

DOI: 10.20103/j.stxb.202403240601

师立鹏, 谷会岩, 王秀伟. 典型黑土区不同树种退耕还林地土壤活性有机碳差异及其影响因素. 生态学报, 2025, 45(1): 103-111.

Shi L P, Gu H Y, Wang X W. Vertical variation patterns of soil labile organic carbon under the different tree species for the Grain for Green Project in typical black soil region. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(1): 103-111.

典型黑土区不同树种退耕还林地土壤活性有机碳差异及其影响因素

师立鹏¹, 谷会岩¹, 王秀伟^{1,2,*}

1 东北林业大学林学院, 哈尔滨 150040

2 东北林业大学森林生态系统可持续经营教育部重点实验室, 哈尔滨 150040

摘要: 为探究东北典型黑土区不同退耕还林树种对土壤有机碳及其活性组分含量的垂直分布的影响, 并分析其影响因素, 为黑土修复工作及树种筛选提供理论依据。在东北典型黑土区分别选择以小黑杨 (*Populus × xiaohei*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 和落叶松 (*Larix gmelinii*) 为造林树种的退耕还林地作为研究对象, 测定不同深度土壤有机碳、微生物量碳和溶解性有机碳含量, 探究其不同树种退耕还林地间的差异及其与土壤理化性质、土壤酶活性和植物细根生物量的关系。结果表明: 在 5—15 cm 处小黑杨林下土壤溶解性有机碳含量 (1578.56 mg/kg) 显著低于落叶松 (1936.98 mg/kg) 和樟子松 (2046.07 mg/kg) 林 ($P < 0.05$); 在 15—30 cm 处小黑杨林下土壤溶解性有机碳含量 (1541.57 mg/kg) 显著低于落叶松 (1957.04 mg/kg) 和樟子松 (1881.31 mg/kg) 林, 樟子松林下土壤微生物量碳含量 (2256.99 mg/kg) 显著高于小黑杨 (1708.50 mg/kg) 和落叶松 (1200.55 mg/kg) 林 ($P < 0.05$)。土壤 pH、土壤全磷含量、土壤含水量和土壤容重在不同树种退耕还林地间存在显著差异。土壤有机碳和溶解性有机碳含量随土壤深度增加逐渐降低, 微生物量碳含量在不同土壤深度间没有显著差异。土壤溶解性有机碳和微生物量碳含量与土壤磷含量显著正相关, 土壤有机碳与土壤氮含量、植物细根生物量和 β -1,4 葡萄糖苷酶活性显著正相关 ($P < 0.05$)。退耕还林后不同树种退耕还林地土壤有机碳含量差异不显著, 但不同树种退耕还林地间土壤溶解性有机碳和土壤微生物量碳含量存在显著差异。土壤全磷是对 3 个树种退耕还林地土壤有机碳、溶解性有机碳和微生物量碳分布影响最大的因素。

关键词: 东北黑土区; 退耕还林; 土壤有机碳; 溶解性有机碳; 微生物量碳

Vertical variation patterns of soil labile organic carbon under the different tree species for the Grain for Green Project in typical black soil region

SHI Lipeng¹, GU Huiyan¹, WANG Xiuwei^{1,2,*}

1 School of forestry, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

2 Key Laboratory of Sustainable Forest Ecosystem Management-Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China

Abstract: To provide theoretical basis for restoration of black soil and tree species screening, the vertical distribution and its influencing factors of soil organic carbon and labile carbon fractions of converting cultivated lands into forestlands in typical black soil region were investigated. In the typical black soil area of Northeast China, three return farmland to forest land were selected as the research objects, and the afforestation trees were *Populus × xiaohei*, *Pinus sylvestris* var. *mongolica* and *Larix gmelinii*. The research studied the vertical distribution characteristics of soil organic carbon, microbial biomass carbon, and dissolved organic carbon and their relationships with soil physicochemical properties and soil enzyme

基金项目: 国家重点研发计划课题 (2021YFD1500705)

收稿日期: 2024-03-24; 网络出版日期: 2024-09-27

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: wxgreat@nefu.edu.cn

activities. The result showed that: The soil dissolved organic carbon content (1578.56 mg/kg) at 5—15 cm was significantly lower than that of larch (1936.98 mg/kg) and *Pinus sylvestris* (2046.07 mg/kg), The microbial carbon content (2151.53 mg/kg) was significantly higher than that of *Populus × xiaohei* (1298.32 mg/kg) and larch (1164.75 mg/kg); The dissolved organic carbon content (1541.57 mg/kg) at 15—30 cm was significantly lower than that of larch (1957.04 mg/kg) and *Pinus sylvestris* (1881.31 mg/kg). The microbial carbon content (2256.99 mg/kg) was significantly higher than that of *Populus × xiaohei* (1708.50 mg/kg) and larch (1200.55 mg/kg). Soil pH, soil total phosphorus content, soil water content and soil bulk density were significantly different among different tree species. The contents of soil organic carbon and dissolved organic carbon decreased gradually with the increase of soil depth, and the content of microbial biomass carbon had no significant difference between different soil depths. Redundancy analysis and correlation analysis showed that soil dissolved organic carbon and microbial biomass carbon were positively correlated with soil phosphorus content, and soil organic carbon was positively correlated with soil nitrogen content, plant fine root biomass and β -1,4 glucosidase (BG). After returning farmland to forest, the soil organic carbon content of different tree species was not significantly different, but there were significant differences in soil dissolved organic carbon and soil microbial biomass and carbon content between different tree species. Soil total phosphorus content was the most important factor affecting the vertical distribution of soil organic carbon and soil microbial biomass carbon among the three tree species. Soil total phosphorus could explain 27.33% of the variation of soil organic carbon, soil dissolved organic carbon and soil microbial biomass carbon in the forest land of different tree species. The ratio of soil carbon to phosphorus could explain 24.37% of the variation of soil organic carbon, soil dissolved organic carbon and soil microbial biomass carbon in the forest land of different tree species.

