

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.02.014

张金硕, 李素艳, 孙向阳, 等. 山东省不同植被类型土壤有机碳及其组分分布特征. 土壤, 2024, 56(2): 350–357.

山东省不同植被类型土壤有机碳及其组分分布特征^①

张金硕, 李素艳*, 孙向阳, 周文志, 赵冠宇, 白雪亭

(北京林业大学林学院森林培育与保护教育部重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为研究山东省不同植被类型森林土壤有机碳及其组分分布特征, 选取山东省黑松林、柏木林、针阔混交林 3 种植被类型下的森林土壤为研究对象, 比较分析了不同土层(0~20、20~40 cm)的土壤有机碳(SOC)、可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)和颗粒有机碳(POC)的含量变化。结果表明: ①0~40 cm 土层黑松林、柏木林和针阔混交林的 SOC 含量变化依次为 4.35~15.04、5.72~34.87 和 3.71~10.72 g/kg, 各土层中柏木林的 SOC 含量最高; ②土壤有机碳及其组分在不同植被类型下存在一定差异, SOC 和 POC 含量表现为柏木林>针阔混交林、黑松林, DOC 含量在上、下土层间表现为柏木林>针阔混交林>黑松林, EOC 含量表现为针阔混交林>柏木林、黑松林; ③除黑松林的 DOC 外, 其余各植被类型的 SOC、DOC、EOC、POC 含量均表现为随着土层深度的增加而减少; ④相关分析表明, SOC 与 POC 存在极显著正相关关系($P<0.01$), 其余各碳组分之间关系不显著; 冗余分析表明, 土壤碳组分受土壤理化因子影响较大, 全氮和速效钾与土壤碳组分极显著性相关($P<0.01$), 年降水量和 pH 与土壤碳组分显著相关($P<0.05$)。综上, 黑松林、柏木林、针阔混交林 SOC 及其活性组分之间存在差异性, 除 EOC 外其余各碳组分均表现为柏木林含量最高, 而 EOC 含量最高的为针阔混交林, 且 SOC 及其组分受到植被类型和土层深度的影响, 具有表聚现象。

关键词: 植被类型; 土壤有机碳; 活性有机碳; 碳组分; 冗余分析

中图分类号: S153.6 **文献标志码:** A

Characteristics of Soil Organic Carbon and Its Components Under Different Vegetation Types in Shandong Province

ZHANG Jinshuo, LI Suyan*, SUN Xiangyang, ZHOU Wenzhi, ZHAO Guanyu, BAI Xueting

(Key Laboratory for Forest Silviculture and Conservation of the Ministry of Education, College of Forestry, Beijing Forestry University, Beijing 100091, China)

Abstract: In order to study the distribution characteristics of organic carbon and its components in forest soils under different vegetation types in Shandong Province, forest soils were collected in different soil layers (0–20 and 20–40cm) under three vegetation types of *Pinus thunbergii*, *Cupressus funebris* and mixed conifer forest in Shandong Province, and the changes in soil organic carbon (SOC), soil dissolved carbon (DOC), easily oxidizable organic carbon (EOC) and particulate organic carbon (POC) were analyzed and compared. The results showed that: 1) SOC contents under *Pinus thunbergii*, *Cupressus funebris* and mixed coniferous forest in the 0–40 cm soil layer varied with 4.35–15.04, 5.72–34.87 and 3.71–10.72 g/kg, respectively, and *Cupressus funebris* had the highest SOC content in each soil layer; 2) SOC and its components differed somewhat under different vegetation types, with SOC and POC contents were in order of *Cupressus funebris* > mixed coniferous forests and *Pinus thunbergii*, DOC contents in order of *Cupressus funebris* > mixed coniferous forests > *Pinus thunbergii* in the upper and lower soil layers, and EOC contents in order of mixed coniferous forests > *Cupressus funebris* and *Pinus thunbergii*; 3) Except for DOC in *Pinus thunbergii*, SOC, EOC, EOC and POC contents of the remaining vegetation types decreased with the increase of soil depth; 4) The correlation analysis showed that SOC was significantly positively correlated with POC ($P<0.01$), and the other carbon fractions had no significant correlation, and the redundancy analysis showed that soil carbon fractions were greatly affected by soil physicochemical factors, with soil carbon fractions significantly correlated total nitrogen and rapid available potassium ($P<0.01$), and annual precipitation and pH($P<0.05$). In conclusion, there was variability among organic carbon and its active fractions under

①基金项目: 科技部科技基础资源调查专项 (2021FY100802)资助。

* 通讯作者(lisuyan@bjfu.edu.cn)

作者简介: 张金硕(1999—), 女, 吉林辽源人, 硕士研究生, 主要从事森林土壤学研究。E-mail: zjsnanli@163.com

soils of *Pinus thunbergii*, *Cupressus funebris*, and mixed conifer forest, all carbon fractions except EOC showed the highest content in *Cupressus funebris*, while EOC content is highest in the mixed conifer forest, SOC and its components are influenced by vegetation types and soil depth with epimerization phenomenon.

