与针叶混交林的主导因子, 土壤 pH 是阔叶混交林的主导因子, 土壤含水量是针阔混交林的主导因子。[结论] 不同林分类型土壤环境的差异对土壤有机碳积累的影响有所不同。受枯落物、根系、养分迁移等影响, 针阔混交林土壤有机碳含量较其他 4 种林分类型高。

**关键词:** 林分类型; 土壤有机碳; 生态化学计量特征; 土壤容重; 相关性

中图分类号: S154.2

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)05-0026-09

## The Relationship Between Soil Organic Carbon and Physicochemical Properties in Different Forest Types

Chen Meng<sup>1,2</sup>, Yuan Congjun<sup>1,2</sup>, Shu Deyuan<sup>3</sup>, Long Wenfeng<sup>4</sup>, Dai Xiaoyong<sup>1,2</sup>, Ding Fangjun<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of National Forestry and Grassland Administration of Karst Mountain biodiversity Conservation in Southwest China, Guizhou Academy of Forestry, Guiyang 550005, China; 2. National Positioning Observation and Research Station of Leigong Mountain Forest Ecosystem in Guizhou Province, Leishan, Guizhou 557100, China; 3. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 4. Tianzhu County Forestry Bureau, Tianzhu, Guizhou 556600, China)

**Abstract:** [Objective] The aim of this study is to explore the relationship between soil organic carbon content and soil physicochemical factors of different forest types in southeastern Guizhou Province, China. [Methods] The pure *Pinus massoniana* forest, pure *Cunninghamia lanceolata* forest, coniferous mixed forest, broad-leaved mixed forest, and coniferous broad-leaved mixed forest were selected in Tianzhu State

收稿日期: 2023-09-11

修回日期: 2023-10-26

资助项目: 贵州省科技计划项目(黔科合服企[2020]4010); 贵州省林业局“贵州人工商品纯林树种结构优化调整对森林碳汇效益提升监测研究”; 贵州省科技计划项目(黔科合基础-ZK[2022]一般 241)

第一作者: 陈梦(1995—), 女, 贵州省六盘水人, 硕士研究生, 助理工程师, 研究方向: 森林生态学、土壤微生物等。E-mail: 2314213351@qq.com

通信作者: 袁丛军(1990—), 男, 贵州安顺人, 副研究员, 主要从事喀斯特生态恢复与治理、森林经营与林下经济产业融合、生物多样性保护、乡土特色植物资源分类与功能化利用研究。E-mail: ycongjun2016gzslky@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

owned Forest Farm. The standard plot survey method was used to set up sample plots for five types of forests. Five point sampling method was used to collect soil samples from 0—20 cm, 20—40 cm, and 40—60 cm layers of each forest, and soil organic total carbon, soil pH, soil moisture content, soil bulk density, and soil gravel content were measured for each forest type, nitrogen, phosphorus, potassium and other physical and chemical indicators. Person correlation analysis between soil organic carbon and soil physical and chemical properties were conducted. [Results] (1) The total organic carbon content of soil pure *Pinus massoniana* fores ranged from 22.25 to 42.08 g/kg, pure *Cunninghamia lanceolata* forest ranged from 30.12 to 50.33 g/kg, coniferous mixed fores ranged from 22.93 to 48.17 g/kg, broad-leaved mixed forest ranged from 24.01 to 67.68 g/kg, and soil coniferous broad-leaved mixed forest ranged from 32.99 to 92.36 g/kg. Overall, coniferous broad-leaved mixed forest soil had the highest organic carbon content, and all forest types exhibited surface enrichment characteristics. (2) The pure *Pinus massoniana* forest was positively correlated with soil total nitrogen and hydrolyzed nitrogen, while the pure Chinese fir forest was negatively correlated with soil total nitrogen and hydrolyzed nitrogen. The mixed coniferous forest was negatively correlated with soil pH, soil moisture, total nitrogen, and total potassium content. The broad-leaved forest was positively correlated with soil pH and total potassium content, while the mixed coniferous and broad-leaved forest was positively correlated with soil moisture, total nitrogen, total phosphorus, and total potassium content. (3) The organic carbon content of pure *Pinus massoniana* fores soil was mainly affected by the content of hydrolyzed nitrogen, pure *Cunninghamia lanceolata* forest and coniferous mixed fores were mainly affected by the content of total nitrogen, broad-leaved mixed forest was mainly affected by the soil pH, coniferous broad-leaved mixed forest was the main factor of soil moisture, total phosphorus, hydrolyzed nitrogen, and total nitrogen, and the degree of influence is manifested by the order: water content > total phosphorus > hydrolyzed nitrogen > total nitrogen. [Conclusion] The content of soil organic carbon is significantly influenced by forest type and soil physicochemical properties, and constructing a mixed forest with needle and broad-leaved trees is more conducive to the accumulation of soil organic carbon.

**Keywords:** forest type; soil organic carbon; ecological stoichiometric characteristics; soil bulk density; correlation

森林土壤有机碳(SOC)是陆地生态系统中占据重要地位的碳储存库<sup>[1-2]</sup>,其含量是反映土壤肥力和评价土壤质量的重要指标,且在调节土壤理化性质、供给养分、改善土壤结构、维持土壤稳定等方面起到重要作用,然而其含量和分布受气候、地形地貌、植被类型和结构等诸多因素的影响<sup>[3-5]</sup>。众多因素中,植被组成、群落结构及环境因素的改变会直接引起土壤性质特别是土壤有机碳的变化<sup>[6]</sup>。因此不同林分类型因植被覆盖度、凋落物输入量和分解速率、土壤养分等差异,对土壤有机碳积累的影响作用也存在差异<sup>[7]</sup>。合理的林分结构和树种组成可有效增加土壤碳源的供给,增强土壤团粒的稳定,还可在气候变化的大背景下减少地表侵蚀造成的有机碳流失<sup>[8]</sup>。因此,从不同林分类型探索土壤有机碳与土壤理化因子之间的关系及其积累和分配特征,可为今后制定森林应对气候变化策略,指导区域森林可持续经营提供科学依据<sup>[9]</sup>。