Key Words: black soil region of Northeast China; Grain for Green Project; soil organic carbon; dissolved organic carbon; microbial biomass carbon

土壤有机碳 (SOC) 包含一系列简单或者复杂的有机化合物, 依据其稳定性可以将其分为活性有机碳, 缓效有机碳和惰性有机碳^[1]。虽然土壤活性有机碳占土壤有机碳库的比例较小, 但是土壤活性有机碳对土地利用和植被变化反应敏感, 稳定性差, 能快速响应外界环境的变化, 更好地反映土壤有机碳的动态变化^[1-2]。土壤溶解性有机碳 (DOC) 和土壤微生物量碳 (MBC) 是土壤活性有机碳的重要组成部分, 其中溶解性有机碳具有移动性和活跃性, 是土壤微生物的重要能量和营养来源, 容易被土壤微生物矿化, 而土壤微生物量碳与土壤微生物生物量有关, 控制着土壤有机碳的固存和分解^[3-4]。因此, 研究土壤溶解性有机碳和微生物量碳的变化对于了解土壤有机碳的稳定性有重要意义。

黑土区土壤有机质含量高, 土地肥沃, 是我国的重要粮食产地, 但是现在面临严重的土壤侵蚀问题。为了应对东北黑土区土壤有机质含量下降、土壤退化等问题, 保护黑土资源, 东北黑土区开展了大面积的退耕还林^[5-6]。退耕还林会改变土壤性质^[7-8], 增加土壤有机碳的含量和质量^[6], 进而影响土壤固碳潜力^[9]。目前国内外学者对雨林、湿地和稻田等生态系统中的土壤有机碳、土壤溶解性有机碳和土壤微生物量碳进行了大量研究^[10-14], 然而对东北典型黑土区退耕还林地土壤有机碳及其活性组分的研究较少, 且集中于表层土壤^[6]。乔木具有较深的根系分布, 可能会影响深层土壤中有机碳的分布^[15]。此外, 已有研究报道了植被类型对土壤有机碳及其活性组分的分布具有重要影响^[16], 但是典型黑土区不同退耕还林树种对土壤有机碳及其活性组分的影响还知之甚少。小黑杨 (*Populus × xiaohei*)、樟子松 (*Pinus sylvestris* var. *mongolica*) 和落叶松 (*Larix gmelinii*) 是东北黑土区常见的退耕还林树种^[8, 17]。本研究以东北典型黑土区这 3 个树种的退耕还林地作为研究对象, 比较 3 个树种林下 0—45 cm 土层土壤有机碳、溶解性有机碳和微生物量碳的含量的变化, 同时分析土壤理化性质、植物细根生物量和土壤酶活性等因子与土壤有机碳和土壤活性有机碳含量的关系, 旨在揭示东北黑土区不同退耕还林树种对林下土壤有机碳和土壤活性有机碳含量垂直分布的影响, 为黑土修复工

作及退耕还林的树种筛选提供理论依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

实验地点位于黑龙江省克山县克山农场(48°12′—48°23′N, 125°8′—125°37′E)。克山农场地处东北典型黑土区,土地肥沃,土壤有机质含量高。气候类型为寒温带大陆季风气候,夏季高温多雨,冬季寒冷干燥。其中年平均降水量为 501.77 mm,主要集中在 6—8 月份;年平均气温为 0.9 ℃,其中极端高温达到 36.5 ℃,极端低温在-37.6 ℃左右,无霜期约为 130 d。

表 1 林分概况

Table 1 General characteristics of stands

树种 Tree species	林龄/a Stand ages	胸径/cm Diameter at breast height	株行距/m Planting space	郁闭度 Canopy densities	枯落物/(g/cm ²) Litter
小黑杨 <i>Populus × xiaohei</i>	25	21.35	2×3	0.7	2.17±0.53
落叶松 <i>Larix gmelinii</i>	25	14.05	3×4	0.8	8.07±0.72
樟子松 <i>Pinus sylvestris</i> var. <i>mongolica</i>	25	20.84	3×4	0.7	0.98±0.19

