

DOI: 10.11766/trxb202402040063

高文静, 夏冰, 芦园园, 应蓉蓉, 胡鹏杰, 李轶滔, 陈红枫, 钱家忠. 基于土壤剖面发生层和环境变量的安徽省土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2024

GAO Wenjing, XIA Bing, LU Yuanyuan, YING Rongrong, HU Pengjie, LI Yixu, CHEN Hongfeng, QIAN Jiazhong. Characteristics of Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Anhui Province Based on Soil Profile Occurrence Layer and Environmental Variables[J]. Acta Pedologica Sinica, 2024

# 基于土壤剖面发生层和环境变量的安徽省土壤有机碳空间分布特征\*

高文静<sup>1,2</sup>, 夏冰<sup>2,3†</sup>, 芦园园<sup>3</sup>, 应蓉蓉<sup>3</sup>, 胡鹏杰<sup>4</sup>, 李轶滔<sup>1,2</sup>, 陈红枫<sup>2</sup>, 钱家忠<sup>1†</sup>

(1. 合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009; 2. 安徽省生态环境科学研究院, 合肥 230071; 3. 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042; 4. 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008)

**摘要:** 为了解安徽省土壤有机碳的空间分布特征和提高区域土壤固碳潜力, 以安徽省典型土壤剖面的发生层为切入点, 测定了 451 个典型土壤剖面表土层(A层)、心土层(B层)和母质层(C层)土壤有机碳含量, 运用地统计学方法分析土壤剖面有机碳分布特征, 并利用相关分析、随机森林回归分析方法探讨了土壤有机碳含量空间分异的影响因素, 绘制了土壤有机碳含量空间分布图。结果表明: 安徽省土壤剖面有机碳平均含量为  $8.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 总体水平较低, 其中 A 层平均为  $15.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 远高于 B 层(平均值  $5.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 和 C 层(平均值  $3.74 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ), 且所有层次均具有中等强度的空间变异性; 各发生层有机碳含量在空间分布上均大体呈现由北向南递增的特征; 影响土壤有机碳空间变异因子 A 层是土壤颗粒组成和容重, B 层是地形因子和土壤颗粒组成, C 层是土壤黏粒、粉粒含量、地形因子和容重。土壤颗粒组成是驱动安徽省土壤有机碳空间分布特征的主要因子, 但在制定土壤有机碳调控措施时也要充分考虑地形因子和土壤容重的影响。

**关键词:** 土壤有机碳; 土壤剖面; 空间分布; 影响因素; 安徽省

**中图分类号:** S155 **文献标志码:** A

## Characteristics of Spatial Distribution of Soil Organic Carbon in Anhui Province Based on Soil Profile Occurrence Layer and Environmental Variables

GAO Wenjing<sup>1,2</sup>, XIA Bing<sup>2,3†</sup>, LU Yuanyuan<sup>3</sup>, YING Rongrong<sup>3</sup>, HU Pengjie<sup>4</sup>, LI Yixu<sup>1,2</sup>, CHEN Hongfeng<sup>2</sup>, QIAN Jiazhong<sup>1†</sup>

(1. School of Resource and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Academy of

\*国家重点研发计划(2020YFC1807505)和安徽省土壤环境背景值制定项目(ZXBZ2021-02)共同资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No.2020YFC1807505) and Anhui Province Soil Environmental Background Value Development Project (No.ZXBZ2021-02)

通讯作者 Corresponding author, E-mail: xiabing@nies.org; qianjiazhong@hfut.edu.cn

作者简介: 高文静(1998-), 女, 安徽宿州人, 硕士研究生, 主要从事土壤有机碳空间变异性的研究。E-mail: gaowj15@163.com

收稿日期: 2024-02-04; 收到修改稿日期: 2024-03-20; 网络首发日期 ([www.cnki.net](http://www.cnki.net))

*Environmental Science Research, Hefei 230071, China; 3. Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Environment, Nanjing 210042, China; 4. State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China*

**Abstract:** 【Objective】 Soil organic carbon (SOC) plays an important role in the global carbon cycle, and extremely small changes in SOC could cause dramatic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> concentration. Accurately grasping the spatial distribution characteristics of SOC and its main controlling factors is an important requirement for improving soil carbon sequestration potential and coping with climate change. Therefore, this study aimed to analyze the spatial distribution of SOC in the topsoil layer (A genetic horizon), subsoil layer (B genetic horizon), and parent material layer (Parent material) in Anhui Province from the perspective of the soil profile occurrence layer and explore the factors controlling the changes of SOC in different profile occurrence layers. 【Method】 In this study, a total of 451 sites were distributed in the study area using the systematic distribution method combined with the judgmental distribution method. The basic soil parameters, such as SOC content, pH, soil texture, and bulk density, were obtained from 451 sites through wild sampling and indoor experiments. Meanwhile, the related environmental variables, such as climatic factors, topographic factors, and normalized difference vegetation index, were also collected. Also, we used geostatistical methods to obtain the best half-variance function model and spatial distribution characteristics of SOC content at different soil profile levels, as well as correlation analysis and random forest regression analysis to explore the influencing factors of spatial differences in SOC content. 【Result】 The results showed that the average organic carbon content of the soil profile in Anhui Province was 8.47 g•kg<sup>-1</sup> and there was a phenomenon of surface aggregation of SOC, whose occurrence in the layer was as follows: A genetic horizon: 15.86 g•kg<sup>-1</sup> > B genetic horizon: 5.80 g•kg<sup>-1</sup> > Parent material: 3.74 g•kg<sup>-1</sup> and all of them had moderate spatial variability. The spatial distribution map of SOC showed that the spatial distribution of organic carbon content in each occurrence layer was generally increasing from north to south. We also found that there were some differences in the driving factors of SOC content in different profiles of the occurrence layer. In the A genetic horizon, soil texture, and bulk density were the most important factors affecting SOC content; as the depth of the soil layer increased, the influence of topographic factors and soil texture gradually strengthened on the accumulation of SOC content in the B genetic horizon. For the Parent material, the influence of soil texture, topographic factors, and bulk density were all more influential on the SOC content. 【Conclusion】 Soil texture is the main factor driving the spatial distribution characteristics of SOC in Anhui Province, but the effects of topographic factors and bulk density should also be fully considered in the subsequent development of SOC control measures, to provide theoretical support for improving soil quality and coping with climate change.

