

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2024.227

引用格式: 庞国涛, 刘晓煌, 巴音吉, 等. 太行山南麓不同土地利用类型土壤有机碳分布特征[J]. 中国地质调查, 2025, 12(4): 57–67. (Pang G T, Liu X H, Ba Y J, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon in different land use types at the southern foot of Taihang Mountains[J]. Geological Survey of China, 2025, 12(4): 57–67.)

太行山南麓不同土地利用类型土壤有机碳分布特征

庞国涛^{1,2,3}, 刘晓煌^{2,4}, 巴音吉^{1,2,3*}, 樊志富^{1,3}, 李兆贺^{1,3}, 王贵恒^{1,3}

(1. 中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心, 山东 烟台 264000; 2. 自然资源部自然资源要素耦合过程与效应重点实验室, 北京 100055; 3. 自然资源部黄河入海口陆海交互作用野外科学观测研究站, 山东 烟台 264000; 4. 中国地质调查局自然资源综合调查指挥中心, 北京 100055)

摘要: 太行山南麓济源段是黄河流域地形地貌、植被类型较为特殊的地区, 估算和对比该区域不同土地利用类型的土壤物理性质、土壤有机碳密度, 对于合理利用土地、土壤碳库管理等均有指导意义。以侧柏林、刺槐林、栓皮栎林、经济林、耕地、荒地的(0, 40] cm 表层土壤为研究对象, 通过野外调查取样和室内实验分析, 对比分析不同土地利用类型的土壤容重、土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)含量和土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)垂向分布特征, 并进一步分析土壤物理性质与有机碳的相关性。6种土地利用类型(0, 40] cm 表层 SOC 均值变化范围为 $9.46 \times 10^{-3} \sim 15.13 \times 10^{-3}$, 平均含量最低的为耕地, 最高为侧柏林; SOCD 均值为 $1.33 \sim 2.27 \text{ kg/m}^2$, 平均值最低的为经济林, 最高为荒地。不同土地利用类型和不同深度的 SOC 含量、SOCD 均表现为变异特征。除耕地和经济林外, SOC 含量和 SOCD 均随着深度增加而减小, (0, 10] cm 土层 SOCD 明显高于剖面其他层位。SOC 含量与 SOCD 呈显著正相关, 与土壤含水量呈负相关。土地利用类型的不同影响土壤碳源的输入, 进而影响土壤物理性质、SOC 含量和 SOCD。研究成果可为该区土壤碳汇评估提供参考依据。

关键词: 土地利用方式; 土壤有机碳密度; 垂直分布; 土壤容重; 太行山南麓

中图分类号: P962; X142

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)04-0057-11

0 引言

土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)是评价土壤质量、土地利用水平的重要指标^[1], 其含量直接影响土壤营养物质的分解以及碳循环^[2-3]。土壤碳库约为大气碳库的2倍, 陆地植被碳库的3倍, 而土壤每年排放到大气中的 CO_2 通量约为化石燃料燃烧释放的10倍, 对全球气候变化影响显著^[4]。有关研究表明每年全球单位面积土壤固碳量为 $0.24 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 当固碳量为 $0.4 \sim 0.6 \text{ t}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ 时才可抵消温室气体的排放量^[5]。

土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)指单位面积内的 SOC 储量, 可以用以评价不同土地利用方式下的土壤质量^[6-7]。长期以来, 前人对 SOC 含量及其影响因素做了大量研究, Jobbágy 等^[8]通过对全球数据库中2 700 多个土壤剖面进行研究, 并结合气候、植被和土地利用数据研究表明植物功能类型通过分配的差异有助于控制土壤中 SOC 随深度的分布; 张立等^[9]分析了1986—2019年黑龙江省松嫩平原表层 SOCD 的时空变化特征, 并估算了土壤有机碳储量, 圈定了 SOCD 减少区域及土壤类型并提出相应建议; 张艳等^[10]通过喀斯特石漠化地区不同土地利用类型土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征进行研究探

收稿日期: 2024-05-31; 修订日期: 2025-01-06。

基金项目: 中国地质调查局“黄河流域中下游(河南段)水沙相互作用及生态环境承载力调查监测与评价(编号: DD20220885)”项目资助。

第一作者简介: 庞国涛(1990—), 男, 工程师, 主要从事海岸带环境地质调查与评价工作。Email: pgt5241@163.com。

通信作者简介: 巴音吉(1989—), 男, 工程师, 主要从事自然资源调查监测方面的研究工作。Email: 786439000@qq.com。

明 SOC 含量是影响土壤团聚体稳定性最重要的土壤养分指标。土壤物理性质(土壤容重、含水量、孔隙度等)决定着地上植被的类型以及生长速度^[3],而不同类型的植被又能够影响土壤结构,改变土壤的物理性质和 SOC_D。

太行山脉是我国华北平原和黄土高原的重要生态屏障,区域内的森林和土壤是我国重要的碳库,特别是太行山南麓地区的森林在调节豫西、晋东等地区的气候方面起着至关重要的作用。人工林是该区域林业生态系统的重要组成部分^[11],侧柏和栓皮栎由于具有较强的适应性,是该区域主要的造林树种,生态地位尤为重要^[12]。土地利用类型及植被类型的差异对土壤物理特性具有较大影响,该区域土壤类型主要包括棕壤和石灰岩淋溶褐土,土壤瘠薄,且含有较多的砾石,虽然土壤的全量养分含量并不低,但由于土壤中石块较多、土壤层较薄的特点,限制了该区域林业生态建设的进展。因此深入研究该区域不同类型土地的植被覆盖和土壤有机碳之间的关系对该区域及至整个太行山脉生态系统碳循环指供有价值的参考数据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于太行山南麓,行政区划属济源市,具体位置为济源市西南部,黄河中下游的“之”字形拐角处,黄河小浪底风景区北部,面积约为 72.7 km²,地貌属华北石质山区^[13],自然资源四级区划属济源市灌木林旱地小区(图 1)。成土母

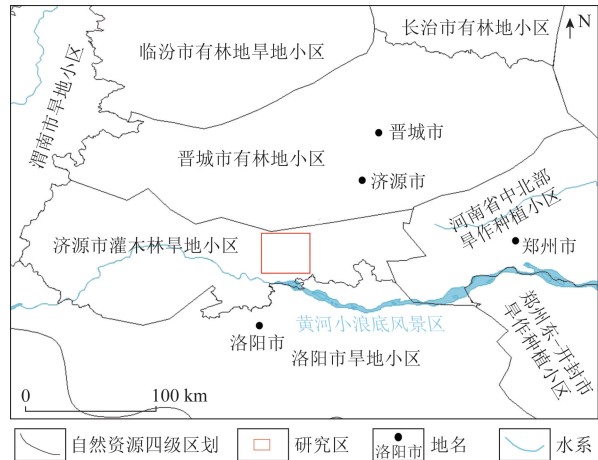


图 1 研究区位置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area location

岩主要为沉积岩的砂岩和泥页岩,土壤类型主要为新成土。研究区属暖温带大陆性季风气候,四季分明,光照充足、水资源丰富,年均气温 14.2 ℃,年均降水量 614.2 mm,多集中在 6—9 月^[13]。北部和西北山区多为栓皮栎林,南部主要为人工刺槐、侧柏、泡桐等用材林和经济林^[14]。山间盆地多种植小麦、玉米、油菜,瓜果等,此外研究区还分布有耕地、坡荒地、撂荒地等。

