

DOI: 10.11766/trxb202201290041

赵彦锋, 李怡欣, 马盼盼, 陈杰, 李元元, 杨琼, 程道全. 近 30 年河南省耕地土壤有机碳的三维变化与关键因素研究[J]. 土壤学报, 2023, 60(5): 1409–1420.

ZHAO Yanfeng, LI Yixin, MA Panpan, CHEN Jie, LI Yuanyuan, YANG Qiong, CHENG Daoquan. Three Dimensional Changes of Soil Organic Carbon Content and Its Key Factors in Cultivated Soils of Henan Province During the Recent 30 Years[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(5): 1409–1420.

近 30 年河南省耕地土壤有机碳的三维变化与关键因素研究*

赵彦锋¹, 李怡欣¹, 马盼盼¹, 陈杰¹, 李元元¹, 杨琼¹, 程道全²

(1. 郑州大学农学院, 郑州 450001; 2. 河南省土壤肥料站, 郑州 450002)

摘要: 详细的土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 时空变化信息是评估土壤固碳能力的基础。但多数研究聚焦耕层 SOC, 对深层 SOC 变化的敏感区域、深度区间和关键因素理解不足。基于 1982 和 2010 两期土壤调查数据, 以分位数随机森林构建环境协变量与 SOC 关系模型, 研究了 1982—2010 河南耕地土壤 0~15 cm、15~30 cm、30~60 cm 和 60~100 cm 的 SOC 变化。研究表明 0~15 cm 土层 SOC 增长主要发生在平原和盆地, 增幅为 2~4 g·kg⁻¹; 15~30 cm 土层 SOC 增长主要发生在沿黄河潮土区和褐土、水稻土的零星地区, 增幅为 0~2 g·kg⁻¹; 30 cm 以下土层 SOC 变化的概率较低; 总体上, 生物气候因素对 SOC 变化的影响较土壤质地和 pH 更大。28 年间 1 m 土体 SOC 储量增长 7.04%、年均增长率为 2.43‰; 随着 SOC 增加和全球变暖, 下阶段 SOC 增速较难实现第 21 届联合国气候变化峰会 (the 21st Conference of the Parties, COP21) 倡导的 4‰ 目标。

关键词: 土壤有机碳; 三维; 时空变化; 分位数随机森林; 关键因素

中图分类号: S159; P934 **文献标志码:** A

Three Dimensional Changes of Soil Organic Carbon Content and Its Key Factors in Cultivated Soils of Henan Province During the Recent 30 Years

ZHAO Yanfeng¹, LI Yixin¹, MA Panpan¹, CHEN Jie¹, LI Yuanyuan¹, YANG Qiong¹, CHENG Daoquan²

(1. School of Agricultural Science, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2 Henan Provincial Station of Soil and Fertilizer, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: [Objective] The information of temporal-spatial variation of soil organic carbon content (SOC) with high resolution and high precision is the base for assessing the capability of soil in sequestering carbon. Though there has been much research on the changes in topsoil SOC, research on SOC of deeper soil layers is still rare. To reduce the gaps in understanding of the ability of deep soil to sequester carbon, our research sought to investigate the sensitive area where SOC had changed significantly, the

* 国家重点研发计划项目 (2021YFD1700900) 和河南省玉米产业技术体系项目 (S2010-02-G07) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program (No. 2021YFD1700900) and Technical System of Maize Industry in Henan Province (No. S2010-02-G07)

作者简介: 赵彦锋 (1977—), 男, 河南洛阳人, 博士, 副教授, 主要研究方向: 土壤地理与环境。E-mail: yfzhao@zzu.edu.cn

收稿日期: 2022-01-29; 收到修改稿日期: 2022-10-20; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2023-01-04