目前,相关学者对森林土壤有机碳的研究多集中

在以马尾松、杉木为主的人工林林龄变化对土壤有机碳的影响方面。如王冰等<sup>[10]</sup>对兴安落叶松林4个龄组土壤有机碳变化及其与理化性质的关系的研究发现,随着林龄的增加土壤有机总碳呈先减后增变化特征,且土壤理化性质对SOC具有显著影响,曹小玉等<sup>[11]</sup>对不同林龄杉木的研究也得到相同的结论。而对不同林分类型土壤有机碳变化及其与土壤理化性质间的关系方面鲜有报道。其中王瑾<sup>[12]</sup>采集不同植被类型土壤进行恒温箱培养试验表明,在同一地区,不同植被类型下的土壤有机碳周转速率存在差异,而引起这种差异的主要因素是土壤理化性质。探究不同林分类型土壤有机碳含量差异特征及其与土壤理化性质之间的关系,精准评估不同林分类型在生态系统碳平衡中的贡献,为树种结构调整下碳汇效益提升提供重要参考依据。因此,本研究从不同林分类型角度,对土壤有机碳与土壤理化因子间的关系进行了探讨,以期营造合理的林分类型和树种结构,有效提升森林碳汇潜力提供科学参考。

## 1 研究区概况

研究地点位于贵州省黔东南州天柱县凤城镇天柱县国营林场(26°46′—27°05′, 109°05′—109°22′), 属中亚热带季风性暖湿气候;日照时数 1 189 h, 年平均气温为 16.1 ℃, 年均降水量 1 200~1 380 mm, 主要集中在 5—8 月, 全年无霜期 281 d。地形以中低山丘为主, 海拔 300~700 m。土壤以黄壤、黄棕壤为主, pH 3.5~6.7。林区面积 4 820.24 万 m<sup>2</sup>, 森林蓄积 51 万 m<sup>3</sup>, 林场森林资源集中连片, 林区森林覆盖率 81%, 植被以炼山后实生苗营造的杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、马尾松(*Pinus massoniana*) 林为主。林区内乔木层树种 10 余种, 主要有杉木、马尾松、香樟(*Cinnamomum camphora*)、鹅掌楸(*Liriodendron chinense*)、

樟木(*Sassafras tzumu*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、枫香(*Liquidambar formosana*) 等, 灌木层主要树种有女贞(*Ligustrum lucidum*)、油茶(*Camellia oleifera*) 等, 草本层主要植物有五节芒(*Miscanthus floridulus*)、藁草(*Carex hirta*)、牛膝(*Achyranthes bidentata*) 等。

## 2 材料与方

### 2.1 样地设置

选取成土母岩、立地条件、林分年龄及长势等较为一致的马尾松纯林、杉木纯林、马尾松与杉木混交林、阔叶纯林和针叶与阔叶混交林, 每种林分类型分别设置面积为 25.82 m×25.82 m 的典型样地 3 块, 不同林分类型样地基本情况和特征见表 1。

表 1 不同林分类型样地基本特征

Table 1 Basic characteristics of different forest stand types in sample plots

林分类型	优势树种	郁闭度	海拔/m	坡向	坡度/(°)	平均胸径/cm	平均树高/m
马尾松林	马尾松	0.95	498	北	10	26.90±0.70	21.55±1.05
杉木林	杉木	0.95	765	北	35	22.05±1.55	14.25±0.25
马尾松—杉木混交林	马尾松、杉木	0.80	583	北	20	15.05±2.55	11.30±0.90
阔叶混交林	丝栗栲、枫香、柿树、鹅耳枥、锥、油茶	0.90	459	北	20	13.53±1.84	9.8±1.28
针阔混交林	马尾松、杉木、枫香、香樟、油茶、毛竹、白栎	0.85	593	北	10	12.06±1.51	10.54±0.25

### 2.2 土壤样品采集与指标测定

野外调查取样时间在 2022 年 9 月 15 日—30 日。于每个 25.82 m×25.82 m 固定样地内采用五点取样法挖取土壤剖面, 每个剖面长 1.2~1.5 m、宽 0.8~1.0 m, 在挖取的土壤剖面按 0—20 cm, 20—40 cm, 40—60 cm 土层深度从下至上分别采集土样, 并将相同土层的土样均匀混合, 采用四分法各取土壤样品 400 g。返回实验室自然风干后取土样 200 g, 研磨后过 0.1 mm 筛用于测定土壤碳、氮、磷含量<sup>[13]</sup>。土壤有机碳含量采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>、K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>—外加热法进行测定; 全氮含量采用半微量定氮分析法测定; 全磷含量采用钼锑抗比色法测定。

### 2.3 数据处理与分析

本文数据初步分析采用 WPS 11.1.0 进行, 描述分析采用 SPSS 26.0 软件进行, 不同林分类型土壤理化因子采用 Duncan multiple comparison 和 One-Way ANOVA 的最小显著差异法(LSD)法进行显著性检验( $p=0.05$ ), 土壤有机碳与土壤理化性质之间的相关性采用 Pearson 进行分析, 线性回归方程采用线性回归分析, 所有图表绘制采用 Origin 2022 进行。

## 3 结果与分析

### 3.1 不同林分类型土壤总有机碳含量的变化

由表 2 看出, 马尾松林土壤总有机碳含量 22.25~

42.08 g/kg, 表层(0—20 cm)有机碳含量与 20—40 cm, 40—60 cm 层表现显著性差异( $p<0.05$ ); 杉木林土壤总有机碳含量在 30.12~50.33 g/kg, 0—20 cm 与 40—60 cm 层表现显著性差异( $p<0.05$ ); 针叶混交林土壤总有机碳含量在 22.93~48.17 g/kg, 0—20 cm 与 20—40 cm, 40—60 cm 层表现显著性差异( $p<0.05$ ); 阔叶混交林土壤总有机碳含量在 24.01~67.68 g/kg, 0—20 cm 与 20—40 cm, 40—60 cm 层表现显著性差异( $p<0.05$ ); 针阔混交林土壤总有机碳含量在 32.99~92.36 g/kg, 0—20 cm 与 20—40 cm, 40—60 cm 层表现显著性差异( $p<0.05$ )。各林分类型均随土层深度增加有机碳含量降低的趋势, 呈现明显的剖面特征, 说明森林生态系统中土壤有机碳存在表层富集性。总的来看, 相比于其他林分类型, 针阔混交林有机碳含量最高, 说明营造针阔混交林更有利于土壤碳的积累。