**Keywords:** Soil organic carbon; Soil profile; Spatial distribution; Influencing factors; Anhui Province

土壤碳库占陆地生态系统碳库的绝大部分，其包含的碳含量分别为陆地植被和大气碳库的 3 倍和 2 倍<sup>[1]</sup>，极小的土壤碳变化会引起大气 CO<sub>2</sub> 浓度的剧烈变化<sup>[2-3]</sup>，从而导致全球气候变化。土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC)，是全球碳循环中重要的碳库之一<sup>[4]</sup>，据估计仅上部 1 m 土体的 SOC 储量就约为 1500 Pg C (1 Pg C = 10<sup>15</sup> g C) <sup>[5]</sup>。此外，在区域尺度下，SOC 也是土壤肥力、环境质量和健康的重要指标之一。因此，针对区域尺度进行 SOC 分布特征及其影响因素分析讨论，对研究区域土壤质量管理、提高管理碳输入能力具有重要意义。

关于区域 SOC 空间分布特征已有大量研究<sup>[6-8]</sup>，但以往研究多聚集在按照固定深度划分土壤剖面层次<sup>[9-10]</sup>，关于不同发生层 SOC 的分布特征及影响因素的研究相对较少<sup>[11]</sup>。王邵强等<sup>[12]</sup>指出依照等间隔测度方法计算 SOC 含量会忽略土壤发生学的影响；郑琳等<sup>[13]</sup>通过按固定深度取样和按土壤自然发生层取样两种方法发现所得 SOC 密度存在显著差异，按固定深度取样时，表层 (0~30 cm) SOC 占主体地位，而按自然发生层取样时，淀积层因厚度大导致 SOC 密度最大。此外，影响 SOC 含量空间分布特征的驱动因素较为复杂，近年来国内外学者发现导致 SOC 含量空间异质性的主控因素在不同研究区域和研究尺度下不同<sup>[14-15]</sup>。如陈颖洁等<sup>[16]</sup>发现气候和矿物是造成内蒙古温带草地

SOC 组分含量空间变异的主要因素, 而 Yang 等<sup>[17]</sup>通过三维连续分布的数字制图方法得出植被相关协变量对青藏高原东北部高寒草地表层 SOC 分布的影响最为显著。因此, 掌握不同研究尺度下不同区域土壤剖面 SOC 含量的分布特征, 明确控制 SOC 含量的关键因素, 有利于最大限度地提高碳封存的气候效益, 开发更有效的固碳途径。

安徽省作为我国南北方过渡带, 省内自然地理条件存在明显差异, 南北地貌类型、土壤类型复杂多样, 而且作为我国华东地区的农业大省和粮食主产省, 其土壤固碳潜力的研究有利于促进我国农业可持续发展和实现双碳目标。已有学者针对该区域 SOC 含量的空间分布格局及影响因素开展了研究, 但这些研究大多集中在小区域尺度上, 且或是按等间距覆土厚度(如 20~40、40~80、80~100 cm) 采样<sup>[18]</sup>, 或是仅采集 0~20 cm 表层土样<sup>[19]</sup>, 这会掩盖剖面发生学特性, 无法真实反映土壤发生层的 SOC 储量、分布特征及其影响因子。因此, 本研究通过覆盖安徽全省的土样采集和室内测定, 运用地统计学方法从土壤剖面发生层的角度探讨 SOC 含量的空间分布格局, 并分析量化影响因素, 以期制定改善土壤健康的策略、准确估算 SOC 储量提供参考依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

安徽省(29°41′~34°38′N、114°54′~119°37′E) 地处长江三角洲腹地, 地跨长江、淮河中下游, 总面积约 13.99 万 km<sup>2</sup>。全省地貌南北迥异、复杂多样, 可分为淮北平原区、江淮丘陵区、皖西大别山区、沿江平原区和皖南山地丘陵区。气候上属暖温带与亚热带的过渡地区, 年平均气温 14~16 °C, 年均降水量 750~1 800 mm, 其中 40%~60%集中于夏季, 年均蒸发量 1 100~2 000 mm。该地区土壤类型主要为水稻土、砂姜黑土、红壤、潮土与黄褐土等<sup>[20]</sup>, 面积均在 10 000 km<sup>2</sup> 以上。

### 1.2 点位布设与土壤样品采集

2021 年 11 月—2022 年 5 月, 在确保样点具有代表性和均匀性的前提下, 充分考虑土壤类型和母质类型等因素, 采用系统布点方法结合判断布点方法进行点位的布设。系统布点中网格的数量等于布点数量, 将采样单元按照不同土壤类型划分成面积相等网格(如水稻土, 4.6 km×4.6 km; 砂姜黑土, 5.1 km×5.1 km; 红壤, 3.7 km×3.7 km; 潮土, 4.8 km×4.8 km; 黄褐土, 4.5 km×4.5 km; 粗骨土, 4.2 km×4.2 km), 每网格内布设 1 个采样点, 共布设 451 个点位(图 1)。

野外实际调查采样时, 到达每个网格预设点位后, 通过实地观察, 确定最具代表性剖面位置, 利用 GPS 定位, 再挖掘标准土壤剖面(图 2, 宽 1.2 m×高 1.2 m), 针对每个剖面, 依据形态特征, 划分表土层(A 层, 耕地和园地的耕作层、林草地的腐殖质层, 平均厚度为 15.17 cm)、心土层(B 层, 物质淋溶淀积层, 平均厚度为 29.10 cm)和母质层(C 层, 发育弱, 保留成土母质特征, 平均厚度为 43.37 cm), 并每层采集农化分析样(1.5 kg)和三个环刀容重样(100 cm<sup>3</sup>)。记录剖面点位的经纬度坐标、成土因素和土壤类型等基本信息。

典型剖面涉及 10 种土壤类型, 主要是水稻土(107 个)、红壤(88 个)、粗骨土(40 个)、黄褐土(34 个)、潮土(33 个)、砂姜黑土(33 个), 合计占总点位数的 74.28%; 土地利用方式主要为园地(25 个)、林地(217 个)、耕地(189 个), 合计占全部点位数的 95.57%。

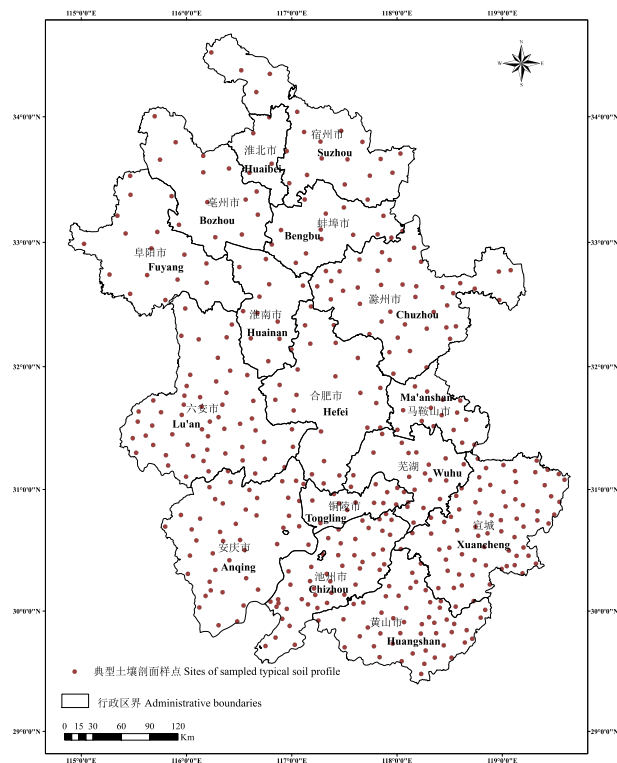


图 1 安徽省典型土壤剖面点分布图

Fig. 1 Sites of sampled typical soil profiles in Anhui Province



注: a)、b)、c) 和 d) 依次为红壤、黄褐土、粗骨土和水稻土剖面。Note: a), b), c), and d) stand for red soil, yellow cinnamon soil, skeletal soil, and paddy soil profiles.