Key words: Vegetation types; Soil organic carbon; Activated organic carbon; Carbon components; Redundancy analysis

土壤作为陆地最大的碳库,在全球变化的大背景下日益受到关注。全球 1 m 深土层的土壤有机碳(SOC)储量大约是陆地植被碳储量的 3 倍、大气碳储量的 2 倍,森林土壤碳占全球土壤碳储量的 73%^[1-2]。SOC 是土壤中的重要组成部分,其含量和组分分布特征对全球气候和森林生态系统的功能和稳定性起着关键作用。SOC 通常根据其稳定性的不同划分为活性、慢性和惰性有机碳^[3]。活性有机碳是土壤中最不稳定的土壤碳素,易被氧化、分解和矿化^[4]。因其快速周转和较高的活性会对土壤化学物质的行为(溶解、吸附、解吸、吸收、迁移甚至生物毒性)产生重大影响,并且能较快地反映土壤有机质的变化^[5],虽其含量较少,但经常被用作衡量土壤碳库变化的指标,是土壤有机碳研究的重点。通常用可溶性有机碳(DOC)、易氧化有机碳(EOC)、颗粒有机碳(POC)、微生物生物量碳(MBC)和轻组有机碳(LFOC)来表征土壤活性有机碳。

我国幅员辽阔,森林资源丰富,森林生态系统具有高度的复杂性,不同地域、不同类型的森林生态系统碳特征差异明显。林鑫宇等^[6]对江苏宜兴地区不同林分类型下的土壤活性有机碳进行研究,发现混交林活性有机碳含量占 SOC 的比例低于纯林,土壤碳库稳定性更强。张文敏等^[7]对杭州湾湿地的研究表明,互花米草的 SOC、DOC 含量高于相同土层的其他植被类型。陈美玲等^[8]通过研究凤阳山典型林分 SOC 发现常绿阔叶林的细颗粒有机碳(fPOC)含量高于针阔混交林。董扬红等^[9]研究发现黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳随土层深度增加其有效性降低。山东是我国暖温带植被分布的典型区域之一,是一个森林资源相对短缺但又具有巨大发展潜力的省份。山东的原始森林植被,由于人类活动过于频繁,已经消失殆尽,目前的森林植被以各种人工林为主,黑松(*Pinus thunbergii*)和侧柏(*Cupressus funebris*)是山东省重要的造林树种。目前关于山东省不同植被类型森林 SOC 及其组分分布的研究鲜有报道。因此,本研究以山东省 3 种不同植被类型森林土壤为研究对象,探究了 SOC 及其活性组分的分布特征,以揭示不同植被类型下土壤活性有机碳组分的分布规律、影响机制和森林碳循环过程,并丰富区域性碳汇数据,为研

究区制定有效的森林管理措施和生态系统保护策略提供科学依据,同时为区域可持续发展和生态环境建设提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,地理位置 34°22.9' N ~ 38°24.01' N, 114°47.5' E ~ 122°42.3' E, 全省陆域面积 15.58 万 km²。气候类型为暖温带季风气候,降水集中,雨热同期,春秋较短,冬夏季长,年平均温度为 11 ~ 14℃。

1.2 土样采集

土壤样品采集于 2022 年 9 月底。通过前期项目组专家的测算和论证,结合实地探查,在山东省内选取不同区域的 3 种植被类型(黑松林、柏木林、针阔混交林)中林龄相近、密度相似的人工林设置典型代表样地(表 1),每个样地均处于山地或丘陵地带,母质为坡积物和残积物。每个样地选取相距 10 m 左右的 3 个 20 m × 20 m 的样方作为重复,在每个样方内按照“S”形选取 5 个点,去除土壤表层覆盖的未完全腐化的枯落物后,分别采集 0 ~ 20、20 ~ 40 cm 土层土样,将各样点同层次样品均匀混合,密封后带回实验室。土样一部分自然风干、去杂(剔除石砾、根系等杂物),分别研磨过孔径为 2、0.149 mm 筛后装入密封袋中保存备用,另一部分冷藏保存。

1.3 试验方法

土壤理化性质参考鲍士旦的《土壤农化分析》^[10]进行测定。其中,土壤 pH 采用 pH 计测定,土壤电导率采用电导仪测定,土壤全氮采用凯氏定氮法测定,土壤有效磷采用双酸浸提-钼锑抗分光光度法测定,土壤全磷采用碱熔-钼锑抗比色法测定,土壤全钾和速效钾采用火焰光度法测定,土壤有机碳(SOC)采用重铬酸钾-浓硫酸外加热法测定。

易氧化有机碳(EOC)采用 KMnO₄ 氧化法测定:称取过 2 mm 筛含有约 15 mg 碳的风干土样加入 25 mL 333 mmol/L 的 KMnO₄ 溶液,室温下振荡 30 min 后,在离心机中离心(5 000 r/min)5 min;上清液按照 1 : 250 比例用蒸馏水稀释,在分光光度计 565 nm 测定稀释样品的吸光值^[11]。

表 1 样地基本信息
Table 1 Basic information of sampled plots

植被类型	采样地点	土壤类型	土壤质地	海拔 (m)	优势树种	平均胸径 (cm)	平均树高 (m)	林下植被种类	年均温 (°C)	年降水量 (mm)
黑松林	下丁家镇	棕壤	砂壤土	193	黑松(<i>Pinus thunbergii</i>)	11.9	6.96	黄花蒿 (<i>Artemisia annua</i>)	12.77	791.85
	柏林镇	棕壤	砂土	568	黑松(<i>Pinus thunbergii</i>)	18.01	7.48	紫羊茅 (<i>Festuca rubra</i>)	11.60	1 298.14
	古迹顶	棕壤	砂土	132	黑松(<i>Pinus thunbergii</i>)	5.83	3.77	薹草(<i>Carex</i>)	12.70	943.60
柏木林	辉渠镇	棕壤	砂壤土	101	侧柏(<i>Cupressus funebris</i>)	12.61	8.63	黄蓍(<i>Cirsium japonicum</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、紫羊茅(<i>Festuca rubra</i>)、荆条(<i>Vitex negundo</i>)	13.75	938.96
	圣水峪镇	棕壤	砂壤土	200	侧柏(<i>Cupressus funebris</i>)	9.6	8.56	牡荆(<i>Vitex negundo</i> var. <i>cannabifolia</i>)、麻栎(<i>Quercus acutissima</i>)、狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、荆条(<i>Vitex negundo</i> var. <i>heterophylla</i>)	14.80	941.57
针阔混交林	大王庄镇	棕壤	壤土	642	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、柏树(<i>Cupressus funebris</i>)	13.35	12.51	狗尾草(<i>Setaria viridis</i>)、荆条(<i>Vitex negundo</i>)	12.15	925.16
	中庄镇	棕壤	壤土	362	刺槐(<i>Robinia pseudoacacia</i>)、柏树(<i>Cupressus funebris</i>)	23.62	14.2	荆条(<i>Vitex negundo</i>)	13.04	1 008.02