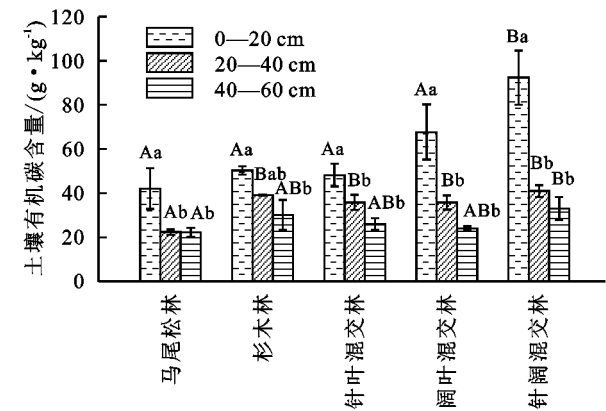
由图 1 可以看出, 不同林分类型间 0—20 cm 层土壤总有机碳含量除针阔混交林外, 其他几种林分类型间无显著性差异( $p<0.05$ ), 且针阔混交林土壤有机碳含量最高, 为 92.36 g/kg。20—40 cm 层土壤总有机碳含量除马尾松林外, 其余几种林分类型间均无显著性差异( $p<0.05$ ), 且针阔混交林土壤有机碳含量最高, 为 40.97 g/kg。40—60 cm 层与表层(0—20 cm)表现出一致规律, 仍然是针阔混交林土壤总有机碳含量最高, 为 32.99 g/kg。总的来说, 针阔混交林

土壤总有机碳含量表现最高,一定程度表明营造针阔混交林可促进土壤有机碳的积累。

表 2 不同林分类型不同深度土层的总有机碳含量

Table 2 Total SOC of Different Forest Types and Different Depth Soil Layers						
分组	土层 深度/cm	最小值/ (g · kg <sup>-1</sup> )	最大值/ (g · kg <sup>-1</sup> )	平均值/ (g · kg <sup>-1</sup> )	标准差/ (g · kg <sup>-1</sup> )	变异系数/ CV
马尾松林	0—20	35.55	48.60	42.08a	9.23	0.22
	20—40	21.54	23.22	22.38b	1.19	0.05
	40—60	20.84	23.66	22.25b	1.99	0.09
杉木林	0—20	48.96	51.69	50.33a	1.93	0.04
	20—40	38.94	39.37	39.16ab	0.30	0.01
	40—60	25.28	34.96	30.12b	6.84	0.23
针叶混交林	0—20	44.55	51.78	48.17a	5.11	0.11
	20—40	33.42	38.20	35.81b	3.38	0.09
	40—60	24.05	27.81	25.93b	2.66	0.10
阔叶混交林	0—20	57.00	81.45	67.68a	12.51	0.18
	20—40	32.08	37.63	35.74b	3.17	0.09
	40—60	23.34	25.15	24.01b	0.99	0.04
针阔混交林	0—20	65.29	138.24	92.36a	22.24	0.29
	20—40	37.46	44.24	40.97b	2.66	0.06
	40—60	25.97	38.44	32.99b	5.26	0.16

注:不同小写字母表示不同土层间存在显著差异性( $p<0.05$ )。



注:不同小写字母表示不同土层间存在显著差异性( $p<0.05$ );不同大写字母表示不同林分类型间存在显著差异性( $p<0.05$ )。

图 1 不同林分类型不同深度土层的总有机碳含量变化特征  
Fig. 1 Changes in total organic carbon content in different forest types and soil layers at different depths

3.2 不同林分类型的土壤物理性质特征

不同林分类型下的各土壤层之间土壤物理性质表现出不同的变化趋势(图 2)。各林分类型土壤 pH 均为酸性,且不同土壤层间不存在显著性差异( $p<0.05$ ),马尾松林随土壤层深度呈增加趋势,针叶混交林、针阔混交林反之,杉木林呈现倒“V”趋势,阔叶混交林反之。石砾含量表现为杉木林、针叶混交林、针阔混交林随土层深度逐渐增多,马尾松林无明显剖面特征,阔叶混交林表层逐层递减;土壤容重除阔叶混交林、针阔混交林随土层深度逐渐增加,其余几种林分类型无明显规律;随着土壤剖面深度增加,土壤含水量阔叶混交林、杉木林表现为先增后减,针叶混交

林先减后增,针阔混交林逐渐增加,马尾松林反之。差异性检验结果显示针阔混交林表层土壤 pH 与马尾松林、杉木林呈现显著差异性,其他林分类型无显著性差异( $p<0.05$ ),20—40 cm 层差异均不显著,40—60 cm 层阔叶混交林与马尾松林、针阔混交林表现出差异性,其余林分类型间无差异;马尾松林林分 0—20 cm 层石砾含量显著高于其他林分类型,20—40 cm 层马尾松林、阔叶混交林显著高于杉木林、针叶混交林和针阔混交林,40—60 cm 层针叶混交林显著高于阔叶混交林和针阔混交林;阔叶混交林表层土壤容重与其他 4 组差异显著,20—40 cm 层针叶混交林与马尾松林、阔叶混交林表现显著性差异( $p<0.05$ ),40—60 cm 层马尾松林与针阔混交林表现显著性差异;土壤含水量除马尾松林、阔叶混交林 0—20 cm 层与 40—60 cm 层显著差异外,其余均无显著性差异,0—20 cm 层各林分类型间针叶混交林与马尾松林、杉木林差异显著,与阔叶混交林、针阔混交林差异不显著,20—40 cm 层除阔叶混交林与针阔混交林外,其余各组差异显著,40—60 cm 层除针阔混交林与杉木林、针叶混交林外,其余各组均表现显著性差异( $p<0.05$ )。