图 2 安徽省典型土壤剖面采样照片

Fig. 2 Typical sampled soil profiles in Anhui Province

### 1.3 测定指标与方法

土壤样品经室内自然风干后, 过 2 mm 筛, 同时剔除根系、枯枝落叶、砾石等杂质, 再分别研磨过 0.25 mm 和 0.15 mm 筛用于测定分析。容重采用环刀法<sup>[21]</sup>测定; pH 采用玻璃电极法<sup>[21]</sup>测定; 颗粒组成采用吸管法 (USDA 制, 砂粒 2.0~0.05 mm、粉粒 0.05~0.002 mm、黏粒 <0.002 mm) 测定; 有机碳采用重铬酸钾容量法<sup>[22]</sup>测定; 阳离子交换量 (CEC) 采用 pH7.0 NH<sub>4</sub>OAc 交换法<sup>[21]</sup>测定。

### 1.4 环境变量

依据相关性和可获得性原则选取环境变量, 在本次研究中, 选取的环境变量主要分为三大类: 气候因子、地形因子以及归一化植被指数 (NDVI)。其中气候因子包括年平均气温、年平均降水量

和干燥度, 前两者来源于中国生态环境背景层面营造项目获取的全国 1 km 范围内的气温和降雨数据, 干燥度根据公式  $K=W_0/R$  计算得出 (式中  $K$  为干燥度;  $W_0$  水面可能蒸发量;  $R$  为同期降水量); 地形因子涵盖了坡向、坡度、高程、平面曲率、剖面曲率及地形湿度指数, 来自地理空间数据云官网 (<https://www.gscloud.cn/>) 下载空间分辨率 90 m 的 SRTM DEM 数据; NDVI 来自 NASA 官网 (<https://modis.gsfc.nasa.gov/>) 下载的近 10 年 MOD13 Q1 数据产品 (时间和空间分辨率为 16 d 和 250 m), 时段选取植物生长处于旺季的 7—10 月, 以更好地揭示植被覆盖度时空变化特征。

### 1.5 数据处理与分析

普通克里格法是一种在土壤属性空间预测中广泛使用的方法, 其核心思想在于利用土壤属性的空间连续性, 通过邻近的相关观测点的权重均值来预测采样点位置的土壤属性值。

随机森林回归模型是一种基于决策树的集成学习算法, 它通过 Bootstrap 重采样技术从原始数据集中抽取多个样本子集, 并利用这些子集构建多个决策树, 进而形成随机森林<sup>[23]</sup>。在进行回归预测时, 该模型通过计算所有决策树预测结果的平均值, 得出最终的预测值。此外, 随机森林回归模型具有对所有协变量进行建模的能力, 并能够评估每个协变量在预测中的重要性。

基于以上优点, 且参照前人<sup>[19]</sup>研究结果, 综合考虑后本研究利用 ArcGIS10.7 软件的 Geostatistical Analyst 模块中的普通克里格空间插值获得 SOC 空间分布特征图, 运用 Python 的 Scikit-learn 扩展包中的随机森林模型回归模块对影响因素进行重要性排序, 发挥各方法所长。

运用地统计学方法对 SOC 含量的空间结构进行分析, 首先运用 GS+9.0 进行半方差函数的计算和最佳模型拟合, 之后利用 ArcGIS10.7 绘制 SOC 空间分布图。采用 Pearson 相关性分析 (Pearson Correlation Analysis) 对 SOC 含量和各个影响因素进行相关性分析, 再基于随机森林模型得到的影响因素重要性排序结果进一步利用 Origin 绘图。

## 2 结果

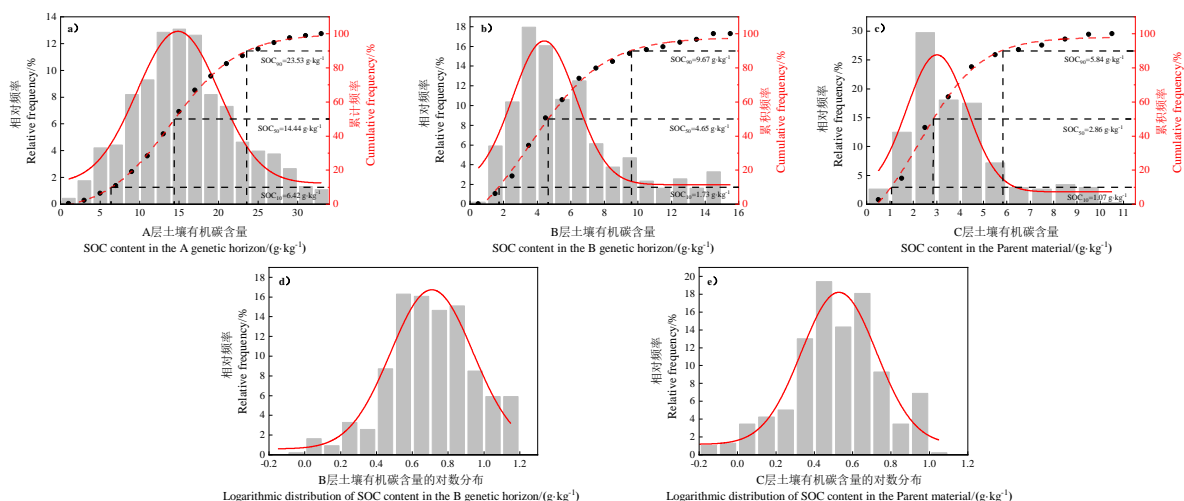
### 2.1 土壤有机碳的垂直分布特征

**2.1.1 不同土壤发生层有机碳分布差异** 土壤各层次的 SOC 描述性统计结果见表 1, 该统计能直接反映 SOC 的基本特征。各土层 SOC 平均含量变化范围为 3.74~15.86 g·kg<sup>-1</sup>, 整个土层的 SOC 均值为 8.47 g·kg<sup>-1</sup>。由 A 到 B, SOC 急剧降低, 降幅为 63.43%; 由 B 到 C, SOC 略有降低, 降低幅度为 35.52%。A 层 SOC 平均含量占整个土层 SOC 的 62.44%, 表聚现象明显。不同土层 SOC 变异系数介于 41.42%~56.21%, 均为中等变异。各层 SOC 偏度介于 0.33~1.13, 均为正偏态分布 (图 3a、图 3b、图 3c), 说明各层土壤内出现不少极值, 这与研究区各层 SOC 的分布范围相距较大的情况相一致。A 层 SOC 通过了 K-S 统计检验, 数据符合正态分布, B、C 层 SOC 经对数转换后呈正态分布 (图 3d、图 3e)。

表 1 安徽省 SOC 含量分层统计特征

Table 1 Statistical characteristics of SOC contents in different horizons in Anhui Province

土壤发生层 Soil genetic horizon	样本数 Sample no.	均值 Mean	最小值 Min	最大值 Max	标准差 Standard deviation	变异系数 CV/%	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis
A 层	451	15.86	1.28	33.18	6.57	41.42	0.33	-0.22
B 层	423	5.80	0.81	14.89	3.26	56.21	1.10	0.73
C 层	376	3.74	0.64	10.27	2.03	54.28	1.13	1.01



注: SOC<sub>10</sub>, 频率为 10%时, 土壤有机碳含量值; SOC<sub>50</sub>, 频率为 50%时, 土壤有机碳含量值; SOC<sub>90</sub>, 频率为 90%时, 土壤有机碳含量值。Note: SOC<sub>10</sub>, values of soil organic carbon content at a frequency of 10 percent; SOC<sub>50</sub>, values of soil organic carbon content at a frequency of 50 percent; SOC<sub>90</sub>, values of soil organic carbon content at a frequency of 90 percent.