可溶性有机碳(DOC): 称取 10 g 过 2 mm 筛的风干土样, 按土水质量比 1 : 2 加入蒸馏水, 在 25°C 下恒温振荡 1 h 后, 用 0.45 μm 滤膜抽滤, 滤液利用重铬酸钾容量法-稀释热法测定^[12]。

颗粒有机碳(POC): 取过 2 mm 筛风干土样 10 g, 加入 50 mL 浓度为 5 g/L 的六偏磷酸钠溶液, 手摇 10 min 后以 90 r/min 的速度振荡 18 h。将振荡后的悬浊液过 0.053 mm 筛, 用蒸馏水重复冲洗至透明, 将留在筛子上的土样在 65 °C 烘箱内烘干, 测量碳含量^[13]。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理, 运用 ArcGIS 10.7 提取研究区年均温和年降水量数据, 数据来源于资源环境科学数据注册与出版系统^[14]。采用 SPSS 20.0 软件进行单因素方差分析和多重比较(LSD 法), 对不同植被类型下不同土层之间 SOC 组分进行差异

显著性检验, 采用 Pearson 和 Spearman 法进行相关性分析, 运用 Canoco5 软件进行冗余分析。采用 Origin 2021 软件作图。

2 结果与分析

2.1 不同植被类型下土壤基本理化性质

山东省不同植被类型下的土壤基本理化性质如表 2 所示。由表 2 可知, 研究区土壤呈酸性, 黑松林和针阔混交林的土壤 pH 随土层深度的增加而增加, 而柏木林的土壤 pH 随土层增加而减小, 各植被类型和各土层的土壤 pH 并无显著差异。不同植被类型下, 土壤电导率及全氮、全磷、全钾、速效钾、有效磷含量均随土层深度的加深而呈降低趋势。其中不同植被和不同土层间全磷含量变化较小, 差异不显著。电导率和有效磷在不同土层间无显著差异性, 但在不同植

表 2 不同植被类型下土壤理化性质
Table 2 Soil physicochemical properties under different vegetation types

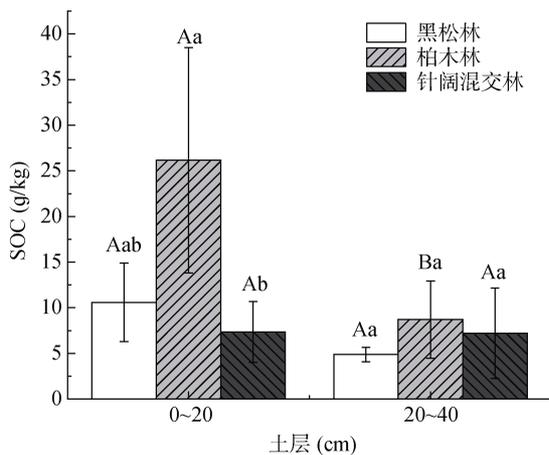
植被类型	土层(cm)	pH	电导率(mS/cm)	全氮(g/kg)	全磷(g/kg)	全钾(g/kg)	速效钾(mg/kg)	有效磷(mg/kg)
黑松林	0~20	5.65 ± 0.26 Aa	5.37 ± 1.75 Ab	0.51 ± 0.11 Ab	0.35 ± 0.21 Aa	21.85 ± 2.65 Aa	38.80 ± 9.37 Ab	45.97 ± 19.09 Aa
	20~40	5.67 ± 0.64 Aa	5.24 ± 0.14 Ab	0.45 ± 0.11 Aa	0.15 ± 0.09 Aa	18.24 ± 5.47 Ba	33.36 ± 12.88 Aa	36.93 ± 15.83 Aa
柏木林	0~20	5.92 ± 0.86 Aa	9.36 ± 1.45 Ba	2.18 ± 1.35 Aa	0.34 ± 0.23 Aa	17.50 ± 1.09 Aab	68.74 ± 16.51 Aab	31.85 ± 9.73 Aa
	20~40	5.72 ± 0.42 Aa	8.76 ± 2.15 Aa	0.72 ± 0.52 Ba	0.29 ± 0.20 Aa	15.90 ± 1.03 Aab	38.97 ± 10.65 Aa	10.77 ± 2.88 Aab
针阔混交林	0~20	5.40 ± 0.13 Aa	6.22 ± 0.13 Aab	1.63 ± 0.62 Aab	0.36 ± 0.02 Aa	13.89 ± 2.68 Ab	119.08 ± 33.51 Aa	37.86 ± 6.24 Aa
	20~40	5.94 ± 0.01 Aa	6.06 ± 0.31 Aab	1.14 ± 0.20 Aa	0.22 ± 0.02 Aa	11.03 ± 0.14 Ab	79.08 ± 30.24 Ba	8.38 ± 4.06 Ab

注: 同列不同大写字母表示相同植被类型不同土层深度间差异显著($P < 0.05$), 不同小写字母表示相同土层深度不同植被类型间差异显著($P < 0.05$)。

被类型间差异显著($P<0.05$)。柏木林 0 ~ 20 cm 土层的全氮含量是 20 ~ 40 cm 土层的 3 倍, 是黑松林 0 ~ 20 cm 土层的 4 倍。全钾在不同植被类型下的含量相对稳定, 针阔混交林 0 ~ 20 cm 的土壤速效钾含量与其他两种植被类型同土层存在差异, 且显著高于黑松林和柏木林。