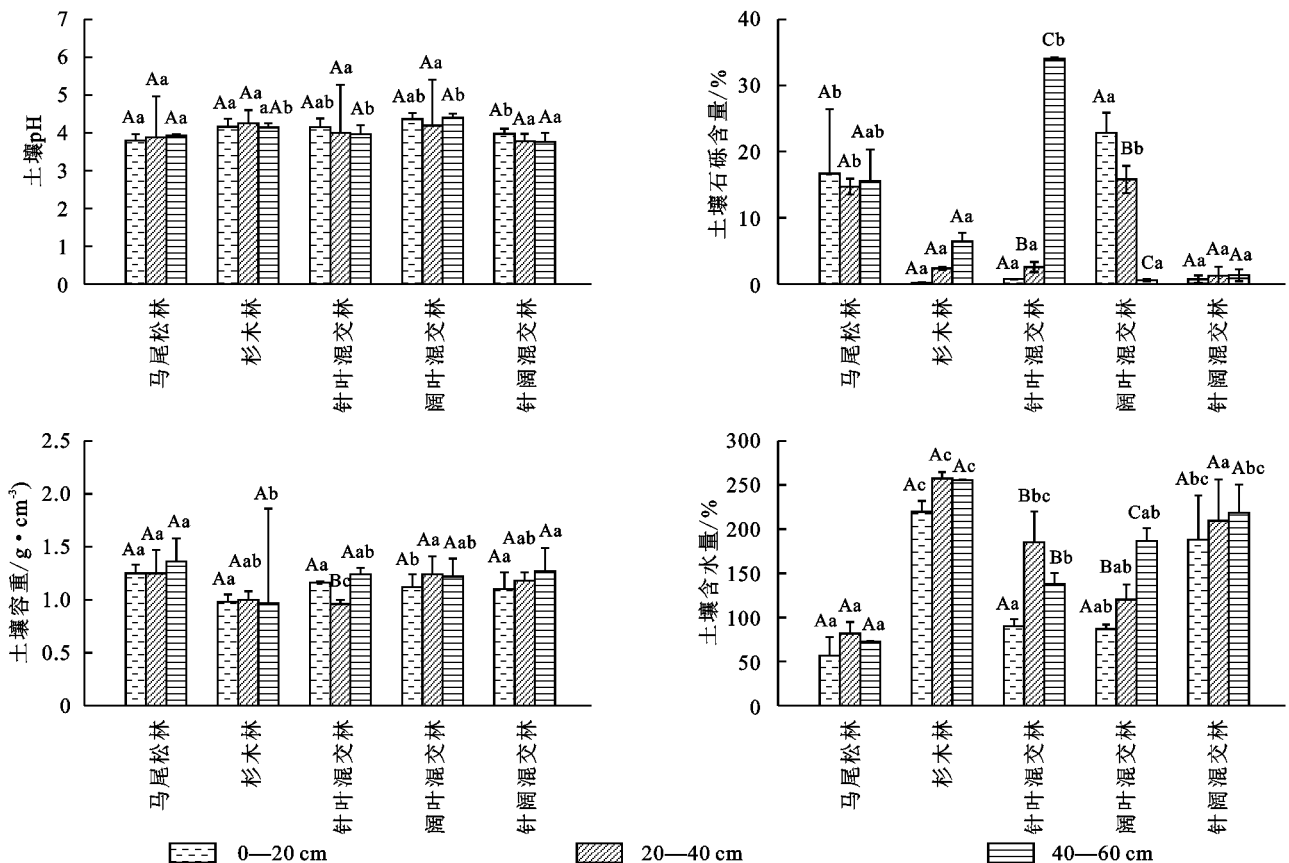
3.3 不同林分类型的土壤化学性质特征

土壤全氮含量介于 0.77~3.04 g/kg,最大值为杉木林 0—20 cm 土层,最小值为马尾松林 40—60 cm 土层,杉木林各层全氮含量均高于其他林分同层含量。方差分析结果显示 0—20 cm 层马尾松林、杉木林土壤全氮含量与阔叶混交林、针阔混交林之间差异显



著,针叶混交林差异不显著( $p < 0.05$ ),20—40 cm 层针阔混交林与马尾松林、杉木林间差异显著,其余不显著( $p < 0.05$ ),40—60 cm 层除阔叶混交林外,其余各组间均无显著性差异( $p < 0.05$ );水解氮含量介于 54.44~221.09 mg/kg,最大值为针阔混交林 0—20 cm 层,最小值为马尾松林 40—60 cm 层,杉木林、针阔混交林各层水解氮含量均高于其他林分同层含量。方差分析结果显示马尾松林各层水解氮含量显著低于其他 4 种林分类型,针叶混交林与阔叶混交林在 20—40 cm 层差异显著,40—60 cm 层除针叶混交林与针阔混交林间差异不显著外,其余各组均有显著性差异( $p < 0.05$ );全磷含量介于 0.18~0.51 g/kg,最大值为杉木林、阔叶混交林 20—40 cm 层,最小值为马尾松林 0—20 cm 层,杉木林、阔叶混交林各层全磷含量均高于其他林分同层含量。方差分析结果显示 0—20 cm 层全磷含量马尾松林显著低于其他 4 种林分类型,且马尾松林、杉木林与阔叶混交林、针阔混交林间差异显著( $p < 0.05$ ),20—40 cm,40—60 cm 层杉木林与阔叶混交林间差异显著( $p < 0.05$ );有效磷含量介于 1.51~6.67 mg/kg,最大值为针阔混交林 0—20 cm 层,最小值为杉木林 0—20 cm 层,针