1.2 样地设置与土壤采集分析

选取研究区内的人工林(侧柏林、刺槐林、栓皮栎林和经济林)和天然林进行样地调查,其中,侧柏林共布设样地 11 个,刺槐林 3 个,栓皮栎林 6 个,经济林 3 个,样地规模为 20 × 20 m。选取林场内不同土地利用类型(林地、耕地、荒地)进行土壤剖面调查与采集,其中,耕地土壤剖面布设 3 组,荒地土壤剖面调查布设 4 组,耕地以小麦、玉米轮种为主,荒地为弃耕 3 年以上的土地,植被以草本植被为主。在每个样地内四角和中心点(非林地采取五点采样法)分别采集 (0, 10] cm, (10, 20] cm, (20, 30] cm, (30, 40] cm 的土壤样品混合均匀后装袋进行 SOC 含量测定。在样地以及非林地的中心点挖取土壤剖面由上至下逐层 (10 cm/层)采集环刀样品(图 2),用以测定土壤物理性质(土壤容重、含水量、孔隙度等)^[15],每处环刀样品至少采集 3 组测定后取均值以减少误差。

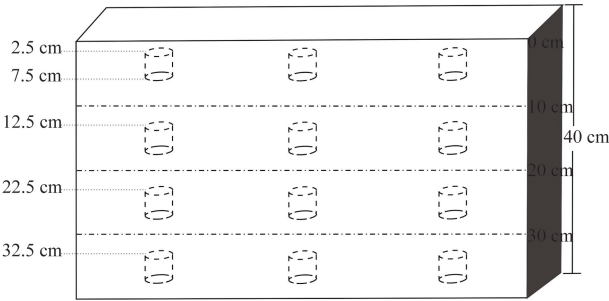


图 2 土壤剖面上环刀取样位置

Fig.2 Position of cutting ring sampling on soil profile

土壤物理性质在野外采样当天测试,土壤有机碳含量由中国地质调查局烟台海岸带地质调查中心化验室测试。测试方法为重铬酸钾氧化-外加热法^[15],具体流程为称取研磨好的土壤样品 0.5 g 放入消解瓶中,加入重铬酸钾和浓硫酸摇匀后加热 2 小时,冷却后将溶液转入锥形瓶加入适量 NaOH 进行中和,而后用蒸馏水定容至刻度线,将溶液转移至测定管放入仪器燃烧掉有机物,应用排水法记录产生 CO₂ 的体积,依此计算出土壤总有机碳含量。

1.3 土壤物理性质及土壤有机碳密度计算

土壤物理性质参考《土壤理化分析》^[16] 进行计算,具体流程为土壤容重采用 100 cm³ 环刀法测定。原始土样称重后,于 105 ℃ 烘干至恒重,计算土壤自然含水量(%)=(原始土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100。随后,将环刀样品孔盖内侧用滤纸隔开后完全浸入水中 24 h,取出拭干表面水分并再次称重,计算饱和含水量(%)=(浸泡后土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100,并以此求得土壤总孔隙度(%)=饱和含水量×容重。

为测定土壤毛管孔隙度,将吸水饱和后的环刀样置于铝盒上,中间以滤纸隔开,放入 105 ℃ 烘箱烘干至恒重并再次称重,计算土壤毛管持水量(%)=(放置后的土质量-烘干土质量)/烘干土质量×100,进而得土壤毛管孔隙度(%)=土壤毛管持水量×容重。最后,土壤非毛管孔隙度(%)=总孔隙度-土壤毛管孔隙度。

SOC_D 是指单位面积内土壤的有机碳储量,是评价土壤碳汇的重要指标,其计算公式为^[7,9]

$$SOCD_i = C_i \times D_i \times H_i \times (1 - G_i) / 100 \quad , (1)$$

$$SOCD = \sum_{i=1}^n SOC D_i \quad 。 (2)$$

式中: SOC_{D_i} 表示第 *i* 层土壤的有机碳密度, kg/m²; *C_i*、*D_i* 和 *H_i* 分别表示第 *i* 层土壤的有机碳含量,10⁻³、土壤容重, g/cm³、土层厚度, cm; *G_i* 为第 *i* 层土壤中粒径大于 0.2 cm 的砾石体积百分比

含量,%。SOC_D 为整个土壤剖面的有机碳密度, kg/m²; *n* 为参与计算土壤剖面的层数。

数据处理方面,利用 GraphPad Prism 8 进行图形绘制,使用 SPSS 25.0 进行数据统计、差异性分析和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 SOC 含量特征

由表 1 可知,研究区不同土地利用类型(0, 40] cm 土壤剖面 SOC 含量均值为 9.46 × 10⁻³ ~ 15.13 × 10⁻³,其中侧柏林的 SOC 含量均值最大,为 15.13 × 10⁻³,耕地 SOC 平均含量最低,为 9.46 × 10⁻³。(0, 40] cm 土壤 SOC 含量均值由大到小排序为侧柏林>荒地>栓皮栎林>刺槐林>经济林>耕地。侧柏林、刺槐林和栓皮栎林土壤剖面的 SOC 含量均表现为首层与其他 3 层差异性明显的现象,其他 3 种土地类型土壤剖面的 SOC 含量无显著差异。不同土地利用类型中,(0, 10] cm 土层之间 SOC 含量无显著性差异;(10, 20] cm 土层中侧柏林与经济林,经济林与耕地以及荒地与其他 5 种土地利用类型之间 SOC 含量存在显著性差异;(20, 30] cm 土层中经济林与耕地 SOC 含量存在显著性差异;(30, 40] cm 土层中耕地与荒地 SOC 含量存在显著性差异。其他土层不同土地利用类型土壤剖面的 SOC 含量无显著差异。

表 1 不同土地利用类型 SOC 含量
Tab.1 Soil organic carbon content of different land use types