2.2 不同植被类型下土壤有机碳分布特征

不同土层黑松林、柏木林、针阔混交林的 SOC 含量如图 1 所示。黑松林 SOC 含量在 0 ~ 20 和 20 ~ 40 cm 土层依次为 10.58 和 4.87 g/kg, 针阔混交林的含量在 7.22 ~ 7.34 g/kg。在 0 ~ 20 cm 土层中, 不同植被类型间 SOC 含量差异显著($P<0.05$), 表现为柏木林 > 黑松林 > 针阔混交林。在 20 ~ 40 cm 土层中, 不同植被类型间 SOC 含量差异不显著。柏木林的上、下土层 SOC 含量差异显著($P<0.05$), 分别为 26.15 和 4.87 g/kg。黑松林和针阔混交林上、下土层 SOC 含量均无显著差异, 各植被类型 0 ~ 20 cm 土层 SOC 含量均高于 20 ~ 40 cm 土层。



(图中不同大写字母表示相同植被类型不同土层深度间差异显著 ($P<0.05$), 不同小写字母表示相同土层深度不同植被类型间差异显著 ($P<0.05$), 下同)

图 1 不同植被类型下 SOC 含量

Fig. 1 SOC contents under different vegetation types

2.3 不同植被类型下土壤活性有机碳分布特征

2.3.1 DOC 从图 2 可知, DOC 含量在不同植被类型间差异显著($P<0.05$), 在不同土层间差异不显著。柏木林上下土层的 DOC 含量分别为 318.37 和 308.39 mg/kg, 高于其他两种植被类型。针阔混交林与柏木林 DOC 含量差异较小, 在 307.98 ~ 314.21 mg/kg。黑松林 DOC 含量最低, 变化范围为 119.7 ~ 165.66 mg/kg。柏木林和针阔混交林的 DOC 含量均随土层的加深而减小, 而黑松林的 DOC 含量随土层的加深而增加。

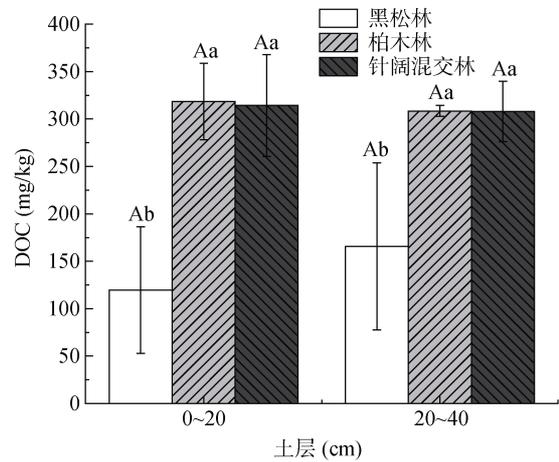


图 2 不同植被类型下土壤 DOC 含量

Fig. 2 DOC contents under different vegetation types

2.3.2 EOC 如图 3 所示, 针阔混交林 EOC 含量在上、下层土壤中均为最高, 分别为 710.3 和 665.28 mg/kg, 并与其他植被类型存在显著差异($P<0.05$)。3 种植被类型 0 ~ 20 cm 土层土壤 EOC 含量均高于 20 ~ 40 cm 土层, 但两土层间并无显著差异。黑松林和柏木林的 EOC 平均含量变化范围分别为 379.07 ~ 421.14、353.99 ~ 548.87 mg/kg。

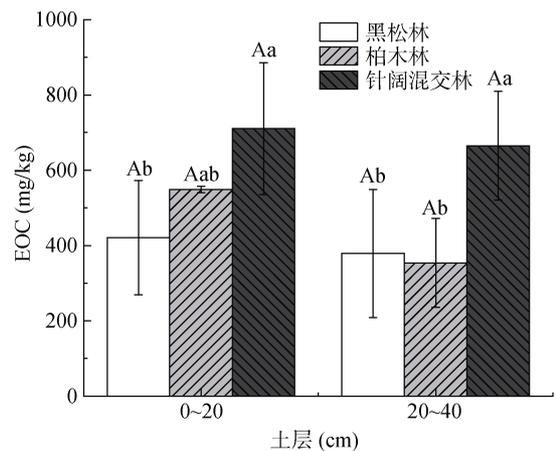


图 3 不同植被类型下土壤 EOC 含量

Fig. 3 EOC contents under different vegetation types

2.3.3 POC 图 4 展示了不同土层、不同植被类型的 POC 含量。黑松林、柏木林和针阔混交林的 POC 含量均呈现随着土层的增加而减小的趋势, 其中柏木林上、下土层 POC 含量分别为 14.37 和 4.31 g/kg, 含量相差较大, 差异显著($P<0.05$)。黑松林与针阔混交林 POC 含量在不同土层间差异不显著, 变化范围依次为 1.68 ~ 3.94、2.48 ~ 4.08 g/kg。对不同植被类型, 上、下土层的 POC 含量均表现为柏木林最高, 在 0 ~ 20 cm 土层中柏木林显著高于其他植被类型, 与黑松林、针阔混交林差异显著($P<0.05$), 黑松林和