阔混交林各层有效磷含量均高于其他林分同层含量。方差分析结果显示 0—20 cm 层除马尾松林、针叶混交林间没有显著性差异外,其他各组均存在显著性差异,20—40 cm 层针叶混交林、针阔混交林显著高于其他 3 种林分类型,40—60 cm 层除阔叶混交林与针叶混交林表现显著性差异外,其余各组均无显著性差异( $p < 0.05$ );全钾含量介于 7.78~25.39 g/kg,最大值为杉木林 40—60 cm 层,最小值为马尾松林 0—20 cm 层,杉木林各层全钾含量均高于其他林分同层含量。方差分析结果显示 0—20 cm 层除阔叶混交林外,杉木林与其他几种林分间差异均显著,20—40 cm 层杉木林与阔叶混交林、针叶混交林表现显著性差异,40—60 cm 层各林分类型间均表现出差异显著( $p < 0.05$ );速效钾含量介于 55.38~117.94 mg/kg,最大值为针叶混交林 0—20 cm 层,最小值为马尾松林 0—20 cm 层。方差分析结果显示 0—20 cm 层马尾松林、阔叶混交林显著低于杉木林、针叶混交林、针阔混交林,20—40 cm 层针叶混交林、针阔混交林与其他 3 种林分类型间差异显著,40—60 cm 层针阔混交林与马尾松林、杉木林、针叶混交林间差异显著,与阔叶混交林差异不显著(表 3)。



注:大写字母表示同一土层不同林分类型之间显著性差异( $p < 0.05$ );小写字母表示同一林分类型不同土层之间差异性显著( $p < 0.05$ ),下同。

图2 不同林分类型土壤物理性质

Fig. 2 Soil Physical Properties of Different Forest Stand Types

表 3 不同林分类型土壤养分特征

Table 3 Soil Nutrient Characteristics of Different Forest Stand Types

分组	土层 深度/cm	全氮/ (g · kg <sup>-1</sup> )	水解氮/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g · kg <sup>-1</sup> )	有效磷/ (mg · kg <sup>-1</sup> )	全钾/ (g · kg <sup>-1</sup> )	速效钾/ (mg · kg <sup>-1</sup> )
马尾松林	0—20	1.60±0.35Aa	105.32±8.39Aa	0.18±0.09Aa	2.48±0.29Ba	9.66±2.67Aa	99.01±9.38Bb
	20—40	1.16±0.03Aab	59.49±6.72Ab	0.26±0.01Aa	2.43±0.19Aa	7.78±0.01Aa	55.38±1.84Aa
	40—60	0.77±0.01Ab	54.44±2.99Ab	0.24±0.03Aa	2.55±0.01ABa	8.20±0.06Aa	106.57±21.33Cb
杉木林	0—20	3.04±0.61ABa	193.41±0.19Ba	0.39±0.06Ba	1.51±0.42Aa	24.33±1.24ABb	116.55±10.31Ca
	20—40	2.23±0.09Da	107.26±0.42BCb	0.51±0.05Ba	2.36±0.23Aab	21.34±1.70Ca	79.36±4.73Bb
	40—60	1.91±0.18Ba	102.40±3.09Db	0.43±0.04Ca	2.50±0.14ABb	25.39±0.31 Eb	100.88±2.12BCa
针叶混交林	0—20	1.92±0.04ABa	165.51±4.98Ba	0.33±0.01Ba	2.19±0.04Ba	16.87±0.11Ba	117.94±2.90Ca
	20—40	1.63±0.04Ca	116.15±10.75Cb	0.34±0.01Aa	3.76±0.17Ba	15.43±0.83Ba	107.00±0.93Cc
	40—60	0.95±0.34Ab	88.23±1.37Cc	0.25±0.05Aa	3.38±0.83Ba	15.72±1.77Da	93.57±4.08BCb
阔叶混交林	0—20	2.38±0.09Ba	173.33±2.70Ba	0.44±0.03BCa	5.42±0.22Cb	17.49±1.23BCa	76.80±12.89Aa
	20—40	1.43±0.04Bb	99.22±6.83Bb	0.51±0.14Ba	2.48±0.18Aa	14.56±3.17Ba	113.40±3.87Db
	40—60	0.85±0.04Ac	72.13±6.06Bc	0.34±0.02Ba	2.34±0.21Aa	10.20±0.61Bb	86.10±4.35ABc
针阔混交林	0—20	2.96±0.70Ba	221.09±43.47Ba	0.33±0.03Ca	6.67±0.40Dc	20.94±2.79Ca	115.07±1.02Cc
	20—40	1.51±0.07BCb	106.76±5.14BCb	0.33±0.02Aa	3.52±0.47Bb	18.33±1.12BCb	99.67±8.19Cb
	40—60	1.07±0.25Ab	81.80±2.81Cb	0.28±0.01Aa	2.84±0.44ABa	13.24±0.83Cc	71.06±4.51Aa

3.4 林分类型、土壤理化性质与土壤总有机碳含量的关系

由表 4 可知,马尾松林土壤有机碳含量与全氮含量显著正相关( $p<0.05$ ),相关系数为 0.893,与水解氮极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数为 0.955;杉木林土壤有机碳含量与全氮、水解氮均显著负相关( $p<0.05$ ),相关系数分别为-0.897,-0.872;针叶混交林与土壤 pH 显著负相关( $p<0.05$ ),相关系数为-0.826,与土壤含水量、全氮及全钾显著正相关( $p<0.05$ ),相关系数分别为 0.834,

0.911,0.881;阔叶混交林与土壤 pH 极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数为 0.891,与全钾含量显著正相关( $p<0.05$ ),相关系数为 0.789;针阔混交林与土壤含水量、全氮、全磷、全钾含量极显著正相关( $p<0.01$ ),相关系数分别为 0.928,0.924,0.879,0.727,与石砾含量和水解氮含量显著负相关( $p<0.05$ ),相关系数分别为-0.673,-0.516,与有效磷含量显著正相关( $p<0.05$ ),相关系数为 0.727。针阔混交林土壤有机碳含量与多项土壤理化性质存在较大相关性。