土地利用 方式	SOC 含量/10 ⁻³				均值	变异系数/%
	(0, 10] cm	(10, 20] cm	(20, 30] cm	(30, 40] cm		
侧柏林	21.03 ± 5.84aA	13.76 ± 3.31bA	13.10 ± 2.54bAB	11.20 ± 1.94bAB	15.13	29.18
刺槐林	21.02 ± 3.48aA	12.16 ± 2.02bAB	11.47 ± 2.66bAB	9.61 ± 0.72bAB	13.16	37.49
栓皮栎林	24.28 ± 6.64aA	10.96 ± 1.96bAB	11.66 ± 2.06bAB	10.72 ± 1.42bAB	13.77	45.79
经济林	11.45 ± 3.61aA	9.00 ± 2.11aB	14.92 ± 2.69B	10.71 ± 1.77aAB	11.29	21.60
耕地	8.68 ± 1.69aB	11.20 ± 0.49aA	9.32 ± 1.50aA	6.48 ± 4.55aA	9.46	21.82
荒地	15.53 ± 12.87aA	17.31 ± 5.25aC	13.12 ± 1.75aAB	13.08 ± 1.34aB	14.76	13.89
变异系数/%	37.14	31.76	23.24	12.44	26.42	

注:同行数据后凡具有一个相同小写字母者表示同一土地利用类型、不同土层之间的差异不显著(*P* > 0.05, Duncan's 法); 同列数据后凡具有一个相同大写字母者表示同一土层、不同土地利用类型之间的差异不显著(*P* > 0.05, Duncan's 法)

不同土地利用类型(0, 40] cm 土壤剖面的 SOC 含量变异程度不同,变异系数为 13.89% ~ 45.79%,其中栓皮栎林和刺槐林的变异系数较高,分别为 45.79% 和 37.49%,属于中度变异,说明两种

土地利用方式 SOC 含量分布不均匀。(0,40] cm 不同层位土壤 SOC 含量变异系数为 12.44% ~ 37.14%,变异系数随着土层深度的增加而不断减小,其中(0, 10] cm 与(10, 20] cm 的变异系数分

别为 37.14% 和 31.76%, 属于中等变异。

2.2 土壤物理特征

土壤容重是衡量土壤理化性质、土壤肥力情况和土壤耕作适应情况等的重要参数, 主要受土壤颗粒密度、土壤质地和地表植被等影响, 是表征土壤孔隙度、熟化程度以及坚实度的重要指标, 同时也能反映植物根系延展时所受阻力状况等^[17]。研究区不同土地利用类型土壤容重如表 2 所示, 从 (0, 40] cm 土壤剖面均值来看, 研究区土壤容重均值排序为耕地 > 荒地 > 经济林 > 栓皮栎林 > 刺槐林 > 侧柏林。从相同土层不同土地利用类型看: (0, 10] cm 土层侧柏林、刺槐林和栓皮栎林土壤容重与经济林、耕地和荒地土壤容重存在差异性; (20, 30] cm 土层侧柏林和栓皮栎林土壤容重与耕地土壤容重存在差异性; 其他土层各土地利用类型之间差异性不显著。从相同土地利用类型不同土层看: 侧柏林和刺槐林均表现为 (0, 10] cm 土层土壤容重与其他 3 层土壤容重差异性显著; 栓皮栎林 (0, 10] cm 土层与 (30, 40] cm 土层土壤容重存在显著性差异; 经济林、耕地和荒地各土层之间土壤容重差异性均不明显。

表 2 不同土地利用类型土壤容重

Tab. 2 Soil bulk density of different land use types

土地利用方式	土壤容重/10 ⁻³				均值
	(0, 10] cm	(10, 20] cm	(20, 30] cm	(30, 40] cm	
侧柏林	1.24aA	1.37bA	1.44bA	1.41bA	1.37
刺槐林	1.11aA	1.35bA	1.52bAB	1.52bA	1.38
栓皮栎林	1.22aA	1.47abA	1.47abA	1.56bA	1.43
经济林	1.38aB	1.49aA	1.54aAB	1.57aA	1.50
耕地	1.53aB	1.53aA	1.65aB	1.64aA	1.59
荒地	1.46aB	1.55aA	1.57aAB	1.55aA	1.53

注: 同行数据后凡具有一个相同小写字母者表示同一土地利用类型、不同土层之间的差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法); 同列数据后凡具有一个相同大写字母者表示同一土层、不同土地利用类型之间的差异不显著 ($P > 0.05$, Duncan's 法)

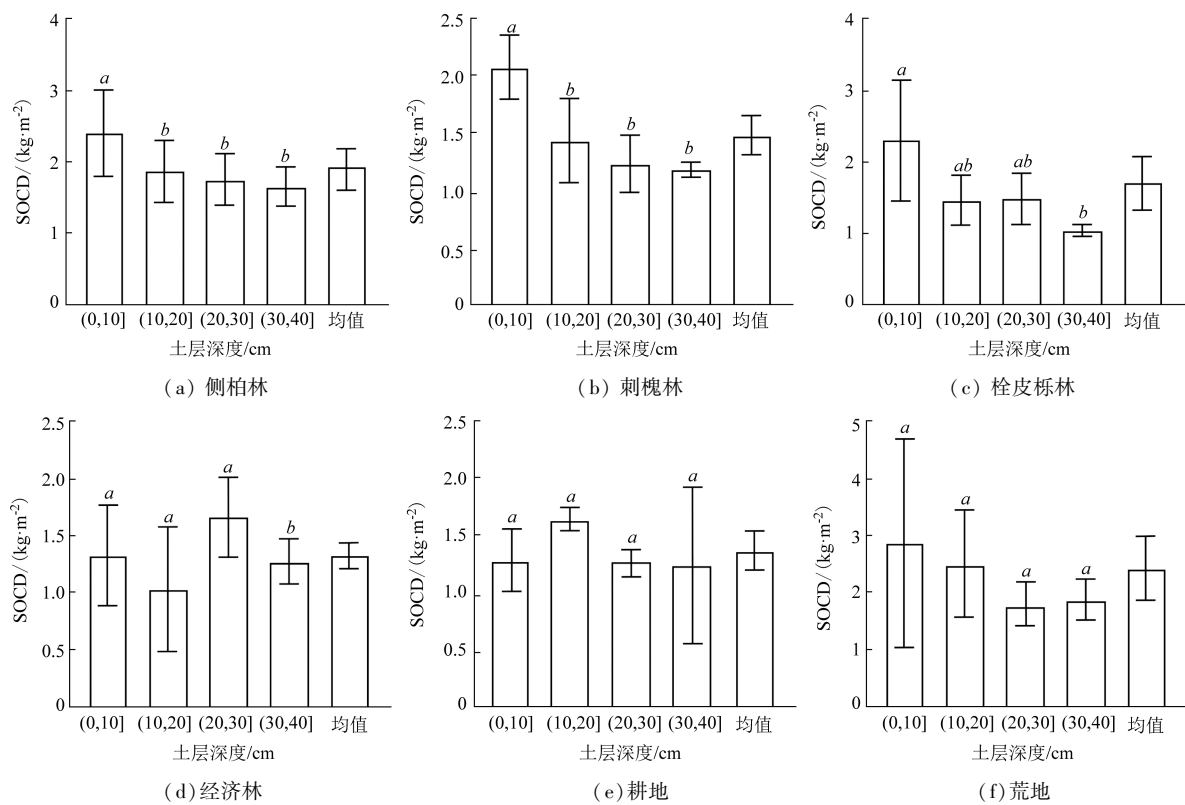
由表 2 可以看出, 不同土地利用类型下的土壤容重均表现为 (0, 10] cm 土层最小, 随着土壤深度的增加呈现出增大的趋势, 与前人研究结果类似^[18-19]。在 (0, 10] cm、(10, 20] cm 和 (20, 30] cm 土层中, 6 种土地利用类型的土壤容重均表现出持续增大或与上层持平; 在 (30, 40] cm 土层中侧柏林、耕地和荒地土壤容重较上层土壤容重有所减少, 刺槐林土壤容重与上层持平, 栓皮栎林土