针阔混交林差异不显著, 20~40 cm 土层 3 种植被类型间差异均不显著。

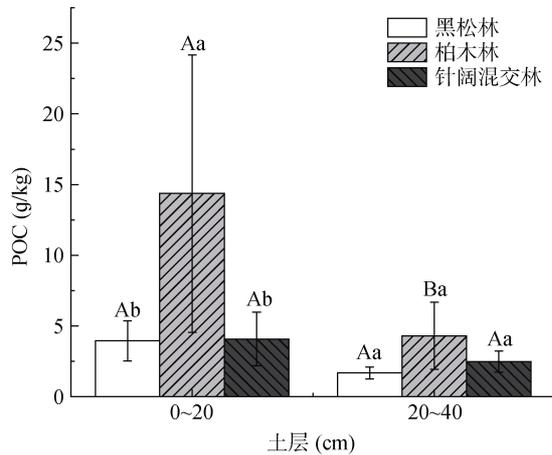


图 4 不同植被类型下土壤 POC 含量
Fig. 4 POC contents under different vegetation types

2.4 土壤有机碳及其组分与各因子的相关性

2.4.1 相关性分析 对 SOC 及其活性碳组分、土

壤其他理化因子进行正态性检验, 对符合正态分布的变量进行 Pearson 相关性分析, 不符合正态分布的变量进行 Spearman 相关性分析, 结果见表 3。从表 3 可知, SOC 和 POC 呈极显著正相关, 说明 POC 含量很大程度上取决于 SOC 含量, 但其他各碳组分之间相关性较弱, 这需要更大量数据进一步进行论证。

SOC 与电导率呈显著正相关。DOC 与土壤全氮、速效钾呈极显著正相关, 与全钾呈显著负相关。POC 与土壤全氮呈显著正相关, EOC 和土壤速效钾呈显著正相关。

2.4.2 冗余分析 对土壤有机碳组分和土壤其他理化因子、气候因子进行冗余分析, 获得各因子对土壤有机碳组分的解释, 结果见表 4。从表 4 可知, 第 I 轴对土壤碳组分的解释量为 54.11%, 第 II 轴的解释量为 30.18%, 第 III 轴、第 IV 轴的解释量分别为 9.86% 和 0.31%, 其中第 I 轴和第 II 轴的累计解释量为 84.29%, 前两轴可较好地反映土壤碳组分与各指标的关系, 且是由第 I 轴决定的。

表 3 土壤有机碳及其活性组分与土壤其他理化性质的相关性

Table 3 Correlations of soil organic carbon and its active components with soil other physicochemical properties

	SOC	DOC	POC	EOC	pH	全氮	全磷	全钾	速效钾	有效磷	电导率
SOC	1										
DOC	0.103	1									
POC	0.859**	0.24	1								
EOC	0.050	0.482	0.068	1							
pH	0.148	-0.033	0.174	0.092	1						
全氮	0.393	0.732**	0.609*	0.436	-0.018	1					
全磷	0.147	0.226	0.09	-0.129	-0.652*	0.165	1				
全钾	0.297	-0.552*	0.187	-0.385	-0.348	-0.31	0.165	1			
速效钾	0.169	0.714**	0.42	0.837**	0.002	0.837**	0.174	-0.38	1		
有效磷	0.09	-0.442	0.169	-0.033	-0.577*	0.02	0.301	0.697**	0.002	1	
电导率	0.622*	0.486	0.468	0.079	0.315	0.473	-0.037	-0.292	0.248	-0.455	1

注: ** 表示在 $P < 0.01$ 水平上显著相关; * 表示在 $P < 0.05$ 水平上显著相关。

表 4 土壤有机碳组分的冗余分析
Table 4 RDA of soil organic carbon fractions

解释度	I	II	III	IV
特征值	0.541 1	0.301 8	0.098 6	0.003 1
解释差异	54.11	84.28	94.14	94.45
相关系数	0.996 6	0.957 1	0.905 3	0.753 6
解释拟合变化	57.28	89.23	99.67	100

有机碳组分与各因子的二维排序图如图 5 所示。土壤碳组分用虚线表示, 其他理化因子和气候因子用加粗实线表示。全氮和速效钾这两条线的箭头连线最长, 说明这两个因子对土壤碳组分的差异性解释最

好。若两个箭头连线之间的夹角为锐角, 说明两个指标之间为正相关; 若为钝角, 则为负相关。从图 5 可知, 土壤全氮、速效钾、电导率、年均温与 SOC 及各活性碳组分均呈正相关, 土壤 pH 与 SOC、POC、DOC 为正相关, 与 EOC 为负相关。全钾与 SOC 和 POC 呈正相关, 与 DOC 和 EOC 呈负相关。有效磷、年降水量与 SOC 及各活性碳组分均呈负相关, 全磷与 EOC 为正相关, 与其他碳组分均为负相关。

表 5 展示了土壤理化因子和气候因子对土壤碳组分的解释度和贡献度。从表 5 可知, 全氮对土壤碳组分的影响最高, 贡献度达 50.2%, 其次是速效钾和

年降水量，贡献度最低的是有效磷和电导率，均仅为 0.7%。各因子对土壤碳组分影响的重要性由大到小依次是全氮、速效钾、年降水量、pH、年均温、全钾、全磷、有效磷、电导率。全氮和速效钾与土壤碳组分极显著相关($P < 0.01$)，年降水量和 pH 与土壤碳组分显著相关($P < 0.05$)，其余各理化因子及气候因子与土壤碳组分均不相关。

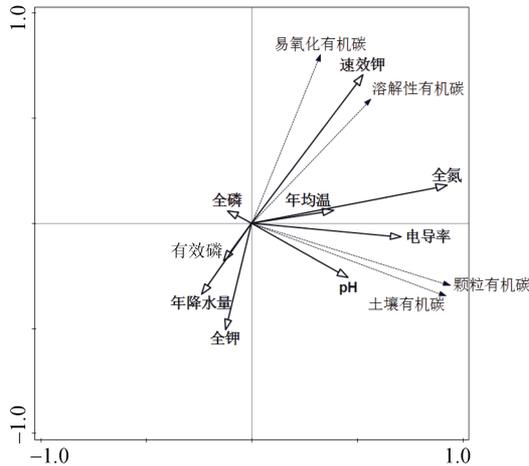


图 5 土壤有机碳组分与影响因子的冗余分析二维排序图
Fig. 5 Two-dimensional ordination plot for RDA of soil organic carbon fractions with influencing factors