图 3 安徽省不同土层 SOC 含量频率分布

Fig. 3 Frequency distribution of SOC contents in different horizons in Anhui province

**2.1.2 不同土地利用方式下的有机碳垂直分布特征** 从研究区主要土地利用方式来看 (表 2), 3 种土地利用方式的 SOC 含量均随土壤深度的加深而减小, A 层 SOC 含量显著高于 B、C 层。不同土地利用方式的 SOC 含量在各发生层存在一定差异, 其中在 A 层中, 耕地 > 林地 > 园地; B、C 层中, 林地 SOC 含量均最高, 为园地的 1.21 倍、1.03 倍和耕地的 1.34 倍、1.22 倍。各土地利用方式下的土壤其 A 层与 B、C 层 SOC 含量也存在一定差异, 其中林地土壤, 从 A 层向下, SOC 含量从 16.01  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  下降至 4.07  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 而耕地土壤, SOC 含量从 A 层的 16.30  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  下降至 C 层的 3.34  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 下降幅度高于其他土地利用方式; 园地土壤, 随着剖面层次加深, 从 A 层的 14.89  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  下降至 C 层的 3.96  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , 整体下降幅度相对最小。

表 2 不同土地利用方式 SOC 含量分层统计特征

Table 2 Statistical characteristics of SOC contents in different horizons under different land use patterns

土壤发生层 Soil genetic horizon	土地利用方式 Land use patterns	样本数 Sample no.	最小值 Min	最大值 Max	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%
			/ ( $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )			
A 层	园地	25	3.25	27.61	14.89±7.06Aa	47.41
	林地	217	1.28	33.18	16.01±7.31Aa	45.66
	耕地	189	4.47	30.80	16.30±5.33Ab	32.70
B 层	园地	24	1.57	13.28	5.54±3.48Cc	62.82
	林地	195	0.81	14.89	6.70±3.62Bb	54.03
	耕地	187	1.22	14.89	4.99±2.63Ba	52.71
C 层	园地	19	1.80	8.19	3.96±1.96Bb	49.49
	林地	173	0.64	9.80	4.07±2.43Ba	59.71
	耕地	170	0.93	10.27	3.34±1.42Cb	42.51

注: 不同大、小写字母分别表示同一土地利用方式不同土壤发生层和同一土壤发生层不同土地利用方式间差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different upper and lower case letters mean significant differences ( $P<0.05$ ) between different soil generation horizons for the same land use and between different land uses for the same soil generation horizons, respectively.

**2.1.3 不同土壤类型下的有机碳垂直分布特征** 从研究区主要土壤类型来看 (表 3), 不同土壤类型各发生层 SOC 含量存在一定差异。A 层中 6 种土壤类型 SOC 含量排序为: 水稻土>红壤>砂姜黑土>潮土>黄褐土>粗骨土, 水稻土 SOC 平均含量最高, 为  $17.87 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ , B 层 6 种土壤类型 SOC 含量具体排序如下: 粗骨土>红壤>砂姜黑土>水稻土>潮土>黄褐土, 其中粗骨土相对最高, 为  $7.16 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; C 层中, 各土壤类型 SOC 含量大小为: 粗骨土>红壤>水稻土>潮土>黄褐土>砂姜黑土, 其中砂姜黑土相对最低, 为  $2.95 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。大体上, 各发生层次中水稻土 SOC 含量相对较高。

表 3 不同土壤类型 SOC 含量分层统计特征

Table 3 Statistical characteristics of SOC contents in different horizons in different soil types

土壤发生层 Soil genetic horizon	土壤类型 Soil types	样本数 Sample no.	最小值 Min	最大值 Max	平均值±标准差 Mean±SD	变异系数 CV/%
			—————/ (g·kg <sup>-1</sup> ) —————			
A 层	水稻土	107	4.70	30.80	17.87±5.18Ac	28.99
	红壤	88	2.09	32.83	15.54±7.04Aa	45.30
	粗骨土	40	2.61	24.94	12.69±5.77Ab	45.47
	黄褐土	34	4.47	23.32	12.77±4.48Ab	35.08
	潮土	33	2.15	27.49	13.36±4.73Ab	35.40
	砂姜黑土	33	7.37	30.04	15.23±4.98Bc	32.70
B 层	水稻土	106	1.22	14.89	5.05±2.93Bd	58.02
	红壤	86	1.04	13.63	5.75±3.21Bd	55.83
	粗骨土	24	1.80	12.35	7.16±2.80Ba	39.11
	黄褐土	34	1.51	7.19	4.11±1.42Bc	34.55
	潮土	32	0.81	9.11	4.38±2.09Bc	47.72
	砂姜黑土	33	2.96	13.46	5.81±2.05Ab	35.28
C 层	水稻土	89	0.93	10.27	3.55±1.55Cb	43.66
	红壤	69	0.70	9.45	3.59±2.06Bb	57.38
	粗骨土	36	0.64	9.51	3.61±2.50Cb	69.25
	黄褐土	32	1.04	7.19	3.24±1.23Cb	37.96
	潮土	29	0.70	7.37	3.39±1.74Ba	51.33
	砂姜黑土	33	1.28	4.87	2.95±0.87Cb	29.49

注: 不同大、小写字母分别表示同一土壤类型不同土壤发生层和同一土壤发生层不同土壤类型间差异显著 ( $P<0.05$ )。Note: Different upper and lower case letters mean significant differences ( $P<0.05$ ) between different soil generation horizons for the same soil type and between different soil types for the same soil generation horizons, respectively.

## 2.2 土壤有机碳的水平分布特征

土壤属性的空间变异受结构性和随机性因素的共同调控。半方差函数模型是地统计学中研究土壤变异性的关键函数, 可用于分析土壤属性的空间变异结构, 为精确克里格插值提供基础。在模型选择时, 应特别注重半方差函数的决定系数  $R^2$  和残差平方和 RSS, 其中  $R^2$  值的增大和 RSS 值的减小均为优选指标。块基比代表变量的空间自相关性, 若块基比  $<0.25$  表示变量具有显著的空间自相关,  $0.25\sim0.75$  表示变量具有中等自相关,  $>0.75$  表示变量自相关程度较弱。

在研究区内, A、B、C 三层 SOC 数据均选择指数模型进行拟合。这些模型的决定系数  $R^2$  分别为 0.35、0.57 和 0.38。尽管这些数值并不高, 但这些模型的残差平方和较小, 故选其作为最优模型。如表 4 所示, A、B、C 三层 SOC 的块基比均小于 0.25, 为显著的空间相关, 说明安徽省 SOC 含量受结构性 (气候、地形、生物和土壤类型等) 影响为主。

为直观地展示安徽省 SOC 的空间分布情况, 在最优半方差模型的基础上利用普通克里格空间插值方法, 绘制 SOC 的空间分布图 (图 4)。依据全国第二次土壤普查有机碳分级标准和图 4 可知 A 层, SOC 含量介于  $11.60\sim17.40 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (3 级) 的区域分布最广; B 层, SOC 介于  $3.50\sim5.80 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (5 级) 的区域分布最广; C 层, SOC 含量  $<3.50 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  (6 级) 的区域分布最广。纵观整个研究区, 不同土层的 SOC 含量在空间上北部低于南部, 尤其是 B、C 土层中呈现明显的自北向南逐渐升高的趋势。