depth where SOC had changed significantly, and the factors that drive SOC change. Thus, research on the temporal-spatial changes of SOC of 0–15 cm, 15–30 cm, 30–60 cm and 60–100 cm of cultivated land in Henan, China from 1982–2010 was conducted and the SOC accumulation rate in this area was compared with that of the COP21 target. 【 Method 】The legacy soil data that was collected from the second national soil survey carried out in 1982 and the recent topsoil data and soil profile data that were sampled in 2010 were used in this research. Digital soil mapping technology with the aid of a quantile random forest algorithm (QRF) and 26 environmental covariates was used to produce SOC maps. For every soil layer in both 1982 and 2010, 500 SOC distributions with equal probability were produced by QRF, and then the SOC map pools for both 1982 and 2010 were derived. Then, stochastic sampling with replacement was repeated 1 000 times from both SOC map pools, respectively, and each time, a subtraction of the two SOC maps was performed to get a SOC change map. So, 1 000 SOC change maps with equal probability were got and based on that the uncertainties of SOC change were assessed. Only those SOC changes with a probability above 0.66 were received as significant results and were used to calculate SOC storage change in the next step. To better understand the mechanism of SOC change, SOC changes among soil types were compared, and the Pearson correlation coefficient between SOC change and primitive SOC content, some climate variables, crop yields, straw returning amount, soil texture, and soil pH were analyzed. 【 Result 】It was revealed that the significant increase of SOC in 0–15 cm, with a magnitude of 2–4 g·kg⁻¹, had taken place across the plain and basin regions of Henan Province. Nevertheless, the increase of SOC in 15–30 cm soil layers with a magnitude of 0–2 g·kg⁻¹ mainly took place in the Fluvo-aquic soils that were distributed alongside the Huang River and scattered to the Cinnamon soils and Paddy soils. The changes of SOC in soil layers below the 30 cm depth were low in probability. Overall, the total storage of SOC in 0–1 m depth of soils across the cultivated land of Henan Province increased by 7.04% in the past 28 years with a mean annual rate of 2.43%, which was far from the expected value of COP21 4%. It was also found that the effects of bio-climate variables were more important than soil variables in SOC change. Except for single-cropping rice areas with a fallow period every year, SOC significantly or extremely significantly correlated with biomass input. The mean annual temperature range (the difference between the mean hottest month temperature and the mean coldest month temperature) was positively correlated with SOC accumulation, while climate warming had a negative effect on it. Probably due to the differences in the environment and soil properties, the relationships between SOC change and soil texture, between SOC change and soil pH in different soil types were high variable. The initial SOC values were negatively correlated with SOC change in 0–15 cm in two of five soil categories, so was that in 15–30 cm in all the five soil categories, which may be implied a slowing rate for the SOC accumulation in the future. 【 Conclusion 】The SOC accumulating rate in Henan Province will be difficult to meet the object of COP21 in the future. Thus, it is suggested not to overestimate the effects of agricultural soil on carbon sequestering and much attention should be paid to reducing net carbon emission.

Key words: Soil organic carbon; Three dimensions; Temporal and spatial variation; Quantile random forest; Key factors

土壤有机碳 (Soil organic carbon, SOC) 库是陆地生态系统的最大碳库, 其微小变化能显著影响大气二氧化碳浓度。2015 年第 21 届联合国气候变化峰会 (the 21st Conference of the Parties, COP21) 提出 4% 计划得到超过 150 个国家响应。该计划明确以 0~2 m 土体 2 400 亿 t SOC 储量计, 全球 SOC 以 4% 年速率增长可以抵消全球每年人为排放的 8.9 亿 t 温室气体量, 能有效抑制全球变暖^[1]。但全球土壤中能通过管理措施对 SOC 变化施加积极影响的主要是农业土壤^[1]; 尽管如此, 管理得当仍可能使全球农业土壤在近 20 年内抵消 20%~35% 的碳

排放^[1]。然而, 由于土壤固碳潜力与影响因素的时空复杂性, 上述估测精度远远不够。长期试验表明在大量添加有机肥、秸秆还田和减免耕措施下只有砂土和粉砂土能在全剖面实现 SOC 年增长 4%, 而有机质丰富的土壤只有表层能实现该目标^[2]。据对 20 个国家和地区的分析, Minasny 等^[1]认为在最好的管理措施下, 初始 SOC 低于 10 g·kg⁻¹ 的农业土壤在未来 20 年甚至能以年均 1% 的速度增长; 而初始 SOC 含量高者则不会有预期增速。我国除东北黑土区和青藏高原外, 当前多数地区 SOC 呈增长趋势, 但增速时空变异较大^[3-16]; 且以往研究主要关注耕