壤容重和耕地土壤容重增加。综合来看, 各土层间土壤容重相对于表层变化幅度不大, 主要是由于土壤有机碳虽然随着深度增加而减少, 但减少幅度较小导致土壤容重变化幅度不大。不同土地利用类型以及不同层位之间土壤容重存在差异。侧柏林和刺槐林土壤容重相当, 均处于较低水平。耕地和荒地土壤容重相对较大, 推测可能由于地表覆盖植被的不同, 导致土壤中有机碳等的成分含量差异较大。侧柏林和刺槐林土壤有机碳含量较高, 故土壤容重较小, 而耕地和荒地土壤有机碳含量相对较低, 所以土壤容重偏大。

2.3 SOCD 特征

SOCD 受土壤容重、有机碳含量、土地上植被类型、土壤中根系分布、微生物分解速率、砾石 (> 2 mm) 含量以及人类活动等因素的影响^[20-22]。研究区 (0, 40] cm 土壤有机碳密度为 1.33 ~ 2.27 kg/m²。6 种土地利用类型平均土壤有机碳密度排序为荒地 > 侧柏林 > 栓皮栎林 > 刺槐林 > 耕地 > 经济林。侧柏林和刺槐林 (0, 10] cm 土层与其他 3 层 SOCD 均存在显著性差异; 栓皮栎林 (0, 10] cm 土层与 (30, 40] cm 土层 SOCD 值存在显著性差异; 经济林、耕地与荒地各土层间 SOCD 均不存在显著性差异。

由图 3 可知, 在垂直方向, 侧柏林、刺槐林、栓皮栎林和荒地 (0, 10] cm 土层 SOCD 明显高于下方的 3 个土层, 呈现出较为明显的表聚现象, 且 SOCD 的变化趋势与对应的 SOC 含量变化趋势基本一致, 都是随着土层深度的增加呈现出减少趋势, 下面 3 个土层之间差异不明显, 推测可能是土壤受植物凋落物、根系及人类、动物活动等的影响相对较小, 对应的 SOCD 相对稳定。经济林 (20, 30] cm 土层的 SOCD 最大, (10, 20] cm 土层的 SOCD 最小, 各土层间的 SOCD 呈现出与其他几种土地利用类型不同的变化, 可能是由于研究区经济林多分布在坡度较大的山地, 且受人类活动影响, 林下无杂草、灌木等, 暴雨冲刷导致水土流失从而引起土壤有机碳含量的变化。耕地的 SOCD 最大值出现在 (10, 20] cm 土层中, 可能是耕地表层土壤较蓬松, 土壤内的微生物把有机碳分解成 CO₂ 等气体挥发以及经淋滤作用有机碳向下迁移。



注：不同字母 *a*、*b* 表示差异性显著 ($P>0.05$, Duncan's 法)。

图 3 不同土地利用方式 SOCD 的垂直分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of soil organic carbon density for different land use types

不同土地利用类型土壤各土层 SOCD 占剖面土壤密度比例(图 4)可以看出,侧柏林、刺槐林、栓皮栎林和荒地(0,10] cm 土层的 SOCD 占比明显高于其他土层,随着土层深度的增加 SOCD 占比逐渐减少,变化随之平缓。6 种土地利用类型(0, 10] cm 土层的 SOCD 均值所占比例排序为栓皮栎林(36.42%) > 刺槐林(34.97%) > 侧柏林(31.71%) > 荒地(31.64%) > 经济林(25.04%) > 耕地(23.22%)。

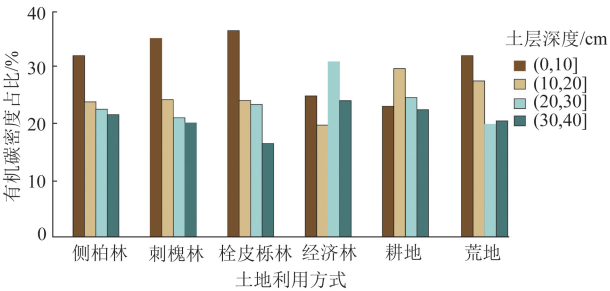


图 4 不同土地利用类型土壤各土层 SOCD 占剖面土壤密度比例

Fig. 4 Proportion of soil organic carbon density to soil density in the entire profile for different land use types

2.4 研究区 SOCD 与 SOC 含量的关系

研究区不同土层深度的 SOCD(*y*) 与 SOC 含量(*x*)的回归分析中,4 个土层的决定系数(R^2)分别为 0.881、0.883、0.742 和 0.662,均达到高度正相关水平^[23]。决定系数(R^2)随着土壤深度的增加呈现出减小趋势,说明土层深度越浅 SOCD 受 SOC 含量的影响因素越大,反之 SOCD 受 SOC 含量的影响越小。

研究区(0, 40] cm 土层 SOCD 与 SOC 含量的拟合曲线斜率表现为随着深度的增加呈现增-减-增的趋势,而截距在(10, 20] cm 和(30, 40] cm 土层出现负值(图 5)。随着土层深度的增加,对应层位的 SOC 含量每增加 10^{-3} ,土层的 SOCD 分别增加 0.116 kg/m²、0.139 kg/m²、0.128 kg/m²和 0.143 kg/m²。研究区(0, 40] cm 土层的 SOCD 与 SOC 含量的拟合曲线决定系数(R^2)为 0.868(图 5(e)),达到了显著水平,斜率为 0.123,说明 SOCD 受 SOC 含量影响较大,呈现正相关。