表 4 安徽省 SOC 含量半方差理论模型及其参数

Table 4 Semi-variance theoretical models of SOC content in Anhui Province and its parameters

变量 Variables	最优模型 Optimal model	块金值 C <sub>0</sub>	基台值 C <sub>0</sub> +C	块基比 C <sub>0</sub> / (C+C <sub>0</sub> )	变程 A <sub>0</sub> /m	决定系数 R <sup>2</sup>	残差平方和 RSS
A 层	指数模型	0.0059	0.043	0.14	18000	0.35	5.25 × 10 <sup>-6</sup>
B 层	指数模型	0.039	0.33	0.12	13500	0.57	6.68 × 10 <sup>-4</sup>
C 层	指数模型	0.030	0.30	0.10	12000	0.38	4.74 × 10 <sup>-4</sup>

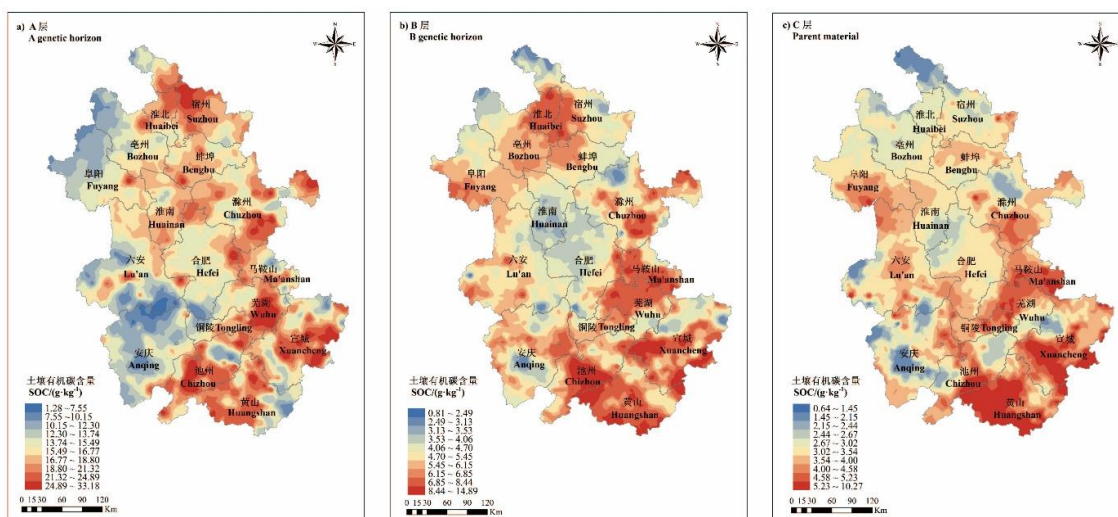
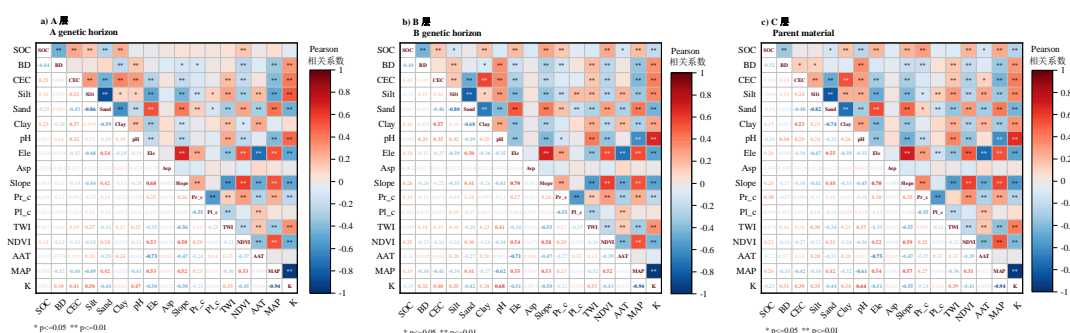


图 4 安徽省不同土层 SOC 含量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of SOC contents in different horizons in Anhui Province

### 2.3 土壤有机碳的影响因素

相关性分析结果 (图 5) 表明, A、B、C 三层 SOC 含量均与黏粒、NDVI 存在极显著 ( $P \leq 0.01$ ) 的正相关关系, 而各层 SOC 与容重之间则呈极显著 ( $P \leq 0.01$ ) 的负相关。同时, A、B 层 SOC 均与 CEC 呈极显著 ( $P \leq 0.01$ ) 正相关, 但 C 层关系复杂。A 层 SOC 除受黏粒含量的影响外, 还与粉粒、砂粒含量具有极显著 ( $P \leq 0.01$ ) 相关关系。B、C 层 SOC 均与地形因子 (剖面曲率、坡度、高程)、气候因素 (年平均温度、年平均降水量、干燥度) 呈相关关系, 此外, B 层 SOC 与粉粒含量呈负相关, C 层 SOC 与砂粒含量和 pH 呈负相关。



注 1: 左下角中的数字表示各变量之间的 Pearson 相关系数, 与右上角的颜色变化呈正比。\*表示在 0.05 级别相关性显著 ( $P \leq 0.05$ ), \*\*表示在 0.01 级别相关性显著 ( $P \leq 0.01$ )。Note 1: The number in the lower left corner indicates the Pearson correlation coefficient between the variables, proportional to the color change in the upper right corner. \* represents a significant correlation at the 0.05 level ( $P \leq 0.05$ ) and \*\* represents a significant correlation at the 0.01 level ( $P \leq 0.01$ ).  
注 2: SOC, 有机碳含量; BD, 容重; CEC, 阳离子交换量; Silt, 粉粒含量; Sand, 砂粒含量; Clay, 黏粒含量; Ele, 高程; Asp, 坡向; Slope, 坡度; Pr\_c, 剖面曲率; Pl\_c, 平面曲率; TWI, 地形湿度指数; NDVI, 归一化植被指数; AAT, 年平均温度; MAP, 年平均降水量; K, 干燥度指数。下同。Note 2: SOC, soil organic carbon content; BD, bulk density; CEC, cation exchange capacity; Silt, silt content; Sand, sand content; Clay, clay content; Ele, elevation; Asp, aspect; Slope, slope gradient; Pr\_c, profile curvature; Pl\_c, planar curvature; TWI, topographic wetness index; NDVI, normalized difference vegetation index; AAT, average annual temperature; MAP, mean annual precipitation; K, dryness index. Same below.



annual precipitation; K, aridity index. The same as below.