表 4 不同林分类型土壤有机碳与土壤理化因子间的相关性

Table 4 Correlation between soil organic carbon and soil physicochemical factors in different forest types

分组	土壤 pH	石砾含量	土壤容重	土壤含水量	全氮	水解氮	全磷	有效磷	全钾	速效钾
马尾松林	-0.178	0.218	-0.328	-0.433	0.893 *	0.955 **	-0.317	-0.356	0.236	0.401
杉木林	0.006	-0.746	-0.189	-0.685	-0.897 *	-0.872 *	-0.411	-0.806	-0.161	-0.47
针叶混交林	-0.826 *	-0.175	-0.666	0.834 *	0.911 *	0.564	-0.618	0.329	0.881 *	0.402
阔叶混交林	0.891 **	-0.528	-0.122	-0.210	-0.334	0.533	-0.539	-0.026	0.789 *	-0.337
针阔混交林	-0.174	-0.673 *	-0.004	0.928 **	0.924 **	-0.516 *	0.879 **	0.616 *	0.727 **	0.422

注: \* 在 0.05 级别(双尾),相关性显著, \*\* 在 0.01 级别(双尾),相关性显著。

根据相关性分析情况,以土壤有机碳含量为因变量( $y$ ),相关性因子(土壤 pH、石砾含量、土壤含水量、全氮、水解氮、全磷、有效磷、全钾)为自变量  $x$ ,采用剔除法分别进行逐步多元回归分析(引入因子  $p<0.05$ ,剔除因子  $p<0.1$ ),回归方程和回归系数均达到极显著水平( $p<0.01$ ),进而得到如下回归方程(表 5)。由标准化系数可知,马尾松林土壤有机碳含量主要受水解氮含量影响,杉木林与针叶混交林主要受全氮含量影响,阔叶混交林主要受土壤 pH 影响,针阔

混交林主导因子有土壤含水量、全磷、水解氮、全氮,且影响程度表现为含水量>全磷>水解氮>全氮。由此说明随着林分类型的改变,土壤有机碳含量主要影响因素随之改变。

4 讨论

4.1 不同林分类型下的土壤有机碳含量变化特征

土壤中的有机碳主要来源于枯落物的分解、植物根系分泌的物质和根系活动产生的碎屑等<sup>[14-15]</sup>,且这

类物质地面表层最为集中。本研究结果显示,不同林分类型土壤有机碳含量均随土层深度的增加而逐渐降低,表现出明显的垂直分布特征,且表层(0—20 cm 层)与中下 2 层(20—40 cm, 40—60 cm 层)差异显著,这一结果说明树种组成结构对土壤有机碳的影响主要体现在表层<sup>[10,16-18]</sup>,其原因在于随着土层深入,深层土壤根系分布逐级递减,地表枯落物和植物根系分解形成的有机质迁移作用随之减缓<sup>[19-20]</sup>。王洋等<sup>[19]</sup>研究也发现植被类型主要对林下表层有机质和养分产生影响,与本文研究结果一致。此外,不同林分类型间土壤有机碳含量也存在明显差异,且表现为针阔混交林>阔叶混交林>杉木林>针叶混交

林>马尾松林。形成这种差异的主要原因是不同林分类型生长特性不同,对土壤养分封存能力也不同,导致植被对土壤养分输入、输出量的平衡控制存在差异,从而导致土壤碳的累积和释放速率有所差异<sup>[21]</sup>。针阔混交林与阔叶混交林枝叶繁茂,林下灌、草植被多样性丰富,根系分布范围广,且枯落物质量多、生物量归还速率较快,因此这 2 种林分类型输入土壤有机物质较其他 3 种林分类型多。除上述原因外,试验地位于黔东南州少数民族聚集地区,该区域居民常年以针叶林下枯落物为引火柴,长期的人为干扰也会造成杉木林、马尾松—杉木混交林、马尾松林地土壤有机碳严重流失<sup>[22]</sup>。

表 5 不同林分类型土壤有机碳与土壤理化因子回归模型

Table 5 Regression Models of Soil Organic Carbon and Soil Physical and Chemical Factors for Different Forest Types

分组	回归方程模型	标准化系数(B)	R <sup>2</sup>	主要影响因子
马尾松林	$y = -1.294 + 1.413x_5$	0.955	0.913	水解氮
杉木林	$y = 5.345 + 14.412x_4$	0.897	0.805	全氮
针叶混交林	$y = 3.627 + 0.268x_4$	0.911	0.830	全氮
阔叶混交林	$y = 23.164 + 0.766x_1$	0.891	0.794	pH
针阔混交林	$y = 35.559 + 17.766x_3 - 131.414x_5 + 6.245x_6 - 0.406x_4$	-0.127; -0.300; 0.357; 0.529	0.982	含水量>全磷>水解氮>全氮

注: y 表示土壤有机碳总量;  $x_1$  表示 pH;  $x_2$  表示土壤石砾含量;  $x_3$  表示土壤含水量;  $x_4$  表示全氮;  $x_5$  表示水解氮;  $x_6$  表示全磷。