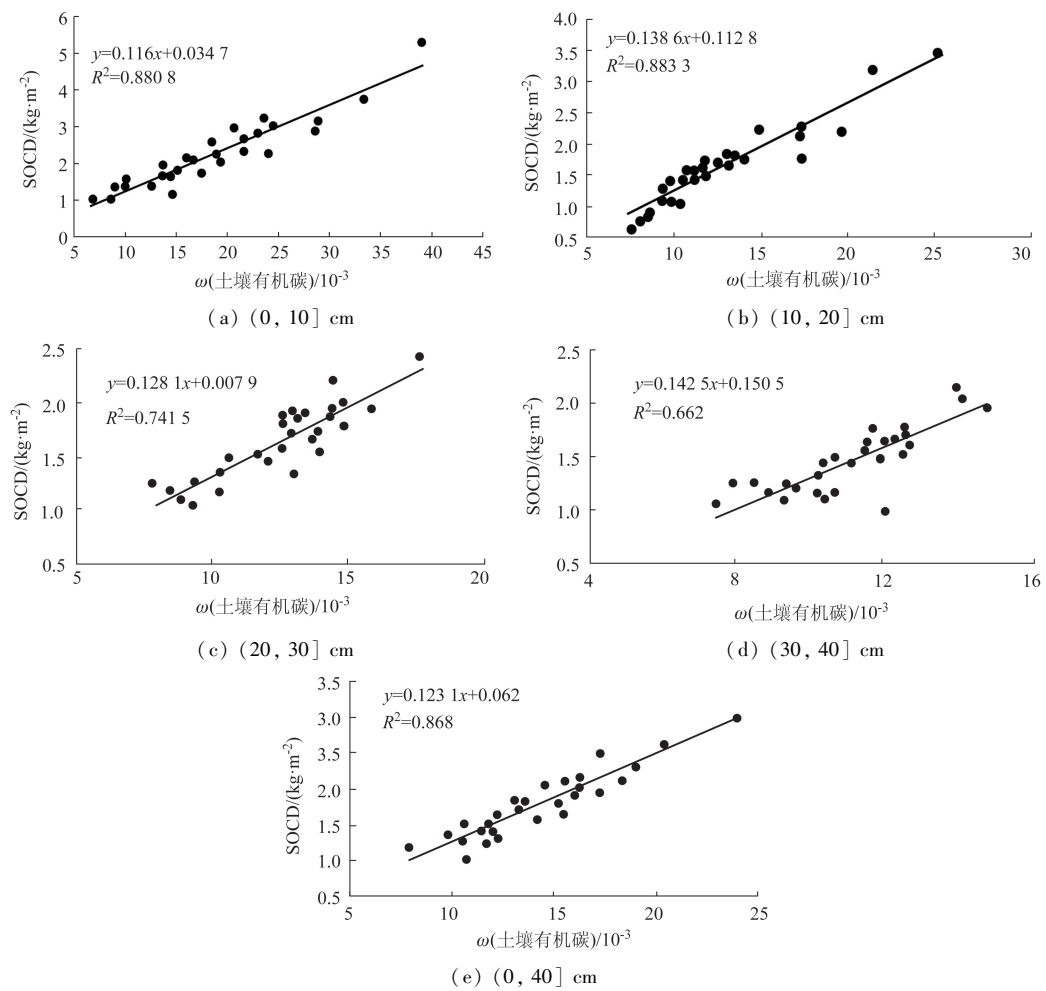


图5 不同土层的 SOCD 与 SOC 含量的关系

Fig.5 Relationship between soil organic carbon density and organic carbon content for different soil layers

2.5 研究区 SOC 含量与土壤物理性质的相关性

研究区 6 种土地利用类型、SOCD 与土壤物理性质的相关性如表 3 所示,SOC 含量与 SOCD 呈现出显著正相关; SOC 含量与土壤含水量的相关系数为 -0.450 ,呈显著负相关,这可能与土壤中可溶解的有机碳会随着水分流失有关^[24]。SOCD 与 6 个土壤物理参数指标相关性均较差;土壤容

重与毛管持水量在 0.01 级别呈显著负相关,与总孔隙度在 0.05 级别呈显著负相关;土壤含水量与毛管孔隙度在 0.01 级别相关性显著;毛管持水量与总孔隙度和毛管孔隙度在 0.05 级别相关性显著;总孔隙度与毛管孔隙度在 0.05 级别相关性显著;毛管孔隙度与非毛管孔隙度呈显著负相关。

表 3 研究区土壤参数的相关性

Tab.3 Correlation of soil parameters in the study area								
	SOC 含量	SOCD	土壤容重	土壤含水量	毛管持水量	总孔隙度	毛管孔隙度	非毛管孔隙度
SOC 含量	1							
SOCD	0.932 **	1						
土壤容重	-0.243	-0.040	1					
土壤含水量	-0.450 *	-0.202	0.346	1				
毛管持水量	0.162	0.080	-0.740 **	0.065	1			
总孔隙度	0.064	0.054	-0.446 *	0.192	0.743 **	1		
毛管孔隙度	-0.013	0.053	-0.184	0.403 *	0.751 **	0.701 **	1	
非毛管孔隙度	0.096	-0.007	-0.294	-0.311	-0.111	0.270	-0.497 **	1

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

3 讨论

3.1 不同土地利用类型对 SOC 含量的影响

SOC 含量受地表覆盖层、植被凋落物、土壤微生物作用、气候条件以及人为干扰等因素的共同影响^[25]。本研究中,侧柏林、刺槐林、栓皮栎林和荒地(0,10] cm 土层 SOC 含量具有明显的表聚现象,原因为表层凋落物覆盖促进有机碳输入,良好通气性及发达根系增强生物活性,利于有机碳累积。随土层加深,通气性恶化与微生物活性衰减导致养分循环受阻,SOC 含量锐减^[26-27]。而经济林与耕地因频繁人为干扰(翻耕、除草、施肥),土层间 SOC 含量分布紊乱且变幅显著。

本研究中土壤剖面(0,40] cm 的 SOC 含量均值表现为侧柏林最高,且明显高于其他土地利用类型,这可能是侧柏林植被相对丰富,大量的凋落物和较厚腐殖质层在地表形成一个覆盖层,对林下 SOC 的积累起到积极的作用。荒地的 SOC 含量仅次于侧柏林,高于其他土地利用类型,研究区荒地有坡荒地和撂荒地,多分布在丘陵沟谷地带,受土壤径流的影响,养分等多在此汇聚^[28],加之地表草本、灌木植被茂密,地表凋落物较厚,有利于有机碳的补充和积累^[29]。栓皮栎林和刺槐林的 SOC 含量相当,在研究区处于中等水平,由于其林下枯落物多为枝叶等易分解的软质,土壤有机碳的积累相对较少,因此 SOC 含量较低^[30]。刺槐林与栓皮栎林在立地生长条件上存在显著的差异,从土壤质地来看,刺槐林所在的土壤通常表现为土质疏松、空隙度大,这种土壤结构有利于水分的渗透和空气的流通,但同时也可能导致土壤有机碳的快速分解和流失;相比之下,栓皮栎林所生长的土壤往往更为紧实,能够更有效地保持 SOC 和其他养分。在枯叶分解速度方面,刺槐的叶片小而柔软,这种特性使得其枯叶在分解过程中更易受到微生物和酶的作用,从而加速分解过程,这种较快的分解速度虽然有助于养分的快速释放,但也可能导致 SOC 含量的降低。相比之下,栓皮栎的枯叶具有较厚的角质层和较高的木质素含量,其分解速度相对较慢,有利于 SOC 的积累和保持^[29]。耕地的 SOC 含量最低,原因主要在于研究区耕地多种植小麦、玉米、油菜等农作物,收获后作物秸秆的移除使得耕地地表缺乏枯落物的覆盖和积累,这直接减少了耕地土壤中有