图 5 影响因素与各发生层 SOC 含量相关性分析热图

Fig. 5 Heat map of correlation between influencing factors and SOC content in different horizons

利用随机森林回归法进一步分析各影响因素对各层次 SOC 含量的影响, 结果如图 6 所示。不同土层 SOC 含量影响因子存在一定差异: 在 A 层中, 粉粒对 SOC 含量的影响最大, 其次是砂粒、黏粒、地形因子(坡度、坡向)、容重; 黏粒含量对 B 层 SOC 含量的影响最大, 其次是坡度、粉粒、坡向、年平均温度和地形湿度指数; 在 C 层中, 地形湿度指数和质地(黏粒、粉粒)是对 SOC 含量影响最大的因素, 地形因子(坡向、高程)次之, 容重也是影响该层次 SOC 含量的重要因素。

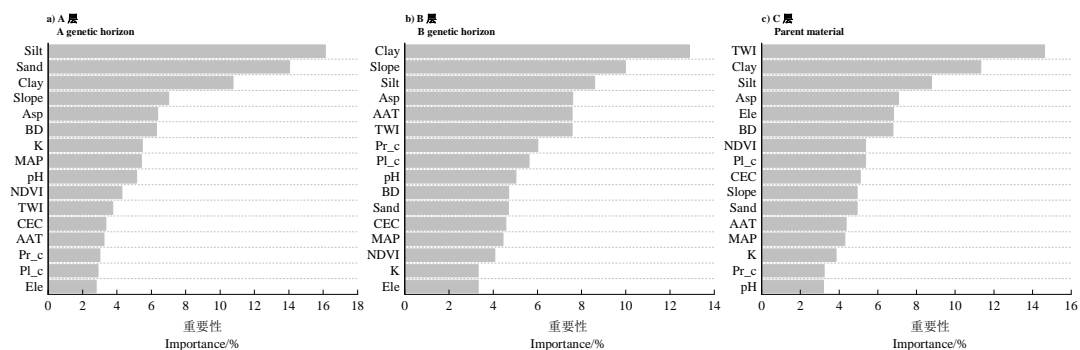


图 6 影响因素对 SOC 含量的重要性排序

Fig. 6 Importance ranking of influencing factors on SOC content

### 3 讨论

#### 3.1 土壤有机碳剖面分异的成因

精确了解安徽省 SOC 含量的空间分布及其影响因素, 有助于制定更为科学合理的土地利用规划, 进而提升安徽省土壤碳汇水平, 有效指导土地资源的可持续管理与利用。依照全国第二次土壤普查 SOC 分级标准, 安徽省地区整个剖面深度 SOC 含量水平处于 4 级(较缺乏), 且在垂直剖面上, SOC 含量自上向下逐渐降低, 且呈现出明显的表聚现象, A 层 SOC 分别是 B 层和 C 层的 2.73 倍和 4.24 倍。这与孟国欣等<sup>[24]</sup>对晋西黄土区蔡家川流域 4 种退耕地的 SOC 含量在剖面上分布研究结论较为一致。主要是因为土壤中, 植被根系以及土壤外源有机物(如秸秆还田(2 090 kg·hm<sup>-2</sup>)<sup>[25]</sup>、农用化肥施用(328.8 kg·hm<sup>-2</sup>)等)主要聚集于表层, 随着土层深度增加, 有机物和植被根系越来越少, 导致 SOC 更易在表层积累。安徽省 A 层 SOC 平均含量(15.86 g·kg<sup>-1</sup>)低于全国 A 层 SOC 含量(22.28 g·kg<sup>-1</sup>)<sup>[26]</sup>, 与 2017 年杨帆等<sup>[27]</sup>计算的安徽省耕层 SOC 平均含量(11.60~17.40 g·kg<sup>-1</sup>)较为一致。而整个剖面 SOC 平均含量(3.74~15.86 g·kg<sup>-1</sup>), 略高于 2010 年石玲和戴万宏<sup>[18]</sup>计算的安徽省不同土壤类型的 SOC 含量(3.31~13.77 g·kg<sup>-1</sup>), 可能是与其样点太少有关(砂姜黑土、潮土、水稻土和红壤 4 种土壤的各 1 个典型剖面)。

#### 3.2 土壤有机碳空间分异的成因

安徽省 SOC 含量具有明显的空间异质性, 各发生层 SOC 含量在水平分布上大体呈现北部低于南部的格局, 这与赵明松等<sup>[20]</sup>对安徽省 SOC 密度的空间分布格局研究一致。A 层 SOC 含量高值主要出现在皖北的宿州市(平均值 16.75 g·kg<sup>-1</sup>)及皖南的池州市、宣城市、黄山市和芜湖市(平均值 17.84 g·kg<sup>-1</sup>), 并有大面积低值区域聚集在安庆市与六安市的交界处(平均值 12.76 g·kg<sup>-1</sup>); B 层 SOC 高值集中于皖北的淮北市(平均值 8.87 g·kg<sup>-1</sup>)与皖南的池州市、黄山市、宣城市、芜湖市和马鞍山市(平均值 6.29 g·kg<sup>-1</sup>); C 层 SOC 高值积聚在皖南的黄山市、宣城市和马鞍山市(平均值 5.02 g·kg<sup>-1</sup>)。出现这种分布格局, 一部分原因是受安徽省地势东南部高西北部低(皖南山区最高, 淮北平原最低)的影响, 皖南山区植被生长茂盛, 高海拔和亚热带湿润季风气候使微生物分解和腐

殖质转化速度降低,提高了 SOC 含量的储存;而淮北平原地处暖温带半湿润季风气候,植被覆盖率相对较低,年均降雨量小于 900 mm,导致 SOC 含量相对较低。另一部分原因与选取样点处的土地利用方式相关,皖南山区的土壤多为林地(占采样点位 67.42%),其土壤结构相对稳定 SOC 不易流失,这与本研究对不同土地利用方式 SOC 含量的研究结果相吻合。此外,宿州市出现部分高值可能是与肥料使用相关,皖北地区地处淮北平原,土壤初始 SOC 含量较低,人们投入更多的肥料(约 29.70 万 t,省内第 3)用来提高生产产量,同时导致作物秸秆和根系有机物含量增高,有利于 SOC 含量的积累。安庆市与六安市交界处 SOC 含量值较低可能是由于采样点表层土壤砂粒含量较高(砂质壤土和砂土占采样点位的 48.00%),不利于有机碳的累积。

### 3.3 土壤有机碳空间分布影响因素

SOC 空间分布特征受多种因素共同控制,本研究利用 SOC 含量与气候因子、地形因子、归一化植被指数、土壤理化性质(容重、砂粒、黏粒、粉粒、pH、CEC)的相关系数矩阵图(图 5)和重要性排序结果(图 6)综合分析安徽省 SOC 空间分异的影响因素。结果表明,土壤颗粒组成(黏、粉、砂粒含量)是驱动研究区土壤有机碳空间分布特征的主要因子,以往的研究发现, SOC 含量增加趋势与黏粒含量变化趋势相同,黏粒含量有利于提高土壤水分的蓄持能力和减缓 SOC 的分解速度<sup>[28]</sup>。同样,贾海霞等<sup>[29]</sup>以新疆焉耆盆地绿洲区丝路重镇土样为研究对象,发现粉砂质壤土中碳含量增加大于壤土和砂质壤土。这主要是由于砂粒含量会增大土壤孔隙度、增强土壤通气性、使有机碳更易矿化,而黏粒含量增加则有利于土壤团聚体的形成,对土壤 SOC 起到保护作用<sup>[30]</sup>,这与本研究结果一致。但在较小的尺度上,马渝欣等<sup>[19]</sup>发现蒙城县内 SOC 空间变异的主要影响因素为粉粒和砂粒含量,与黏粒无关,原因可能在于当地以黏质砂姜黑土为主,黏粒含量空间变异低于粉粒和砂粒。地形通过控制降水、水流路径和侵蚀影响土壤 SOC 的空间分布<sup>[31]</sup>,研究区内地形因子(地形湿度指数、坡度、坡向)对土壤剖面各土层 SOC 含量空间分异解释程度较高,与已有大尺度研究结果具有一定的相似性<sup>[26]</sup>。土壤容重与各发生层 SOC 含量之间呈极显著的负相关,有机碳含量高的土壤,一般有利于团聚体的形成,土壤更为疏松多孔。通常情况下,容重随土层深度的加深而增大,而 SOC 含量随土壤深度的增加而减少。秦岭太白山<sup>[32]</sup>、东北地区<sup>[33]</sup>、川西高原<sup>[34]</sup>等地研究均发现土壤容重与 SOC 含量密切相关。此外,依据表 2 和表 3 可知,不同土地利用方式和土壤类型之间 SOC 含量也存在一定差异,可能是因为土壤有机质和理化性质随土地利用方式的变化而变化,林地土壤结构相对稳定且受人为扰动少导致 SOC 不易流失;成土母质和植被类型通过影响土壤类型进而致使 SOC 含量存在差异<sup>[35-36]</sup>。