1.2 样地选择及采样

2022 年 8 月,在克山农场同一地点选择彼此相邻的 25 年生小黑杨、落叶松和樟子松林做为研究对象。所选样地为位于同一坡面相同坡位的退耕还林地,退耕还林前不同年份交替种植玉米和土豆,其管理方式和所施肥料基本一致。所选 3 种林分立地条件相同且均未经过抚育间伐、施肥等管理措施林分密度和郁闭度基本一致,土壤类型均为黏化湿润均腐土。实验样地的具体信息请参考表 1。样地选择完成后,在各林分随机设置 3 个 5 m×5 m 的样方,对土壤、枯落物和细根进行取样。具体为:(1)在每个样方内随机选择 5 个取样点,每个取样点用直径 10 cm 的根钻收集地表枯落物,将同一样方中收集的地表枯落物混合成一个样品带回实验室用于测定地表枯落物生物量。(2)在每个采样点用根钻采集 0—5 cm、5—15 cm、15—30 cm、30—45 cm 处的植物根系,将同一样地相同深度的 5 个样品混合后带回实验室,从中挑出直径<1 mm 的细根用于测定各深度的植物细根生物量。(3)在每个取样点挖 45 cm 深的土壤剖面,分别采集各深度的土壤样品,将每个样方相同深度采集的土壤样品混合均匀后分成 2 份,1 份土壤样品放入装有冰袋的保温箱中,运回实验室用于土壤溶解性有机碳、微生物量碳含量和酶活性的测定,另 1 份土壤样品运回实验室后自然风干,过 2 mm 土壤筛后用于土壤有机碳、土壤全氮、土壤全磷含量和土壤 pH 的测定。同时在每个深度用直径 5 cm 的环刀取原状土,用于测定土壤容重和土壤含水量。

1.3 样品分析测定

土壤有机碳用碳氮分析仪(multi C/N 2100 德国)进行测定;土壤溶解性有机碳测定:将去离子水与新鲜的土壤样品按 5:1 的比例混合后在摇床上以 200 rpm 的频率震荡 30 min。震荡完成后用 0.45 μm 的滤膜进行过滤,用碳氮分析仪(multi C/N 2100 德国)测定滤液中的有机碳含量。土壤微生物量碳(MBC)采用氯仿熏蒸法进行测定^[18]。

土壤 pH 用 pH 计(PHS-3C,上海精密科学仪器有限公司)测定(水土质量比为 1.0:2.5);土壤含水量用烘干法进行测定;土壤全氮用凯氏定氮法进行测定;土壤全磷用采用硫酸-高氯酸消煮,钼酸铵比色法进行测定^[19];土壤酶活性采用荧光微孔板法进行测定^[20-21]。

从采集到的植物根系中挑选出直径<1 mm 的细根,洗净后 70 ℃下烘干至恒重,测定其干重记为 m_1 。细根生物量(M_{root})通过以下公式计算:

$$M_{\text{root}} = m_1 / (5 \times s \times h)$$

式中, m_1 :细根干重(g); s :根钻横截面积(cm²); h :样品对应的土柱的高度(cm)

将收集到的枯落物中的杂质挑出后洗净, 70 °C 下烘干至恒重, 测定其干重记为 m_2 。枯落物生物量 (M_{litter}) 通过以下公式计算:

$$M_{\text{litter}} = m_2 / (5 \times s)$$

式中, m_2 : 枯落物干重(g); s : 根钻横截面积(cm^2)

1.4 数据分析

采用双因素方差分析(ANOVA), 分析树种和土壤深度对土壤有机碳、土壤溶解性有机碳、土壤微生物量碳、土壤理化性质和细根生物量的影响, 显著水平 P 为 0.05。采用 Hmisc 包对各因子进行相关性分析(Pearson 法), 并采用 rdacca.hp 包和 vegan 包进行冗余分析, 评价土壤理化性质、土壤酶活性和细根生物量对土壤有机碳及其活性组分的影响和相对重要性。在冗余分析之前检验了所有纳入模型变量的共线性, 排除了膨胀系数(VIF) > 10 的变量。利用 ggplot2 包作图。所有统计分析均采用 R4.2.2 软件进行。

2 结果

2.1 退耕还林后不同树种林下土壤有机碳及活性有机碳含量垂直分布的差异

研究区 3 个退耕还林树种林下土壤有机碳含量变化范围为 41.37—75.87 g/kg, 均随土壤深度的增加而降低($P < 0.05$)。研究区 3 个退耕还林树种林下土壤溶解性有机碳含量变化范围为 1479.53—2255.05 mg/kg, 均呈随土壤深度的增加而降低的趋势($P < 0.05$)。在 0—5 cm 土层小黑杨和落叶松林的土壤溶解性有机碳含量显著低于樟子松林($P < 0.05$); 在 5—30 cm 土层樟子松和落叶松林的土壤溶解性有机碳含量显著高于小黑杨林($P < 0.05$); 在 30—45 cm 土层土壤溶解性有机碳含量在不同树种间差异不显著。研究区 3 个退耕还林树种林下土壤微生物量碳变化范围为 898.46—2600.74 mg/kg。在 0—5 cm 和 15—30 cm 土层樟子松林的土壤微生物量碳显著高于落叶松林; 在 5—15 cm 土层樟子松林的土壤微生物量碳显著高于落叶松和小黑杨林(图 1)。