机碳的自然补充来源;耕作过程中,土壤下层的有机碳被翻动至表层,暴露于外部环境,进一步加剧了 SOC 的流失;同时,耕作还能增加土壤中微生物的数量和活性,这些微生物通过其生物活动进一步促进了有机碳的降解速度^[31]。

3.2 不同深度对 SOC 影响

本研究中除受人类活动影响较大的经济林和耕地外其它土地利用类型 SOC 含量和 SOCD 值均呈现出随着深度的增加而减小的趋势,与前人研究结果一致^[27,30]。SOC 含量分布特征明显受到地表凋落物和腐殖层分解的影响,这些分解产物所释放的养分和有机碳往往优先进入表层土壤,进而导致表层土壤中的有机碳含量相对较高,呈现出明显的表聚现象^[32]。另一个重要的因素是植被的根系活动和土壤中的微生物群落,根系通过其生物力学作用以及分泌物与土壤微生物共同促进了表层土壤有机碳的积累^[33]。然而,随着土壤深度的增加,这些影响因素的作用逐渐减弱。植物根系的分布密度和活性降低,腐殖层养分向深层土壤的转化效率也下降,同时深层土壤中的微生物数量和活性也相对减少。

本研究中 SOCD 的分布在剖面上的垂直变化幅度较小,(0,10] cm 土层的 SOCD 均值分别占整个剖面的 23.22% ~ 36.42%,远低于秦岭(40.1% ~ 53.7%)^[34]和大兴安岭(84.7%以上)^[35]。研究区 SOCD 的均值为 1.33 ~ 2.27 kg/m²,远低于河南省森林土壤(0 ~ 100 cm)的 SOCD 均值(10.68 kg/m²)^[36]、中国森林的 SOCD 均值(10.8 kg/m²)^[37]以及全球森林的 SOCD 均值(11.3 kg/m²)^[38],主要原因可能是由于研究区属于石质山区,石多土少,土层深度一般在 30 ~ 60 cm,土壤层含石砾较多且土层厚度偏薄导致其 SOCD 相对较低^[39]。

3.3 土壤透水性对 SOC 含量分布的影响

SOC 含量和空间分布格局受地形、气候和土壤条件、地表植被类型、植被生产力、地下和地上生物量分配格局、土壤微生物、动物以及人类活动等的综合影响^[36,38]。本研究中 SOC 含量与土壤含水量之间存在较强的负相关性,这意味着在土壤较湿润的情况下,有机碳的含量会降低,推测湿润的环境有利于有机碳的分解和降解。SOC 含量、SOCD 与土壤容重之间均呈现负相关性,较高的土壤容重会导致土壤的紧实度增加,导致土壤孔隙度降低,土壤

透水性和通气性变差,会显著影响植物根系的生长环境和土壤微生物的生存条件,使有机碳更难以存在于土壤中。相比之下,表层土壤通常具有较低的土壤容重和较大的土壤孔隙度,为有机碳的分解和转化提供了适宜的环境^[40]。而随着土层深度的增加土壤容重相应增加,土壤微生物和植物根系减少,有机碳也相应的减少。此外,毛管持水量与总孔隙度、毛管孔隙度之间存在较强的正相关性,这意味着土壤的毛管持水量与孔隙度的增加是相关联的。较高的毛管持水量说明土壤孔隙度较高,有利于水分的保持。非毛管孔隙度与有机碳含量之间存在较强的正相关性,这说明较高的非毛管孔隙度有助于有机碳的聚集和储存,非毛管孔隙度的增加可提高土壤的通气性、透水性以及根系在土壤中的伸展程度,有利于凋落物分解转化以及土壤中微生物的活动,为有机碳循环和富集提供了更多的空间。因此,可考虑通过改善土壤的物理性质促进养分和有机碳更好地输送到土壤中,从而提高土壤的碳汇功能。

4 结论

(1)以侧柏林、刺槐林、栓皮栎林、经济林、耕地、荒地的(0,40] cm 表层土壤为研究对象,其 SOC 均值 $9.46 \times 10^{-3} \sim 15.13 \times 10^{-3}$,SOCD 均值为 $1.33 \sim 2.27 \text{ kg/m}^2$,不同土地利用类型和不同深度的 SOCD、SOC 含量均表现出弱变异特征。

(2)除耕地和经济林外,其他土地利用类型 SOCD 值和 SOC 含量均随着土层深度增加而减小,(0,10] cm 土层 SOCD 明显高于剖面其他层位,具有明显的表聚现象。SOC 含量与 SOCD 呈显著正相关,与土壤含水量呈显著负相关,与其他土壤物理参数相关性较差。

(3)研究区 SOC 含量在不同土地利用类型上表现出不均匀性,由于土层较薄导致其含量相对偏低,在垂向上排除人为干扰表现为随着深度的增加而减少。研究认为可通过改善土壤物理性质来提高土壤中养分含量和碳汇。

参考文献(References):