表 5 影响因子与土壤碳组分的相关性

Table 5 Correlations between influencing factors and soil carbon components

影响因子	解释度(%)	贡献度(%)	pseudo-F	P
全氮	47.4	50.2	10.8	0.002
速效钾	20.7	21.9	7.1	0.004
年均温	6.2	6.6	2.4	0.098
年降水量	6.7	7.1	3.2	0.034
全钾	4.2	4.4	2.3	0.112
pH	6.4	6.7	5.3	0.01
全磷	1.6	1.7	1.4	0.26
有效磷	0.7	0.7	0.5	0.642
电导率	0.7	0.7	0.5	0.706

3 讨论

3.1 不同植被类型土壤有机碳及其组分的分布特征

SOC 主要来源于动植物残体、地上植被的凋落物和根系分泌物^[15-16]，受土地利用类型、植被类型、气候、海拔和人为活动等各种因素的影响^[17]。植被类型不同，其凋落物的种类、产量和质量也会存在差异^[18]，还会对土壤微生物活动的微环境产生间接影响^[19]，通过影响土壤碳输入和周转速率从而对有机碳组分的分布产生影响。本研究表明，山东省黑松林、

柏木林、针阔混交林 3 种典型植被类型的 SOC 及其活性组分含量存在一定差异，在 0~40 cm 各土层中，柏木林的 SOC 含量均高于黑松林和柏木林，表明柏木林的固碳能力高于黑松林和针阔混交林。这是因为 SOC 受植被归还量和分解速率影响，植被归还量大、分解速率缓慢，会造成 SOC 的积累，而柏木林林下植被种类较为丰富，凋落物和根系分泌物较多，因此积累的 SOC 较多。同时不同林分类型的树木生长特性不同，相比于柏木，黑松生长速度较快，会消耗更多的养分用于树木生长，导致 SOC 的分解速率高于输入速率，从而导致 SOC 含量较低。此外，黑松林枯枝落叶层较薄，对地表径流的抵挡作用较弱，土壤侵蚀较为严重，也导致表层 SOC 含量降低。此外，不同植被的根系分布、根系碳氮含量、土壤微生物生活环境、水分及营养、人为干扰等一系列因素均会对 SOC 含量产生影响。

本研究中，DOC 和 POC 含量表现为柏木林>针阔混交林和黑松林，EOC 含量表现为针阔混交林含量最高。Anderson 等^[20]研究表明，活性有机碳含量很大程度上取决于 SOC 总量。柏木林的 SOC 含量最高，为土壤提供了更多的碳源，因此柏木林 DOC 和 POC 含量最高。张萌等^[21]研究表明，POC 含量与 SOC 含量呈显著正相关，这与本研究结论相似。但同时这些活性组分的变化受到自身特性和外部的影响，其各组分变化与 SOC 会存在一定差别。针阔混交林 SOC 含量较低，却具有较高的 DOC 和 EOC 含量，可能是由于植物残体的数量更多、质量更高，导致土壤微生物群落的组成和活性发生了变化，从而对植物残体的分解进程产生了影响^[22]。EOC 含量受土壤侵蚀强度大小的严重影响，而针阔混交林的枝叶和林冠茂盛，郁闭度较高，对雨水有更加好的抵挡作用，地表径流更少，使得土壤侵蚀较低，导致其 EOC 含量较高。

3.2 不同土层土壤有机碳及其组分的分布特征

本研究发现，山东省 3 种典型植被类型下，SOC 含量表现为 0~20 cm 土层高于 20~40 cm 土层，这与王洋等^[23]、朱浩宇等^[24]的研究结果一致。土壤表层具有较好的湿度和通气条件，有利于微生物的生长和繁殖。因此，土壤表层的微生物种类和数量都比较丰富，微生物的活动在土壤表层最为活跃。植被的枯枝落叶等有机物在地表积累，在微生物的分解作用下形成腐殖质，并在土壤表层聚集。因此，SOC 含量在土壤表层最高，随着土层的加深而减少。

3 种植被类型的 EOC 和 POC 含量均表现为随着土层的加深而降低的趋势，且柏木林的 SOC 和 POC

在上、下土层间存在显著差异($P < 0.05$), 具有表聚现象, 这与程欢等^[25]、陈美玲等^[8]的研究结果相似。柏木林、针阔混交林的 DOC 含量也与 SOC 含量变化趋势一致, 表现为随土层增加而降低的趋势。杨满元和杨宁^[26]认为土壤活性有机碳很大程度上取决于 SOC, 随着土壤深度的增加, 活性有机碳含量不断减少, 这与 SOC 在不同土层上的分布规律相吻合。刘秉儒等^[27]的研究结果表明, 土壤活性有机碳主要取决于地表的枯枝落叶、地上生物量、植被覆盖度。POC 是新鲜植物和动物残体与腐烂有机质之间的过渡性有机碳, 受树木残体和凋落物的矿化和分解影响^[28]。同时凋落物和根系分泌物经过微生物的循环作用, 也是 EOC 的重要来源。DOC 的主要来源是新近凋落物和土壤腐殖质, 而土壤表层积累较多的凋落物, 因此表层 POC、EOC 和 DOC 的含量更高。而黑松林的 DOC 含量表现为表土层 < 底土层, 这与王棣等^[29]的研究结论不同。这是由于本研究在采样时黑松林的土壤表层枯枝落叶较少, 腐殖质层厚度较薄, 且 DOC 在土壤中移动速度较快, 受到淋溶作用的影响, 进入到土壤深层所致。