土壤溶解性有机碳和土壤微生物量碳与土壤有机碳的比值(DOC/SOC 和 MBC/SOC)可以用来反映土壤有机碳的稳定程度^[7]。研究区溶解性有机碳/土壤有机碳(DOC/SOC)比值变化范围为 2.31%—4.20%。在 0—5 cm 和 30—45 cm 土层 3 个树种林下土壤 DOC/SOC 比值没有显著差异; 在 5—15 cm 土层小黑杨林的土壤 DOC/SOC 比值显著低于落叶松林和樟子松林; 在 15—30 cm 土层落叶松林的土壤 DOC/SOC 比值显著低于小黑杨林和樟子松林($P < 0.05$)。研究区 3 个退耕还林树种林下土壤微生物量碳/土壤有机碳(MBC/SOC)比值变化范围为 1.34%—4.37%, 在不同土层间不存在显著差异。在 0—5 cm 和 30—45 cm 土层土壤 MBC/SOC 比值在不同树种间没有显著差异; 在 5—15 cm 土层樟子松林的土壤 MBC/SOC 比值显著高于落叶松林和小黑杨林; 在 15—30 cm 土层落叶松林的土壤 MBC/SOC 比值显著低于樟子松林(图 1)。

2.2 退耕还林后不同树种林下土壤理化性质和植物细根生物量的差异

研究区土壤 pH、土壤磷含量、细根生物量、土壤含水量和土壤容重在不同树种间差异显著($P < 0.05$), 土壤深度显著影响土壤氮、磷含量、土壤碳磷比和细根生物量($P < 0.05$), 树种和土壤深度的交互作用显著影响土壤 pH、土壤磷含量、土壤碳磷比和土壤含水量(表 2)。

在 0—5 cm 土层小黑杨林土壤 pH 均显著高于樟子松林和落叶松林, 在 5—45 cm 土层樟子松林土壤 pH 显著高于小黑杨林和落叶松林($P < 0.05$)。在 0—5 cm 和 30—45 cm 土层土壤磷含量在不同树种间没有显著差异, 而在 5—30 cm 土层樟子松林下土壤磷含量显著高于小黑杨林($P < 0.05$)。在 0—5 cm 土层小黑杨林土壤含水量显著高于落叶松林和樟子松林, 在 5—15 cm 土层樟子松林土壤含水量显著高于落叶松林和小黑杨林, 而在 15—45 cm 土层土壤含水量在不同树种间没有显著差异。在 0—5 cm 土层落叶松林土壤容重显著高于樟子松林($P < 0.05$), 而在 5—45 cm 土层土壤容重在不同树种间没有显著差异。在 0—15 cm 土层小黑杨林土壤细根生物量显著高于樟子松林($P < 0.05$), 而 15—45 cm 土层细根生物量在不同树种间没有显著差异(表 3)($P < 0.05$)。

著负相关;溶解性有机碳与土壤有机碳的比值与土壤磷含量显著正相关,与土壤氮含量、土壤碳磷比和植物细根生物量呈显著负相关;土壤微生物量碳与土壤有机碳的比值与土壤 pH、土壤磷含量、土壤含水量正相关,与土壤碳磷比、植物细根生物量和土壤容重呈负相关(表 4)。

表 3 不同林分土壤剖面理化性质及细根生物量的比较

Table 3 Comparison of soil physic-chemical properties and fine-root biomass in soil profile among different stand types

指标 Index	林分 Stand	土壤深度 Soil depth/cm			
		0—5	5—15	15—30	30—45
pH	小黑杨	5.33±0.059Aa	4.85±0.079Bb	4.76±0.057Bb	4.77±0.108Cb
	落叶松	4.71±0.0459Ba	4.803±0.038Ba	4.75±0.096Ba	4.943±0.017Bb
	樟子松	4.65±0.099Bb	5.043±0.0713Aa	5.073±0.068Aa	5.13±0.091Aa
氮 N/(g/kg)	小黑杨	2.494±0.619Aa	1.453±0.316Ab	1.416±0.137Ab	1.379±0.369Ab
	落叶松	1.641±0.230Ba	1.379±0.138Aa	1.081±0.106Aa	1.303±0.421Aa
	樟子松	1.417±0.190Ba	1.491±0.294Aa	1.493±0.191Aa	1.044±0.051Aa
磷 P/(g/kg)	小黑杨	0.378±0.0342Aa	0.262±0.010Bb	0.239±0.0387Bb	0.219±0.004Ab
	落叶松	0.271±0.0453Aa	0.312±0.021ABa	0.236±0.057Ba	0.194±0.048Aa
	樟子松	0.278±0.0397Ab	0.431±0.046Aa	0.509±0.056Aa	0.284±0.172Ab
碳磷比 C/P	小黑杨	182.324±19.956Aa	255.599±21.227Aa	236.113±18.847Aa	229.981±18.474Aa
	落叶松	262.356±71.647Aa	169.261±2.854ABa	221.766±44.079Aa	247.087±63.814Aa
	樟子松	261.904±47.337Aa	138.085±6.459Bb	112.335±11.461Bb	233.512±100.398Aa
土壤含水量 SMC/%	小黑杨	0.267±0.0386Aa	0.222±0.014Bb	0.249±0.0359Aab	0.234±0.016Aab
	落叶松	0.198±0.0146Ba	0.206±0.0143Ba	0.221±0.0266Aa	0.224±0.014Aa
	樟子松	0.216±0.004Bb	0.282±0.016Aa	0.245±0.011Aab	0.231±0.023Ab
土壤容重 SD/(g/cm ³)	小黑杨	1.242±0.0435ABa	1.308±0.055Aa	1.227±0.067Aa	1.263±0.079Aa
	落叶松	1.334±0.0433Aa	1.298±0.0461Aa	1.265±0.082Aa	1.304±0.111Aa
	樟子松	1.192±0.0362Ba	1.182±0.071Aa	1.172±0.023Aa	1.224±0.088Aa
细根生物量 Mroot/(g/cm ³)	小黑杨	0.077±0.017Aa	0.047±0.021Ab	0.034±0.025Ab	0.035±0.016Ab
	落叶松	0.040±0.005Ba	0.027±0.013ABab	0.011±0.003Ab	0.015±0.006Aab
	樟子松	0.0180±0.007Ba	0.019±0.0004Ba	0.015±0.009Aa	0.011±0.007Aa