- [1] Lal R, Kimble J M, Stewart B A, et al. Global climate change and pedogenic carbonate[J]. *Geoderma*, 1999, 104(1): 135–141.
- [2] Liao J D, Boutton T W, Jastrow J D. Organic matter turnover in soil physical fractions following woody plant invasion of grassland: evidence from natural ^{13}C and ^{15}N [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(11): 3197–3210.
- [3] Martin M P, Wattenbach M, Smith P, et al. Spatial distribution of soil organic carbon stocks in France[J]. *Biogeosciences*, 2011, 8(5): 1053–1065.
- [4] Santini N S, Adame M F, Nolan R H, et al. Storage of organic carbon in the soils of Mexican temperate forests[J]. *Forest Ecology and Management*, 2019, 446: 115–125.
- [5] Lal R, Smith P, Jungkunst H F, et al. The carbon sequestration potential of terrestrial ecosystems[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73(6): 145A–152A.
- [6] 冯嘉仪, 储双双, 王婧, 等. 华南地区几种典型人工林土壤有机碳密度及其与土壤物理性质的关系[J]. *华南农业大学学报*, 2018, 39(1): 85–92.
Feng J Y, Chu S S, Wang J, et al. Soil organic carbon density and its relationship with soil physical properties of typical plantations in South China[J]. *Journal of South China Agricultural University*, 2018, 39(1): 85–92.
- [7] 苗蕾, 杨喜田, 王婷, 等. 太行山南麓不同演替阶段土壤有机碳含量及季节变化特征[J]. *河南农业大学学报*, 2016, 50(3): 318–324.
Miao L, Yang X T, Wang T, et al. Seasonal dynamics and content of soil organic carbon of Southern foot of Taihang Mountains during different natural successions[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2016, 50(3): 318–324.
- [8] Jobbágy E G, Jackson R B. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation[J]. *Ecological Applications*, 2000, 10(2): 423–436.
- [9] 张立, 金晶泽, 姜侠, 等. 1986—2019 年黑龙江省松嫩平原表层土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J]. *现代地质*, 2021, 35(04): 914–922.
Zhang L, Jin J Z, Jiang X, et al. Variations of Organic Carbon and Evaluation of Carbon Sequestration Potential in Surface Soil in Songnen Plain of Heilongjiang Province from 1986 to 2019[J]. *Geoscience*, 2021, 35(04): 914–922.
- [10] 张艳, 刘彦伶, 李渝, 等. 喀斯特石漠化地区土地利用方式对土壤团聚体稳定性及其有机碳分布特征的影响[J]. *土壤通报*, 2021, 52(6): 1308–1315.
Zhang Y, Liu Y L, Li Y, et al. Effects of land use patterns on soil aggregate stability and organic carbon distribution in the Karst rocky desertification area[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(6): 1308–1315.
- [11] 王平, 张劲松, 孟平, 等. 华北低丘山地栓皮栎人工林土壤呼吸变化特征及其与撂荒地的差异[J]. *中国农业气象*, 2011, 32(3): 346–349.
Wang P, Zhang J S, Meng P, et al. Comparison of soil respiration variation characteristics between quercus variabilis plantation and abandoned land in the south hilly region of North China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2011, 32(3): 346–349.
- [12] 黄辉, 孟平, 张劲松, 等. 华北低丘山地人工林蒸散的控制因子[J]. *生态学报*, 2014, 34(3): 667–673.

- Huang H, Meng P, Zhang J S, et al. Stomatal and environmental control on evapotranspiration in a plantation in the lower mountain areas of North China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, 34 (3): 667 – 673.
- [13] 何林倩, 刘倩, 王德彩, 等. 基于数字土壤制图技术的土壤有机碳储量估算[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(2): 591 – 600.
- He L Q, Liu Q, Wang D C, et al. Estimation of soil organic carbon storage based on digital soil mapping technique [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(2): 591 – 600.
- [14] 施梦月. 基于时间序列 HJ-1A/1B 数据的林型识别——以济源南山林场为例[D]. 郑州: 河南农业大学, 2022.
- Shi M Y. Forest Type Recognition Based on Time Series HJ-1A/1B data: Taking Nanshan Forest Farmin Jiyuan As an Example [D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2022.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- Bao S D. Soil Agrochemical Analysis [M]. 3rd ed. Beijing: China Agricultural Press, 2000.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.
- Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Soil Physical and Chemical Analysis [M]. Shanghai: Shanghai Scientific & Technical Publishers, 1978.
- [17] 陈伟志, 张亚, 李静婷, 等. 川滇干热河谷区土壤容重空间变异特征——以滇中楚雄地区为例[J]. *中国地质调查*, 2024, 11(2): 62 – 71.
- Chen W Z, Zhang Y, Li J T, et al. Spatial variability characteristics of the soil bulk density in the dry hot valley of Sichuan – Yunnan region: Taking Chuxiong area in Central Yunnan as an example [J]. *Geological Survey of China*, 2024, 11(2): 62 – 71.
- [18] 薄会娟, 董晓华, 郭梁锋, 等. 湖北省土壤有机碳垂直分布及储量估算[J]. *环境科学与技术*, 2018, 41(12): 290 – 296.
- Bo H J, Dong X H, Guo L F, et al. Vertical distribution and storage estimation of soil organic carbon in Hubei province [J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(12): 290 – 296.
- [19] Suuster E, Ritz C, Roostalu H, et al. Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils [J]. *Geoderma*, 2011, 163(1–2): 74 – 82.
- [20] 覃智莲, 杨孝民, 宋照亮, 等. 成土母质和土地利用方式对土壤有机碳化学组成的影响[J]. *土壤通报*, 2020, 51(3): 621 – 629.
- Qin Z L, Yang X M, Song Z L, et al. Effects of parent materials and land uses on soil organic carbon fractions [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, 51(3): 621 – 629.
- [21] 梁启鹏, 余新晓, 庞卓, 等. 不同林分土壤有机碳密度研究[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(4): 889 – 893.
- Liang Q P, Yu X X, Pang Z, et al. Study on soil organic carbon density of different forest types [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2010, 19(4): 889 – 893.
- [22] 辛文杰, 苏印泉, 朱铭强, 等. 千阳县不同林分土壤有机碳的分布特征[J]. *中南林业科技大学学报*, 2014, 34(5): 66 – 69, 78.
- Xin W J, Su Y Q, Zhu M Q, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon of different forests in Loess Plateau of Qianyang county [J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2014, 34(5): 66 – 69, 78.
- [23] 贾俊平, 何晓群, 金勇进. 统计学[M]. 7 版. 北京: 中国人民大学出版社, 2018: 179 – 181.
- Jia J P, He X Q, Jin Y J. Statistics [M]. 7th ed. Beijing: China Renmin University Press, 2018: 179 – 181.
- [24] 田舒怡, 满秀玲. 大兴安岭北部森林土壤微生物量碳和水溶性有机碳特征研究[J]. *土壤通报*, 2016, 47(4): 838 – 845.
- Tian S Y, Man X L. Characteristics of soil microbial biomass carbon and dissolved organic carbon in northern forest region of Daxing'an Mountains [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2016, 47(4): 838 – 845.
- [25] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security [J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623 – 1627.
- [26] 王芳, 黄政, 孙希华, 等. 大小兴安岭林区不同林型土壤养分综合评价[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(1): 182 – 187.
- Wang F, Huang M, Sun X H, et al. Evaluation of soil nutrients for different forest types in Xing'an Mountains forest area [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(1): 182 – 187.
- [27] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 等. 太行山低山丘陵区人工林表层土壤有机碳和全氮分布特征[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 511 – 517.
- Feng X J, Zhang Z H, Yang X T, et al. Distribution characteristics of surface soil organic carbon and total nitrogen in forest plantation of hilly area of Taihang Mountains, China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(2): 511 – 517.
- [28] 郭胜利, 刘文兆, 史竹叶, 等. 半干旱区流域土壤养分分布特征及其与地形、植被的关系[J]. *干旱地区农业研究*, 2003, 21(4): 40 – 43.
- Guo S L, Liu W Z, Shi Z Y, et al. Soil nutrients distribution and its relation to landform and vegetation at small watershed in semi-arid area [J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2003, 21(4): 40 – 43.
- [29] 方运霆, 莫江明, 彭少麟, 等. 森林演替在南亚热带森林生态系统碳吸存中的作用[J]. *生态学报*, 2003, 23(9): 1685 – 1694.
- Fang Y T, Mo J M, Peng S L, et al. Role of forest succession on carbon sequestration of forest ecosystems in lower subtropical China [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(9): 1685 – 1694.
- [30] 王海稳, 张金柱, 许中旗, 等. 太行山区不同土地利用方式下土壤碳贮量的研究[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(2): 89 – 91, 132.
- Wang H W, Zhang J Z, Xu Z Q, et al. Soil carbon storage patterns of different land use systems in Taihang Mountain [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(2): 89 – 91, 132.
- [31] 张志良. 植物生理学实验指导[M]. 2 版. 北京: 高等教育出版社, 1990.
- Zhang Z L. Experimental Course of Plant Physiology [M]. 2nd ed. Beijing: Higher Education Press, 1990.
- [32] 魏强, 凌雷, 柴春山, 等. 甘肃兴隆山森林演替过程中的土壤