### 3.4 土壤有机碳含量变化

由于研究区内土壤剖面发生层的 SOC 含量主要赋存于 A 层,故针对 A 层 SOC 含量进行变化分析。A 层 SOC 平均含量( $15.86 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ )与全国第二次土壤普查(1980s)期间安徽省耕层 SOC 的平均含量  $9.34 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  相比,呈现出显著的增加趋势,增长率高达 69.81%。同时,与杨帆等<sup>[27]</sup>基于 2005—2014 年测土配方施肥数据获得的安徽省耕层 SOC 平均含量  $12.55 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$  相比,提高了 26.37%。综上所述,自第二次土壤普查以来,安徽省表层 SOC 含量表现出持续增加的趋势,可能是因为安徽省积极推行秸秆还田政策,据统计 2016—2018 年安徽省三大粮食作物秸秆总量超过 4 000 万 t<sup>[37]</sup>,政府严禁焚烧秸秆,大部分作物的留茬在机械收割过程中被打碎并直接还田<sup>[20]</sup>,从而有效地提升了土壤有机质含量;另一方面,化肥的大量使用也为土壤提供了丰富的碳源,据《安徽统计年鉴》,1980—2021 年,安徽省农用化肥施用量(氮肥、磷肥等)呈现出显著的上升趋势,由原先的  $70.97 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  攀升至  $328.76 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;还可能与机械耕种和收割面积的扩大有关,随着农业机械化进程的推进,全省机械耕作面积从  $1.04\times 10^4 \text{ km}^2$  增加至  $7.65\times 10^4 \text{ km}^2$ ,机械收割面积亦从  $0.06\times 10^4 \text{ km}^2$  跃升至  $7.31\times 10^4 \text{ km}^2$ ,在一定程度上改善了土壤的通气性和水分状况,进而有利于 SOC 的积累和保存。

需要指出的是:一是 SOC 含量与影响因子之间的关系错综复杂,本研究揭示了气候、地形和土壤属性对 SOC 的影响,表明各个影响因子之间相互影响、共同作用导致了 SOC 空间的变异性。

但翻耕、灌溉、施肥、机械压实等人为因素也深刻影响着 SOC 空间变异性；二是 SOC 研究的另外一个重要指标是 1 m 土体有机碳储量的估算，上述两个方面将是今后研究中关注的内容。

## 4 结论

对安徽省 451 个典型土壤剖面分层 SOC 含量分析表明，剖面 SOC 平均含量为  $8.47 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，SOC 含量随土壤剖面层次的加深而下降（A 层>B 层>C 层），且表现出明显的表聚现象，均具有中等空间变异。不同土层 SOC 含量在空间分布上均大体呈现由北向南递增的特征，影响 SOC 空间变异 A 层为土壤粉、砂、黏粒含量和容重，B 层为地形因子（坡度、坡向）和土壤颗粒组成，C 层为土壤黏粒、粉粒含量、地形因子（地形湿度指数、坡向）和容重。土壤颗粒组成是驱动 SOC 空间分布特征的主要因子，但地形因子和土壤容重也有一定影响。

### 参考文献 (References)

- [1] Diffenbaugh N S, Field C B. Changes in ecologically critical terrestrial climate conditions[J]. *Science*, 2013, 341(6145): 486-492.
- [2] Lin Z B, Zhang R D. Dynamics of soil organic carbon under uncertain climate change and elevated atmospheric CO<sub>2</sub>[J]. *Pedosphere*, 2012, 22(4): 489-496.
- [3] Soil carbon unearthed[J]. *Nature Geoscience*, 2020, 13(8): 523.
- [4] Wei Y, Córdoba P, Caramanna G, et al. Influence of a CO<sub>2</sub> long term exposure on the mobilisation and speciation of metals in soils[J]. *Geochemistry*, 2015, 75(4): 475-482.
- [5] Scharlemann J P, Tanner E V, Hiederer R, et al. Global soil carbon: Understanding and managing the largest terrestrial carbon pool[J]. *Carbon Management*, 2014, 5(1): 81-91.
- [6] Ma H H, Peng M, Yang Z, et al. Spatial distribution and driving factors of soil organic carbon in the Northeast China Plain: Insights from latest monitoring data[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 911: 168602.
- [7] Song W, Li J Y, Li X J, et al. Effects of land reclamation on soil organic carbon and its components in reclaimed coal mining subsidence areas[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 908: 168523.
- [8] Jing Y P, Gao R P, Chen Y H, et al. Distribution characteristics of organic carbon and microbial carbon in saline-alkali soil in the Hetao Plain[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022(10): 11-19. [景宇鹏, 高日平, 陈玉海, 等. 河套平原盐碱化土壤有机碳及微生物量碳剖面分布特征[J]. *中国土壤与肥料*, 2022(10): 11-19.]
- [9] Qiu X X, Cao G C, Zhang Z, et al. Vertical distribution characteristics of soil organic carbon and total nitrogen density in alpine farmland and their relationships with altitude[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(3): 623-630. [邱巡巡, 曹广超, 张卓, 等. 高寒农田土壤有机碳和全氮密度垂直分布特征及其与海拔的关系[J]. *土壤通报*, 2022, 53(3): 623-630.]
- [10] Wang Y L, Zi H B, Cheng R X, et al. Forest soil organic carbon and nitrogen storage and characteristics of vertical distribution in Qinghai Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(11): 4096-4105. [王艳丽, 字洪标, 程瑞希, 等. 青海省森林土壤有机碳氮储量及其垂直分布特征[J]. *生态学报*, 2019, 39(11): 4096-4105.]
- [11] Kölbl A, Schad P, Jahn R, et al. Accelerated soil formation due to paddy management on marshlands (Zhejiang Province, China)[J]. *Geoderma*, 2014, 228/229: 67-89.
- [12] Wang S Q, Liu J Y, Yu G R. Error analysis of estimating terrestrial soil organic carbon storage in China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(5): 797-802. [王绍强, 刘纪远, 于贵瑞. 中国陆地土壤有机碳蓄积量估算误差分析[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(5): 797-802.]
- [13] Zheng L, Han X Z, Hao X X, et al. Influences of methods of sampling and calculation on soil organic carbon density in soil profiles of Mollisols[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2015, 34(9): 2583-2589. [郑琳, 韩晓增, 郝翔翔, 等. 取样和计算方法对黑土剖面土壤有机碳密度的影响[J]. *生态学杂志*, 2015, 34(9): 2583-2589.]
- [14] Li A W, Ran M, Song L Y, et al. Spatial distribution characteristics and influencing factors of cropland topsoil organic carbon content in the Sichuan Basin[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(5): 1102-1112. [李艾雯,

冉敏, 宋靛颖, 等. 四川盆地耕地表层土壤有机碳含量空间分布特征及其影响因素[J]. 长江流域资源与环境, 2023, 32(5): 1102-1112.]