不同大写字母表示相同土壤深度不同树种间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示同一树种不同土壤深度间差异显著 ($P<0.05$)

表 4 土壤有机碳及其活性组分与土壤理化性质、酶活性和细根生物量的相关性

Table 4 Correlations between soil organic carbon and labile organic carbon and soil physic-chemical properties, enzyme activities and fine-root biomass

指标 Index	pH	氮 N	磷 P	碳磷比 C/P	细根生物量 Mroot	含水量 SMC	容重 SD	N-乙酰- β-D-葡 萄糖苷酶 NAG	β-1,4- 葡萄糖 苷酶 BG
溶解性有机碳 Dissolved organic carbon	-0.05	0.13	0.37 *	-0.18	-0.06	0.06	-0.22	0.05	0.14
微生物量碳 Microbial biomass carbon	0.37 *	0.07	0.56 **	-0.38 *	-0.29	0.46 **	-0.41 *	-0.05	0.13
土壤有机碳 Soil organic carbon	-0.07	0.44 **	0.22	0.18	0.44 **	-0.07	0.01	0.21	0.36 *
溶解性有机碳/土壤有机碳 Dissolved organic carbon/ Soil organic carbon	-0.01	-0.39 *	0.37 *	-0.33 *	-0.52 **	0.07	-0.18	-0.18	-0.29
微生物量碳/土壤有机碳 Microbial biomass carbon/ Soil organic carbon	0.41 *	-0.18	0.4 *	-0.42 *	-0.5 **	0.47 **	-0.4 *	-0.22	-0.09

* : $P<0.05$; ** : $P<0.01$

在土壤有机碳及活性组分与环境因子的冗余分析中,第一标准轴(RDA1)和第二标准轴(RDA2)分别解释了土壤有机碳及其活性组分变异的74.63%和0.43%。土壤磷含量和土壤碳磷比分别对土壤有机碳及其活性组分的解释率分别为27.33%和24.37%(图2)。

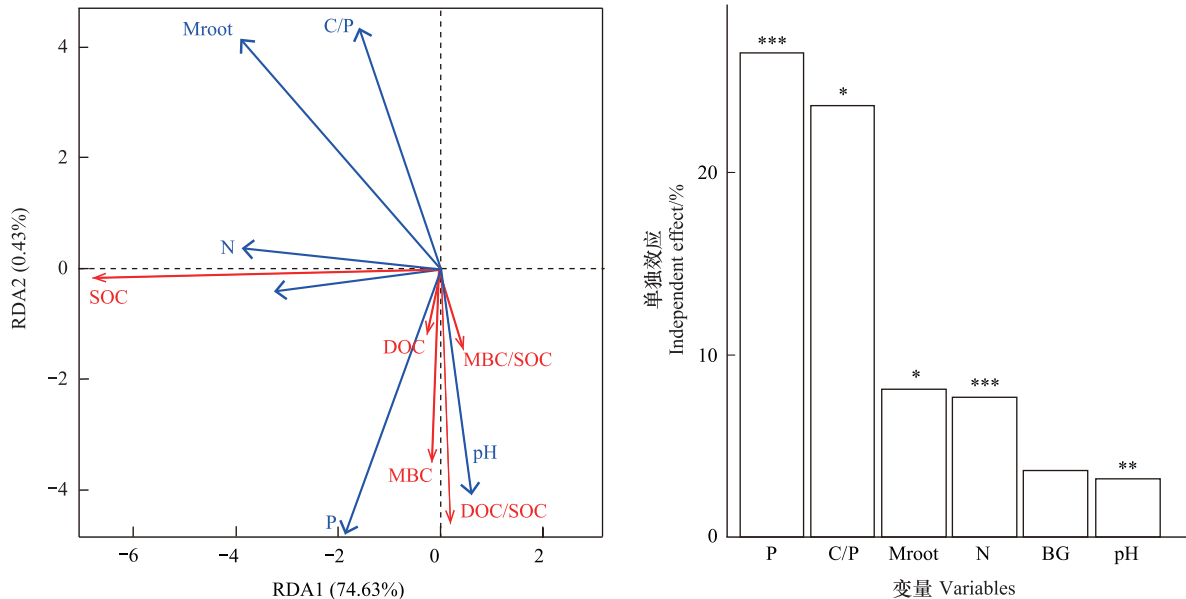


图2 环境因子对土壤活性有机碳组分影响的冗余分析和相对重要性

Fig.2 Redundancy analysis and relative importance of the effects of environmental factors on soil labile organic carbon