#### 4.2 不同林分类型土壤理化因子对土壤总有机碳含量的影响

本研究结果表明,土壤 pH 与针叶混交林土壤有机碳含量呈显著负相关,与阔叶混交林呈极显著正相关,这是因为土壤 pH 的变化会引起土壤中微生物种类及活性的改变,从而影响土壤 SOC 的固存和分布<sup>[23]</sup>。一般认为,土壤酸性越强对有机物质的分解越慢,土壤中有机碳的含量就越高,研究中阔叶林与针叶混交林表现相反,可能与阔叶林土壤 pH 大于针叶混交林有关<sup>[10]</sup>;土壤含水量、全氮含量与针叶混交林、针阔混交林土壤有机碳含量均呈显著正相关,这与 Lin 等人研究结果一致<sup>[24]</sup>。这是因为土壤水分含量会影响枯落物分解速率和土壤蛋白酶的活性,从而间接影响土壤中碳、氮的积累,且二者间为正向效应<sup>[25]</sup>;土壤全磷含量与针阔混交林土壤有机碳含量呈显著正相关,全钾含量与针叶混交林、阔叶混交林、针阔混交林呈正相关,这与张慧东等<sup>[26]</sup>研究结果一致,这是因为 SOC 的分解可以促进 N, P, K 元素释放至土壤,而土壤中 N, P, K 的增加又可促进 SOC 的积累。不同林分类型下主导土壤有机碳积累的因子有所差异,再次体现不同林分类型生长特性的不同,对生长过程中土壤环境的需求也有所不同。

使用剔除法逐步多元回归找到不同林分类型主

导土壤有机碳含量变化的因子,并以该因子作为自变量建立高精度线性回归模型可有效预测不同林分类型土壤有机碳含量。研究表明,土壤有机碳与多项理化因子存在相关性,经逐步多元回归分析后得到水解氮是马尾松林土壤有机碳含量的主导因子,全氮是杉木林、针叶混交林的主导因子, pH 是阔叶混交林的主导因子,土壤含水量、氮、磷是针阔混交林的主导因子。依据线性回归模型,使用这些因子测定数据可估算对应林分土壤有机碳含量,这为黔东南州树种结构调整指明方向的同时,还为估算森林碳储量提供了科学依据。

## 5 结论

(1) 5 种林分类型中,相比之下针阔混交林土壤有机碳含量最高,说明营造针阔混交林更有利于土壤碳的积累。

(2) 不同林分类型土壤环境的差异对土壤有机碳积累的影响作用不同。本文研究的 5 种林分类型中,杉木林与针阔混交林土壤有机碳含量受土壤理化性质影响较大。

(3) 马尾松林土壤有机碳含量与水解氮极显著正相关;杉木林与全氮、水解氮显著负相关;针叶混交林与土壤 pH 显著负相关,与土壤含水量、全氮及全

钾显著正相关;阔叶混交林与土壤 pH 极显著正相关;针阔混交林与土壤含水量、全氮、全磷、全钾含量极显著正相关。各相关因子中,水解氮是马尾松林土壤有机碳含量的主导因子,全氮是杉木林与针叶混交林的主导因子,土壤 pH 是阔叶混交林的主导因子,土壤含水量是针阔混交林的主导因子。

#### 参考文献(References):

- [1] 邱思慧,林少颖,王维奇.中国东部地区不同海拔梯度土壤有机碳库特征及其影响因素综述[J].中国水土保持科学,2022,20(3):142-150.  
Qiu S H, Lin S Y, Wang W Q. Characteristics of soil organic carbon pool at different altitude gradients in eastern China and its influencing factors: A review[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2022, 20(3): 142-150.
- [2] Davidson E A, Janssens I A. Temperature sensitivity of soil carbon decomposition and feedbacks to climate change[J]. Nature, 2006, 440(10):165-173.
- [3] 王艺杰,于丽君,张稳,等.造林后表层土壤有机碳变化及影响因素分析[J].地理与地理信息科学,2022,38(2):103-111.  
Wang Y J, Yu L J, Zhang W, et al. Analysis on changes of top soil organic carbon after afforestation and the influencing factors[J]. Geography and Geo-Information Science, 2022, 38(2):103-111.
- [4] 任向宁,董玉祥,王秋香.珠三角核心区农田耕层土壤有机碳库储量时空变化特征及其影响因素识别[J].热带地理,2018,38(5):668-677.  
Ren X N, Dong Y X, Wang Q X. Temporal and spatial variation of soil organic carbon storage in the core area of Pearl River Delta and identification of influencing factors[J]. Tropical Geogr, 2018, 38(5):668-677.
- [5] 刘晨.松嫩平原西部土壤有机碳时空变化及其影响因素分析[D].哈尔滨:哈尔滨师范大学,2017.  
Liu C. Temporal and spatial variation of soil organic carbon and its influencing factors in western songnen plain [D]. Harbin: Harbin Normal University, 2017.
- [6] 胥超,谢锦升,曾宏达,等.自然恢复和人工促进恢复对侵蚀退化生态系统碳贮量的影响比较[J].亚热带资源与环境学报,2014,9(1):53-60.  
Xu C, Xie J S, Zeng H D, et al. Effects of natural restoration and artificial rehabilitation on carbon storage in degraded forest ecosystems[J]. Journal of Subtropical Resources and Environment, 2014, 9(1):53-60.
- [7] 陈金磊,张仕吉,李雷达,等.亚热带不同植被恢复阶段林地凋落物层现存量 and 养分特征[J].生态学报,2020,40(12):4073-4086.  
Chen J L, Zhang S J, Li L D, et al. Stock and nutrient characteristics of litter layer at different vegetation restoration stages in subtropical region, China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(12):4073-4086.
- [8] 张仲胜,李敏,宋晓林,等.气候变化对土壤有机碳库分子结构特征与稳定性影响研究进展[J].土壤学报,2018,55(2):273-282.  
Zhang Z S, Li M, Song X L, et al. Effects of climate change on molecular structure and stability of soil carbon pool: A general review[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2):273-282.
- [9] 解玲玲,王邵军,肖博,等.土壤碳库积累与分配对热带森林恢复的响应[J].生态学报,2023,43(23):1-14.  
Xie L L, Wang S J, Xiao B, et al. Responses of soil carbon component accumulation and allocation to tropical forest restoration[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(23):1-14.
- [10] 王冰,张鹏杰,张秋良.不同林龄兴安落叶松林土壤总有机碳与理化性质的关系[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2021,49(10):36-45.  
Wang B, Zhang P J, Zhang Q L. Relationship between soil total organic carbon and physicochemical properties in *Larix gmelinii* forests at different ages[J]. Journal of Northwest A&F University: Nat. Sci Ed., 2021, 49(10):36-45.
- [11] 曹小玉,李际平,张彩彩,等.不同龄组杉木林土壤有机碳和理化性质的变化特征及其通径分析[J].水土保持学报,2014,28(4):200-205.  
Cao X Y, Li J P, Zhang C C, et al. Variation of contents of organic carbon and physic-chemical properties of soil and path analysis for their relations in different age-group Chinese fir plantations[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(4):200-205.
- [12] 王瑾.土壤理化性质及外源养分添加对土壤有机碳平均周转时间的影响[D].南京:南京信息工程大学,2022.  
Wang J. Effects of soil physical and chemical properties and exogenous nutrients addition on the mean turnover times of soil organic carbon[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science and Technology, 2022.
- [13] 张增可,吴雅华,黄柳菁,等.海岛森林不同演替阶段土壤和植物的碳、氮、磷化学计量特征[J].西北植物学报,2019,39(5):925-934.  
Zhang Z K, Wu Y H, Huang L Q, et al. C, N and P stoichiometry of soil and plant in different forest successional stages in island[J]. Acta Bot. Boreal.-Occident. Sin., 2019, 39(5):925-934.
- [14] Wang H Y, Wu J Q, Li G, et al. Changes in soil carbon