[15] Mishra U, Hugelius G, Shelef E, et al. Spatial heterogeneity and environmental predictors of permafrost region soil organic carbon stocks[J]. Science Advances, 2021, 7(9): eaaz5236.

[16] Chen Y J, Fang K, Qin S Q, et al. Spatial patterns and determinants of soil organic carbon component contents and decomposition rate in temperate grasslands of Nei Mongol, China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2023, 47(9): 1245-1255. [陈颖洁, 房凯, 秦书琪, 等. 内蒙古温带草地土壤有机碳组分含量和分解速率的空间格局及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2023, 47(9): 1245-1255.]

[17] Yang R M, Zhang G L, Yang F, et al. Precise estimation of soil organic carbon stocks in the northeast Tibetan Plateau[J]. Scientific Reports, 2016, 6: 21842.

[18] Shi L, Dai W H. Soil organic carbon and its fraction in Anhui Province[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2010, 30(2): 145-149. [石玲, 戴万宏. 安徽省几种主要土壤有机碳含量及其组分研究[J]. 水土保持通报, 2010, 30(2): 145-149.]

[19] Ma Y X, Li X S, Li D C, et al. Spatial variation of soil organic carbon content in farmland and its influencing factors in Mengcheng County, northern Anhui Plain[J]. Acta Pedologica Sinica, 2014, 51(5): 1153-1159. [马渝欣, 李徐生, 李德成, 等. 皖北平原蒙城县农田土壤有机碳空间变异及影响因素[J]. 土壤学报, 2014, 51(5): 1153-1159.]

[20] Zhao M S, Li D C, Wang S H. Variation of soil organic carbon in farmland of Anhui and its influencing factors in the 30 years from 1980 to 2010[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(3): 595-605. [赵明松, 李德成, 王世航. 近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, 55(3): 595-605.]

[21] Bao S D. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000. [鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000.]

[22] Zhang G L, Gong Z T. Soil survey laboratory methods[M]. Beijing: Science Press, 2012. [张甘霖, 龚子同. 土壤调查实验室分析方法[M]. 北京: 科学出版社, 2012.]

[23] Yuan Y Q, Chen H Y, Zhang L M, et al. Prediction of spatial distribution of soil organic carbon in farmland based on multi-variables and random forest algorithm—A case study of a subtropical complex geomorphic region in Fujian as an example[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(4): 887-899. [袁玉琦, 陈瀚阅, 张黎明, 等. 基于多变量与 RF 算法的耕地土壤有机碳空间预测研究——以福建亚热带复杂地貌区为例[J]. 土壤学报, 2021, 58(4): 887-899.]

[24] Meng G X, Zha T G, Zhang X X, et al. Effects of vegetation type and terrain on vertical distribution of soil organic carbon on abandoned farmlands in the Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Ecology, 2017, 36(9): 2447-2454. [孟国欣, 查同刚, 张晓霞, 等. 植被类型和地形对黄土区退耕地土壤有机碳垂直分布的影响[J]. 生态学杂志, 2017, 36(9): 2447-2454.]

[25] Li L H, Chang Z Q. Application status and suggestions of mechanized straw returning technology in Anhui Province[J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2017, 23(S1): 76-79. [李林鹤, 常志强. 安徽省秸秆机械化还田技术应用现状及建议[J]. 安徽农学通报, 2017, 23(S1): 76-79.]

[26] Luo M, Guo L, Zhang H T, et al. Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 48-59. [罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 48-59.]

[27] Yang F, Xu Y, Cui Y, et al. Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades[J]. Acta Pedologica Sinica, 2017, 54(5): 1047-1056. [杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. 土壤学报, 2017, 54(5): 1047-1056.]

[28] Xu L, He N P, Yu G R, et al. Differences in pedotransfer functions of bulk density lead to high uncertainty in soil organic carbon estimation at regional scales: Evidence from Chinese terrestrial ecosystems[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2015, 120(8): 1567-1575.

[29] Jia H X, Wang X, Li J, et al. Dynamic simulation of soil organic carbon storage in farmland of the Yanqi Basin Oasis area, in Xinjiang Province[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(14): 5106-5116. [贾海霞, 汪霞, 李佳, 等. 新疆焉耆盆地绿洲区农田土壤有机碳储量动态模拟[J]. 生态学报, 2019, 39(14): 5106-5116.]

- [30] 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. [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: 中英文*, 2022, 20(3): 142-150.]
- [31] Wiesmeier M, Urbanski L, Hobbey E, et al. Soil organic carbon storage as a key function of soils - A review of drivers and indicators at various scales[J]. *Geoderma*, 2019, 333: 149-162.
- [32] Chen X, Zhang Y J, Zou J L, et al. Distribution characteristics of forest surface soil organic carbon in Taibai Mountains of Qinling[J]. *Journal of Forest and Environment*, 2022, 42(3): 244-252. [陈曦, 张彦军, 邹俊亮, 等. 秦岭太白山森林表层土壤有机碳分布特征[J]. *森林与环境学报*, 2022, 42(3): 244-252.]
- [33] Li M, Han X Z, Du S L, et al. Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China[J]. *Catena*, 2019, 174: 285-292.
- [34] Chen L S, Huang X Y, Xue D, et al. Distribution characteristics of soil organic carbon and its influencing factors in the peatlands of Western Sichuan Plateau, China[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 2022, 28(2): 267-275. [陈良帅, 黄新亚, 薛丹, 等. 川西高原泥炭沼泽土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. *应用与环境生物学报*, 2022, 28(2): 267-275.]
- [35] Zhao M S, Zhang G L, Wang D C, et al. Spatial variability of soil organic matter and its dominating factors in Xu-Huai Alluvial Plain[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50(1): 1-11. [赵明松, 张甘霖, 王德彩, 等. 徐淮黄泛平原土壤有机质空间变异特征及主控因素分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50(1): 1-11.]
- [36] Xie X L, Sun B, Zhou H Z, et al. Soil carbon stocks and their influencing factors under native vegetations in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2004, 41(5): 687-699. [解宪丽, 孙波, 周慧珍, 等. 不同植被下中国土壤有机碳的储量与影响因子[J]. *土壤学报*, 2004, 41(5): 687-699.]
- [37] Chai R S, Xu Y, Cheng Q P, et al. Nutrient resource quantity of main crop straw and utilization potential under straw returning in Anhui Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(1): 95-109. [柴如山, 徐悦, 程启鹏, 等. 安徽省主要作物秸秆养分资源量及还田利用潜力[J]. *中国农业科学*, 2021, 54(1): 95-109.]

(责任编辑: 檀满枝)