N:全氮;P:全磷;C/P:碳磷比;BG:β-1,4-葡萄糖苷酶; M_{root} :细根生物量;SOC:土壤有机碳;DOC:溶解性有机碳;MBC:微生物量碳;DOC/SOC:溶解性有机碳比土壤有机碳;MBC/SOC:微生物量碳比土壤有机碳;* : $P < 0.05$; ** : $P < 0.01$; *** : $P < 0.001$

3 讨论

有研究表明,随着土壤深度的增加土壤有机碳含量降低^[22]。本研究在3个退耕还林树种林下土壤中均存在土壤有机碳含量随土壤深度增加而降低的趋势,这可能与植物枯落物和细根是森林生态系统中土壤有机碳的重要来源有关^[23]。一方面植物枯落物在地表积累,其分解使得表层土壤有机碳含量增加^[9];另一方面是因为植物细根大多分布在土壤表层^[15],细根周转和根系释放的分泌物会增加表层土壤中土壤有机碳的输入,从而导致表层土壤有机碳含量高于下层土壤^[24]。而本研究中土壤有机碳与植物细根生物量显著正相关也证明了植物细根生物量是影响土壤有机碳的重要因素。在本研究中不同树种林下土壤有机碳含量没有显著差异,这与王磊等人在16年生小黑杨与柳树人工林下测得的结果相似^[25]。这可能与土壤有机碳库储量较大,植被对土壤有机碳库的改变需要较长时间的积累有关,有研究发现植物对土壤有机碳的影响具有时间依赖性^[26],即土壤有机碳库的变化与时间相关,且不同碳组分产生变化所需要的时间存在差异^[5]。因此不同树种对黑土土壤有机碳含量影响的差异可能需要更长时间的积累。

土壤溶解性有机碳是土壤中由多种有机化合物组成的一种混合物,具有活跃性和移动性,能够反映土壤碳库的微小变化^[3,27]。本研究中3个退耕还林树种林下土壤溶解性有机碳含量均存在随土壤深度的增加而减小的趋势,与先前的研究结果一致^[28],这可能与土壤溶解性有机碳含量受到土壤有机碳含量,植物枯落物淋溶以及细根周转等因素影响有关。本研究中0—30 cm深的土壤中均存在樟子松林下土壤溶解性有机碳含量显著高于小黑杨土壤,这可能与本研究中樟子松林下土壤中更高的磷含量有关。王一诺等^[29]发现全磷含量增大会促进土壤微生物对土壤有机碳的利用和分解,进而影响土壤中活性有机碳的含量。还有研究发现土壤中碳磷比较大抑制土壤微生物分解有机碳的过程^[30]。本研究中土壤磷含量和土壤碳磷比是影响土壤有

机碳组分的重要因子。

本研究中 3 个退耕还林树种林下土壤微生物量碳含量在不同土壤深度间没有显著差异,这与 Sun 等^[31]发现的结果相似,这可能与土壤微生物量碳受到土壤 pH 和土壤含水量等土壤理化性质的影响有关。本研究中在 0—30 cm 深度土壤微生物量碳的含量表现为樟子松林显著高于落叶松林,这一方面与樟子松林下土壤磷含量较高,促进了土壤微生物的活性有关^[32];另一方面这还可能与落叶松林下枯落物生物量显著高于樟子松有关。落叶松叶片质量低,难以分解,大量枯落物在地表积累会导致土壤中氧气含量降低进而影响土壤微生物的活性和生物量^[33—34],进而导致落叶松林下微生物量碳低于樟子松林。此外,本研究中樟子松林下土壤 pH 显著高于落叶松林,酸性土壤中较低的 pH 会抑制微生物活性^[35],进而降低土壤微生物量碳^[36]。本研究中土壤微生物量碳含量与土壤 pH 显著正相关进一步支持了这个观点。同时,上述分析表明相较于土壤有机碳,溶解性有机碳和微生物量碳在树种间的差异表明活性有机碳组分对树种的响应更敏感。

土壤溶解性有机碳和土壤微生物量碳与土壤有机碳的比值(DOC/SOC 和 MBC/SOC)可以用来反映土壤有机碳的稳定程度^[7,37—38]。研究区 3 个退耕还林树种林下不同土层 DOC/SOC 比值变化范围为 2.31%—4.20%,高于刘江伟等^[39]对海涂围垦区 3 种林分的研究结果(0.72%—3.48%),这可能与黑土区土壤溶解性有机碳含量受到土壤磷含量、土壤微生物、降水淋溶等因素的影响有关^[27,30]。研究区 3 个退耕还林树种林下土壤 MBC/SOC 比值变化范围为 1.34%—4.37%,与肖焯等^[40]的研究结果(1.27%—5.94%)相似。本研究中 DOC/SOC 比值和 MBC/SOC 比值在不同树种间存在显著差异,其中樟子松林下土壤中 DOC/SOC 比值和 MBC/SOC 比值显著高于小黑杨林下土壤,这可能与樟子松林下较高的磷含量增加了土壤微生物的活性,加速了土壤微生物将土壤有机碳转化为溶解性有机碳的过程^[29],进而降低了土壤有机碳的稳定性有关^[41]。综上所述,小黑杨林下土壤有机碳的稳定程度相对较高,小黑杨林可能具有较高的固碳潜力。