3.3 土壤有机碳及其活性组分与各因子的相互关系

本研究表明, SOC 与 POC 呈极显著正相关关系($P < 0.01$), 与 EOC 和 DOC 相关性不显著。邱牡丹等^[30]对湘东丘陵区 4 种林地 SOC 进行研究, 也发现 POC 含量主要取决于 SOC 的含量。而张金波等^[31]研究表明, DOC 与 SOC 呈正相关关系($P < 0.05$); 董扬红等^[9]研究表明, SOC 与 EOC 呈极显著正相关性($P < 0.01$), 与 DOC 相关性不显著。EOC 对环境变化的响应十分敏感, 而研究区受到一定程度的人为干扰, 因此导致植被下 EOC 被利用及分解较为剧烈。另外, 有机质与矿物质结合的物理保护是有机质积累的重要机制。沙国良等^[32]研究表明, SOC 含量与土壤黏粒含量呈正相关, 黏粒含量较高时会降低土壤孔隙间的氧气分压和水分扩散速率, 直接抑制微生物活性从而减少其对 SOC 的降解, 降低 SOC 的矿化潜力^[33]。而本研究中, 样地的土壤质地多为砂土和砂壤土, 对微生物的物理或化学保护作用较弱, 导致 SOC 的矿化潜力较高, 不利于 SOC 的积累。朱玉帆等^[34]研究表明, 土壤有机碳矿化速率和 DOC 含量呈显著正相关($P < 0.05$), 因此可能是土壤质地的原因导致本研究中部分活性有机碳与 SOC 相关性不显著。后续可开展土壤黏粒含量的测定, 以进一步探讨土壤质地与 SOC 组分之间的关系。

对土壤有机碳及其活性组分与各因子的相关性

分析及冗余分析表明, 全氮、速效钾、年降水量和 pH 是影响土壤有机碳组分的重要因子, 其中, 全氮和速效钾与土壤活性碳组分均呈正相关; 土壤 pH 与 SOC、POC、DOC 为正相关, 与 EOC 为负相关; 年降水量与 SOC 及其各组分均呈负相关。苗蕾等^[35]研究表明, 森林 SOC 含量与氮含量存在高度依存关系; 王强等^[36]研究也表明, DOC 与全氮表现出极显著正相关性, 本研究结果与之一致。土壤氮素大部分来源于有机质, 氮素会被有机质吸附、固定, 从而抑制有机质分解, 增加 SOC 固存率。氮素是细胞重要的组成部分, 对土壤微生物的活性有重要影响, 它的增加促进微生物的活性, 有利于土壤腐殖质的积累, 进一步提高 SOC 含量。土壤 pH 可以影响微生物的生长、数量和活性, 在酸性土壤中, 微生物的种类受到限制, 以真菌为主, 从而降低活性有机碳组分的周转速率^[37]。土壤速效钾主要通过影响土壤中微生物的数量和活性, 对微生物的活动产生促进作用, 进而增加土壤活性有机碳组分的含量。降水量的增多会导致土壤水分的增加, 但同时也会造成地表径流的增加以及土壤侵蚀, 从而导致 SOC 及其各组分含量下降。同时, 土壤碳组分具有明显的季节变化, 一般表现为夏季或秋季含量最高, 而春季含量最低^[38-39]。植物凋落物和细根的枯死受季节变化影响显著, 同时不同季节的温、湿度变异将会影响微生物的活性和数量^[40-41], 从而影响有机碳的分解。土壤活性有机碳组分受多种因素的共同影响、相互制约, 有待从多角度、多因素、长时期出发, 考虑其影响因素的复杂性与多样性, 对土壤活性碳组分开展更全面深入的研究。

4 结论

山东省不同植被类型、不同土层下 SOC 及其组分含量各异, 除 EOC 外, 其余各组分均表现为柏木林含量最高。SOC、DOC、POC 含量在植被类型间差异显著, 柏木林的 SOC 和 POC 含量在不同土层间差异显著, POC 含量对植被类型和土层深度的反应更为敏感, 可有效反映 SOC 的动态变化规律。除黑松林的 DOC 外, 其余各植被类型的 SOC 及各活性组分含量均表现为随着土层深度的增加而减少, 具有表聚现象。SOC 与 POC 存在极显著正相关关系, 其余各碳组分之间关系不显著。土壤碳组分与土壤理化因子相关性较强, 主要受全氮、速效钾和 pH 影响, 同时也受到年降水量影响。相较于黑松林和针阔混交林, 柏木林能显著提高活性有机碳的含量, 在未来山东省的森林经营中, 可选择柏木作为造林植被来提高