- 理化性质[J]. 生态学报, 2012, 32(15): 4700–4713.
- Wei Q, Ling L, Chai C S, et al. Soil physical and chemical properties in forest succession process in Xinglong Mountain of Gansu[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32(15): 4700–4713.
- [33] Chow A T, Tanji K K, Gao S D, et al. Temperature, water content and wet – dry cycle effects on DOC production and carbon mineralization in agricultural peat soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2006, 38(3): 477–488.
- [34] 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.
- Wang D, Geng Z C, She D, et al. Vertical distribution of soil active carbon and soil organic carbon storage under different forest types in the Qinling Mountains[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(6): 1569–1577.
- [35] 魏亚伟, 于大炮, 王清君, 等. 东北林区主要森林类型土壤有机碳密度及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2013, 24(12): 3333–3340.
- Wei Y W, Yu D P, Wang Q J, et al. Soil organic carbon density and its influencing factors of major forest types in the forest region of Northeast China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2013, 24(12): 3333–3340.
- [36] 王军广, 王鹏, 赵志忠, 等. 海南岛东部地区土地利用方式对土壤有机碳含量的影响[J]. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 41(5): 171–179.
- Wang J G, Wang P, Zhao Z Z, et al. Effects of land use types on soil organic carbon content in eastern Hainan Island[J]. *Journal of Guangxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 41(5): 171–179.
- [37] 刘世荣, 王晖, 栾军伟. 中国森林土壤碳储量与土壤碳过程研究进展[J]. *生态学报*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- Liu S R, Wang H, Luan J W. A review of research progress and future prospective of forest soil carbon stock and soil carbon process in China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(19): 5437–5448.
- [38] Sombroek W G, Nachtergaele F, Hebel A. Amounts, dynamics and sequestering of carbon in tropical and subtropical soils[J]. *Ambio A Journal of the Human Environment*, 1993, 22(7): 417–426.
- [39] 曾宪勤, 庄严, 张天宇, 等. 北方石质山区表层土壤有机碳密度特征分析——以密云县为例[J]. *资源科学*, 2009, 31(4): 669–673.
- Zeng X Q, Zhuang Y, Zhang T Y, et al. Analysis of soil organic carbon density in the lithoid mountainous area in North China: A case study in Miyun county[J]. *Resources Science*, 2009, 31(4): 669–673.
- [40] 王群, 尹飞, 郝四平, 等. 下层土壤容重对玉米根际土壤微生物数量及微生物量碳、氮的影响[J]. *生态学报*, 2009, 29(6): 3096–3104.
- Wang Q, Yin F, Hao S P, et al. Effects of subsoil bulk density on rhizospheric soil microbial population, microbial biomass carbon and nitrogen of corn (*Zea mays* L.) field[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(6): 3096–3104.

Distribution characteristics of soil organic carbon in different land use types at the southern foot of Taihang Mountains

PANG Guotao^{1,2,3}, LIU Xiaohuang^{2,4}, BA Yinji^{1,2,3}, FAN Zhifu^{1,3}, LI Zhaohe^{1,3}, WANG Guiheng^{1,3}

(1. *Yantai Center of Coastal Zone Geological Survey, China Geological Survey, Yantai Shandong 264000, China*; 2. *Key Laboratory of Coupling Process and Effect of Natural Resources Elements, Ministry of Natural Resources, Beijing 100055, China*; 3. *Observation and Research Station of Land – Sea Interaction Field in the Yellow River Estuary, Ministry of Natural Resources, Yantai Shandong 264000, China*; 4. *Natural Resources Comprehensive Survey Command Center, China Geological Survey, Beijing 100055, China*)

Abstract: Jiyuan section on the southern slope of Taihang Mountains is an area with relatively special topography, landforms and vegetation types in the Yellow River Basin. Estimating and comparing the soil physical properties and organic carbon density of different land use types in this area is of great guiding significance for rational land use and soil carbon pool management. By taking the (0, 40] cm surface soil of *Platycladus orientalis* forest, *Robinia pseudoacacia* forest, *Quercus variabilis* forest, economic forest, cultivated land and wasteland as the research objects, and through field investigation and sampling and indoor laboratory analysis, the authors compared and analyzed the vertical distribution characteristics of soil bulk density, organic carbon content (SOC) and soil organic carbon density (SOCD) of different land use types, and further analyzed the correlation between soil physical properties and organic carbon. The average range of organic carbon content of (0, 40] cm surface soil in six land use types is $9.46 \times 10^{-3} \sim 15.13 \times 10^{-3}$, and the average content is the lowest in cultivated land and the highest in wasteland. The average range of soil organic carbon density is between $1.33 \sim 2.27 \text{ kg/m}^{-2}$, and the average

value is the lowest in economic forest and the highest in wasteland. Both the soil organic carbon content and soil organic carbon density of different land use types and different depths show variation characteristics. The soil organic carbon content and soil organic carbon density decrease with the increase of depth, except cultivated land and economic forest. The soil organic carbon density in the (0, 10] cm soil layer is significantly higher than that in other layers of the profile. The soil organic carbon content is positively correlated with soil organic carbon density and negatively correlated with soil water content. Different land use types could affect the input of soil carbon sources, and thus affect soil physical properties, soil organic carbon content and soil organic carbon density. The research results could provide references for soil carbon sink assessment in this area.

Keywords: land use type; soil organic carbon density; vertical distribution; soil bulk density; the southern foot of Taihang Mountains

(责任编辑：王晗)