4 结论

研究区 3 个退耕还林树种林下土壤有机碳和土壤溶解性有机碳含量均表现出随土层深度增加而降低的趋势;土壤有机碳含量在不同林分间没有显著差异,在 0—30 cm 土层小黑杨林分土壤溶解性有机碳含量显著低于落叶松和樟子松林分,樟子松林分土壤微生物量碳含量显著高于小黑杨和落叶松林分;本研究中土壤全磷含量是影响 3 个树种退耕还林地土壤有机碳、溶解性有机碳和微生物量碳分布的最重要的因素。

参考文献(References):

- [1] 宋瑞朋,杨起帆,郑智恒,习丹. 3 种林下植被类型对杉木人工林土壤有机碳及其组分特征的影响. 生态环境学报, 2022, 31(12): 2283-2291.
- [2] 刘爽,范峰华,张昆,郑荣波,郭雪莲. 围栏禁牧对滇西北高寒湿地土壤活性有机碳的影响. 生态学报, 2023, 43(4): 1506-1514.
- [3] Liu F T, Wang D, Zhang B B, Huang J. Concentration and biodegradability of dissolved organic carbon derived from soils: a global perspective. The Science of the Total Environment, 2021, 754: 142378.
- [4] 唐志伟,翁颖,朱夏童,蔡洪梅,代雯慈,王捧娜,郑宝强,李金才,陈翔. 秸秆还田下中国农田土壤微生物生物量碳变化及其影响因素的 Meta 分析. 生态环境学报, 2023, 32(9): 1552-1562.
- [5] 潘鹤,周桐,韩少杰,张扬,鲍鸿君,陈祥伟,夏祥友. 植被的人工恢复对典型黑土有机质组分影响的时效性. 东北林业大学学报, 2022, 50(5): 95-99.
- [6] 杨小燕,韩少杰,陈祥伟. 退耕还林类型对黑土表层土壤活性有机碳分布特征的影响. 东北林业大学学报, 2015, 43(12): 41-44, 77.
- [7] 朱丽琴,黄荣珍,段洪浪,贾龙,王赫,黄诗华,易志强,张文锋. 红壤侵蚀地不同人工恢复林对土壤总有机碳和活性有机碳的影响. 生态学报, 2017, 37(1): 249-257.
- [8] 孙家兴,赵雨森,辛颖,张军. 黑土区杨树农田防护林土壤团聚体的稳定性. 水土保持通报, 2018, 38(3): 66-73.
- [9] Feng J G, He K Y, Zhang Q F, Han M G, Zhu B. Changes in plant inputs alter soil carbon and microbial communities in forest ecosystems. Global Change Biology, 2022, 28(10): 3426-3440.
- [10] Fenner N, Freeman C. Drought-induced carbon loss in peatlands. Nature Geoscience, 2011, 4(12): 895-900.
- [11] Hall S J, Silver W L. Iron oxidation stimulates organic matter decomposition in humid tropical forest soils. Global Change Biology, 2013, 19(9): 2804-2813.
- [12] Li Y H, Shahbaz M, Zhu Z K, Deng Y W, Tong Y Y, Chen L, Wu J S, Ge T D. Oxygen availability determines key regulators in soil organic