- fractions and enzyme activities under different vegetation types of the northern Loess Plateau[J]. *Ecology and Evolution*, 2020,10(21):12211-12223.
- [15] 王一诺,徐志伟,王升忠.白江河天然和排水泥炭沼泽土壤活性有机碳组分含量及其影响因素研究[J].*湿地科学*,2021,19(6):691-701.  
Wang Y N, Xu Z W, Wang S Z. Concentrations of active organic carbon components in soils in Baijianghe natural and drained peat bogs and their influencing factors[J]. *Wetland Science*, 2021,19(6):691-701.
- [16] Ye Y, Juan L, Liang Y. Soil microbial community and physicochemical properties together drive soil organic carbon in *Cunninghamia lanceolata* plantations of different stand ages[J]. *PeerJ*, 2022,10: e13873.
- [17] 李明军,喻理飞,杜明凤,等.不同林龄杉木人工林植物—凋落叶—土壤 C, N, P 化学计量特征及互作关系[J].*生态学报*,2018,38(21):7772-7781.  
Li M J, Yu L F, Du M F, et al. C, N, and P stoichiometry and their interaction with plants, litter, and soil in a *Cunninghamia lanceolata* plantation with different ages [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38 (21):7772-7781.
- [18] 黄丽,范兴科.磷肥和钾肥不同配施方式对其养分在土壤中迁移的影响[J].*水土保持学报*,2018,32(2):184-190.  
Huang L, Fan X K. The effects of phosphate and potash fertilizers in different facilities on soil nutrient migration [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018,32 (2):184-190.
- [19] 王洋,何超银,齐也,等.粤北不同林分类型土壤有机碳含量和碳储量垂直分布特征研究[J].*林业与环境科学*,2022,38(4):88-93.  
Wang Y, He C Y, Qi Y, et al. Study on vertical distribution characteristics of soil organic carbon content and carbon stocks of different stand types in northern Guangdong[J]. *Forestry and Environmental Science*, 2022,38(4):88-93.
- [20] Ansari M A, Choudhury B U, Mandal S, et al. Converting primary forests to cultivated lands: Long-term effects on the vertical distribution of soil carbon and biological activity in the foothills of Eastern Himalaya[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022,301:113886.
- [21] 张晗,欧阳真程,赵小敏,等.江西省不同农田利用方式对土壤碳、氮和碳氮比的影响[J].*环境科学学报*,2018,38(6):2486-2497.
- Zhang H, Ouyang Z C, Zhao X M, et al. Effects of different land use types on soil organic carbon, nitrogen and ratio of carbon to nitrogen in the plow layer of farmland soil in Jiangxi Province[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018,38(6):2486-2497.
- [22] 弓文艳,陈丽华,郑学良.基于不同林分类型下土壤碳氮储量垂直分布[J].*水土保持学报*,2019,33(1):152-157,164.  
Gong W Y, Chen L H, Zheng X L. Vertical distributions of soil carbon and nitrogen reserves in different forests[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019,33(1):152-157,164.
- [23] 洪雪姣.大、小兴安岭主要森林群落类型土壤有机碳密度及影响因子的研究[D].哈尔滨:东北林业大学,2012.  
Hong X J. The research of organic carbon density of soil and influcing factors of main forest community type in Greater and Lesser Khingan Mountains [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2012.
- [24] 李昕竹,贡璐,唐军虎,等.塔里木盆地北缘绿洲不同连作年限棉田土壤有机碳组分特征及其与理化因子的相关性[J].*环境科学*,2022,43(10):4639-4647.  
Li X Z, Gong L, Tang J H, et al. Characteristics of soil organic carbon components and their correlation with other soil physical and chemical factors in cotton fields with different continuous cropping years in the oasis on the Northern Edge of Tarim Basin[J]. *Environmental Science*, 2022,43(10):4639-4647.
- [25] 元晓春,林惠瑛,曾泉鑫,等.武夷山不同海拔梯度黄山松土壤有机氮解聚酶活性及其影响因素[J].*生态学报*,2022,42(4):1560-1570.  
Yuan X C, Lin H Y, Zeng Q X, et al. Soil organic nitrogen depolymerase activities and its influencing factors of *Pinus taiwanensis* at different altitude gradients in Wuyi Mountain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42 (4):1560-1570.
- [26] 张慧东,尤文忠,魏文俊,等.辽东山区原始红松林土壤理化性质及其与土壤有机碳的相关性分析[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2017,45(1):76-82.  
Zhang H D, You W Z, Wei W J, et al. Soil physical and chemical properties and correlation with organic carbon in original Korean pine forest in Eastern Liaoning mountainous area[J]. *Journal of Northwest A&F University:Nat. Sci Ed.*,2017,45(1):76-82.