森林碳汇能力。

参考文献：

- [1] 王兴, 钟泽坤, 王佳懿, 等. 黄土高原撂荒草地土壤碳库对两年增温增雨的响应[J]. 土壤学报, 2023, 60(2): 523–534.
- [2] 武振丹, 马尚飞, 卢俊艳, 等. 贝加尔针茅草甸草原土壤有机碳组分对长期氮素添加的响应[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1520–1530.
- [3] Fu B J, Liu S L, Chen L D, et al. Soil quality regime in relation to land cover and slope position across a highly modified slope landscape[J]. Ecological Research, 2004, 19(1): 111–118.
- [4] Christensen B T. Physical fractionation of soil and structural and functional complexity in organic matter turnover[J]. European Journal of Soil Science, 2001, 52(3): 345–353.
- [5] ZHAO S X, TA N, LI Z H, et al. Varying pyrolysis temperature impacts application effects of biochar on soil labile organic carbon and humic fractions[J]. Applied Soil Ecology, 2018, 123: 484–493.
- [6] 林鑫宇, 惠昊, 王亚茹, 等. 不同林分类型下土壤活性有机碳含量和分布特征[J]. 安徽农业大学学报, 2021, 48(3): 437–443.
- [7] 张文敏, 吴明, 王蒙, 等. 杭州湾湿地不同植被类型下土壤有机碳及其组分分布特征[J]. 土壤学报, 2014, 51(6): 1351–1360.
- [8] 陈美玲, 赵友朋, 张金池, 等. 凤阳山典型林分土壤有机碳特征[J]. 东北林业大学学报, 2022, 50(10): 69–75.
- [9] 董扬红, 曾全超, 李娅芸, 等. 黄土高原不同植被类型土壤活性有机碳组分分布特征[J]. 草地学报, 2015, 23(2): 277–284.
- [10] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [11] Blair G J, Lefroy R, Lisle L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems[J]. Australian Journal of Agricultural Research, 1995, 46(7): 1459.
- [12] 严昌荣, 刘恩科, 何文清, 等. 耕作措施对土壤有机碳和活性有机碳的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2010(6): 58–63.
- [13] Cambardella C A, Elliott E T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(3): 777–783.
- [14] 徐新良. 中国气象要素年度空间插值数据集. 资源环境科学数据注册与出版系统 (<http://www.resdc.cn/DOI>), 2022. DOI:10.12078/2022082501)
- [15] 倪惠菁, 苏文会, 范少辉, 等. 养分输入方式对森林生态系统土壤养分循环的影响研究进展[J]. 生态学杂志, 2019, 38(3): 863–872.
- [16] 刘学东, 陈林, 杨新国, 等. 荒漠草原典型植物群落土壤活性有机碳组分特征及其与酶活性的关系[J]. 西北植物学报, 2016, 36(9): 1882–1890.
- [17] 杜雪, 王海燕. 中国森林土壤有机碳活性组分及其影响因素[J]. 世界林业研究, 2022, 35(1): 76–81.
- [18] 杨万勤, 邓仁菊, 张健. 森林凋落物分解及其对全球气候变化的响应[J]. 应用生态学报, 2007, 18(12): 2889–2895.
- [19] Wynn J G, Bird M I, Vellen L, et al. Continental-scale measurement of the soil organic carbon pool with climatic, edaphic, and biotic controls[J]. Global Biogeochemical Cycles, 2006, 20(1): GB1007.
- [20] Anderson T H, Domsch K H. Ratios of microbial biomass carbon to total organic carbon in arable soils[J]. Soil Biology and Biochemistry, 1989, 21(4): 471–479.
- [21] 张萌, 卢杰, 于德水, 等. 色季拉山林线典型植被下土壤有机碳及其组分特征[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(12): 77–86.
- [22] SCHMIDT M W I, TORN M S, ABIVEN S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. Nature, 2011, 478(7367): 49–56.
- [23] 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.
- [24] 朱浩宇, 王子芳, 陆畅, 等. 缙云山 5 种植被下土壤活性有机碳及碳库变化特征[J]. 土壤, 2021, 53(2): 354–360.
- [25] 程欢, 宫渊波, 付雨欣, 等. 四川盆地西南缘不同林分类型土壤团聚体稳定性及有机碳组分特征[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 109–115.
- [26] 杨满元, 杨宁. 紫色土丘陵坡地不同植被类型土壤活性有机碳组分的比较[J]. 草地学报, 2018, 26(2): 380–385.
- [27] 刘秉儒, 杨阳, 陈林. 宁夏荒漠草原 4 种典型植物群落土壤活性有机碳垂直分布特征[J]. 草地学报, 2014, 22(5): 986–990.
- [28] 李银科, 李小刚, 张平良, 等. 土地利用方式对荒漠土壤有机碳和养分含量的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2007, 42(2): 103–107.
- [29] 王棣, 耿增超, 余雕, 等. 秦岭典型林分土壤活性有机碳及碳储量垂直分布特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1569–1577.
- [30] 邱牡丹, 盛浩, 颜雄, 等. 湘东丘陵 4 种林地深层土壤颗粒有机碳及其组分的分配特征[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(4): 493–499.
- [31] 张金波, 宋长春, 杨文燕. 土地利用方式对土壤水溶性有机碳的影响[J]. 中国环境科学, 2005, 25(3): 343–347.
- [32] 沙国良, 陈宇轩, 魏天兴, 等. 黄土高原丘陵区典型退耕恢复植被土壤碳分布特征及其影响因素[J]. 土壤, 2022, 54(6): 1265–1272.
- [33] 石碧婉, 高文静, 杨志颖, 等. 土壤质地和有机碳分子组成对土壤有机碳的矿化和微生物碳积累效率的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(2): 365–377.
- [34] 朱玉帆, 刘伟超, 李佳欣, 等. 黄土丘陵区人工刺槐林土壤有机碳矿化特征及其与有机碳组分的关系[J]. 环境科学, 2023, 44(1): 444–451.
- [35] 苗蕾, 孙玉军, 杨喜田, 等. 太行山南麓 3 种典型人工林土壤碳氮分布特征[J]. 河南农业科学, 2015, 44(1): 52–56.
- [36] 王强, 韩欢, 耿增超, 等. 秦岭辛家山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(2): 35–42.
- [37] 周晨霓, 马和平. 西藏色季拉山典型植被类型土壤活性有机碳分布特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(6): 1246–1251.
- [38] 孔范龙, 郗敏, 吕宪国, 等. 三江平原环型湿地土壤溶解性有机碳的时空变化特征[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 847–852.
- [39] 王国兵, 赵小龙, 王明慧, 等. 苏北沿海土地利用变化对土壤易氧化碳含量的影响[J]. 应用生态学报, 2013, 24(4): 921–926.
- [40] 刘满强, 胡锋, 何园球, 等. 退化红壤不同植被恢复下土壤微生物量季节动态及其指示意义[J]. 土壤学报, 2003, 40(6): 937–944.
- [41] 陈国潮, 何振立, 姚槐应. 红壤微生物量的季节性变化研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 1999, 25(4): 47–48.