- carbon mineralisation in paddy soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2021, 153: 108106.
- [13] Wang Y Y, Wang H, He J S, Feng X J. Iron-mediated soil carbon response to water-table decline in an alpine wetland. *Nature Communications*, 2017, 8: 15972.
- [14] Ramesh T, Bolan N S, Kirkham M B, Wijesekara H, Kanchikerimath M, Srinivasa Rao C, Sandeep S, Rinklebe J, Ok Y S, Choudhury B U, Wang H L, Tang C X, Wang X J, Song Z L, Freeman O W. Soil organic carbon dynamics: impact of land use changes and management practices: a review. *Advances in Agronomy*. Amsterdam: Elsevier, 2019: 1-107.
- [15] Mayer M, Prescott C E, Abaker W E A, Augusto L, Cécillon L, Ferreira G W D, James J, Jandl R, Katzensteiner K, Laclau J P, Laganière J, Nouvellon Y, Paré D, Stanturf J A, Vanguelova E I, Vesterdal L. Tamm Review: influence of forest management activities on soil organic carbon stocks: a knowledge synthesis. *Forest Ecology and Management*, 2020, 466: 118127.
- [16] Yan M F, Li T H, Li X R, Liu Y, Zhang J B. Microbial biomass and activity restrict soil function recovery of a post-mining land in eastern Loess Plateau. *CATENA*, 2021, 199: 105107.
- [17] 杨小燕, 范瑞英, 王恩姮, 夏祥友, 陈祥伟. 典型黑土区不同水土保持林表层土壤磷素形态及有效性. *应用生态学报*, 2014, 25(6): 1555-1560.
- [18] 吴金水. 土壤微生物生物量测定方法及其应用. 北京: 气象出版社, 2006.
- [19] 鲍士旦. 土壤农化分析. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [20] Saiya-Cork K R, Sinsabaugh R L, Zak D R. The effects of long term nitrogen deposition on extracellular enzyme activity in an *Acer saccharum* forest soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(9): 1309-1315.
- [21] Smith A P, Marin-Spiotta E, Balser T. Successional and seasonal variations in soil and litter microbial community structure and function during tropical postagricultural forest regeneration: a multiyear study. *Global Change Biology*, 2015, 21(9): 3532-3547.
- [22] 黄斌, 王泉泉, 李定强, 肖海兵, 聂小东, 袁再健, 郑明国, 廖义善, 梁晨. 南岭山地土壤有机碳及组分海拔梯度变化特征. *土壤通报*, 2022, 53(2): 374-383.
- [23] 张磊, 贾淑娟, 李啸灵, 陆宇明, 刘小飞, 郭剑芬. 凋落物和根系输入对亚热带米槠天然林土壤有机碳组分的影响. *水土保持学报*, 2021, 35(3): 244-251.
- [24] 孙宝伟, 杨晓东, 张志浩, 马文济, Ali Arshad, 黄海侠, 阎恩荣. 浙江天童常绿阔叶林演替过程中土壤碳库与植被碳归还的关系. *植物生态学报*, 2013, 37(9): 803-810.
- [25] 王磊, 刘晴虞, 关庆伟, 史经攀, 彭婷婷, 朱相丞, 杨槩, 刘静. 平原沙土区不同林分类型下土壤有机碳库特征及其影响因子. *林业科学研究*, 2023, 36(4): 72-81.
- [26] Luo Z K, Viscarra Rossel R A, Shi Z. Distinct controls over the temporal dynamics of soil carbon fractions after land use change. *Global Change Biology*, 2020, 26(8): 4614-4625.
- [27] Kupka D, Gruba P. Effect of pH on the sorption of dissolved organic carbon derived from six tree species in forest soils. *Ecological Indicators*, 2022, 140: 108975.
- [28] 李彬彬, 武兰芳, 许艳艳, 秦越. 秸秆还田土壤溶解性有机碳的官能团特征及其与 CO₂ 排放的关系. *农业环境科学学报*, 2017, 36(12): 2535-2543.
- [29] 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. *湿地科学*, 2021, 19(6): 691-701.
- [30] Qiu S J, Gao H J, Zhu P, Hou Y P, Zhao S C, Rong X M, Zhang Y P, He P, Christie P, Zhou W. Changes in soil carbon and nitrogen pools in a Mollisol after long-term fallow or application of chemical fertilizers, straw or manures. *Soil and Tillage Research*, 2016, 163: 255-265.
- [31] Sun B H, Hallett P D, Caul S, Daniell T J, Hopkins D W. Distribution of soil carbon and microbial biomass in arable soils under different tillage regimes. *Plant and Soil*, 2011, 338(1/2): 17-25.
- [32] Camenzind T, Hättenschwiler S, Treseder K K, Lehmann A, Rillig M C. Nutrient limitation of soil microbial processes in tropical forests. *Ecological Monographs*, 2018, 88(1): 4-21.
- [33] 雷宏军, 胡世国, 潘红卫, 臧明, 刘鑫, 李轲. 土壤通气性与加氧灌溉研究进展. *土壤学报*, 2017, 54(2): 297-308.
- [34] 张雅琪, 陈林, 庞丹波, 何文强, 李学斌, 吴梦瑶, 曹萌豪. 土壤微生物群落对枯落物输入的响应. *应用生态学报*, 2022, 33(11): 2943-2953.
- [35] Guo C M. Impact of pH on microbial biomass carbon and microbial biomass phosphorus in red soils. *Pedosphere*, 2004, 14(1): 9-15.
- [36] 王富国, 宋琳, 冯艳, 洪永聪, 崔德杰, 原永兵. 不同种植年限酸化果园土壤微生物学性状的研究. *土壤通报*, 2011, 42(1): 46-50.
- [37] 杨桦, 彭小瑜, 杨淑琪, 张云斌, 赵才, 黄勇. 滇南喀斯特断陷盆地土地利用方式对土壤有机碳及其活性组分的影响. *生态学报*, 2022, 42(17): 7105-7117.
- [38] 林丹丹, 毕华兴, 赵丹阳, 管凝, 韩金丹, 郭艳杰. 晋西黄土区不同密度刺槐林土壤有机碳组分及碳库特征. *生态环境学报*, 2024, 33(3): 379-388.
- [39] 刘江伟, 徐海东, 林同岳, 曹国华, 成向荣. 海涂围垦区不同林分土壤活性有机碳垂直变化特征. *林业科学研究*, 2022, 35(3): 18-26.
- [40] 肖烨, 黄志刚, 武海涛, 吕宪国. 三江平原不同湿地类型土壤活性有机碳组分及含量差异. *生态学报*, 2015, 35(23): 7625-7633.
- [41] 张兰英, 米俊珍, 刘景辉, 赵宝平, 崔雪梅, 胡可欣. 秸秆配施膨润土对旱作农田土壤有机碳及其活性组分的影响. *中国土壤与肥料*, 2023(7): 112-122.