层,对耕层以下 SOC 的时空变化研究较少。在产量不断攀升条件下,仅根系量的增长就能为土壤提供持续碳源^[3,14];而小麦、玉米根系可达 1~2 m 深度,20~100 cm 以内 SOC 均有增加可能性^[17-19]。因此,有必要提供三维的、空间明晰的耕地 SOC 变化以增进对农业土壤固碳潜力的认识。

当前,对于土壤发育时间短、初始碳含量低,但近 30 年来产量不断攀升的黄淮海农业区的三维 SOC 变化还研究不足,其主要限制在土壤剖面样本数量:自 20 世纪 80 年代全国第二次土壤普查以来,只在“我国土系调查与《中国土系志》编制”项目支撑下进行了 2010s 省级和国家尺度的土壤剖面调查,所得剖面相对较少^[20];由于不同时期采样位置和采样数差异,以上述数据研究 SOC 时空变化可能使结果产生较大不确定性;但除此以外,多数地区没有其他数据能说明该阶段 SOC 三维变化。本研究采用最新的数字土壤制图方法以部分补偿样点稀疏的影响^[21],通过不确定性分析辅助判断 SOC 时空变化。

河南省粮食产量占我国 10.6%^[22],农业土壤面积占黄淮海平原的 1/4,其 SOC 变化同时具有重要的生态和生产意义。本文以河南省为例,对不同深度土层 SOC 变化进行研究,并探讨生物气候、土壤性质等对其影响,以增进对区域 SOC 变化的理解。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

河南省面积 $16.7 \times 10^4 \text{ km}^2$,海拔 23~2 387 m,山地、平原分别占 44%和 56% (图 1a);自北向南由温带过渡至亚热带,年均降雨量 500~1 200 mm,年均温 12.0~15.5℃。其东部温带平原和西南盆地以潮土、砂姜黑土为主,西部山地丘陵主要分布褐土、黄褐土,均为小麦-玉米轮作。淮河南部亚热带以水稻土为主,并进一步区分为稻-麦轮作(沿淮低地起伏平原)和单季稻(靠近南部省界山区),下文分别以水稻土 A 和 水稻土 B 表示(图 1b)。

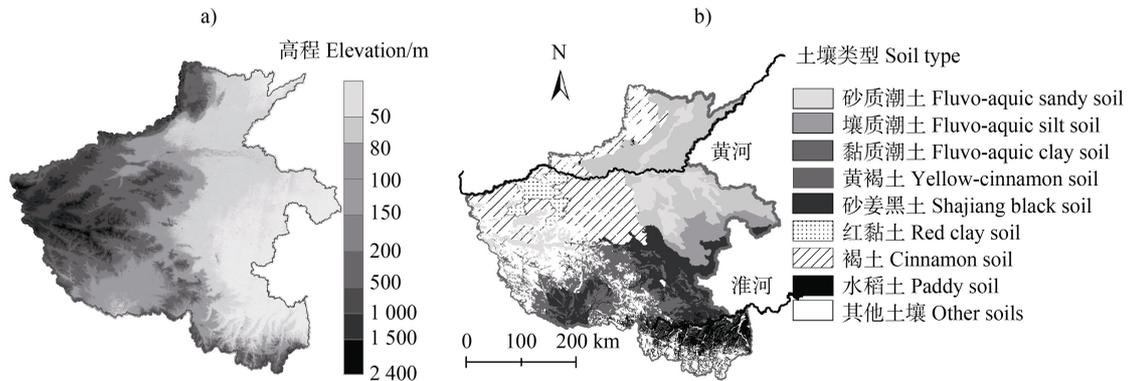


图 1 河南省高程 (a) 和土壤类型 (b) 分布图

Fig. 1 Elevation map (a) and soil type map (b) of Henan Province

1.2 SOC 数据

(1)从 1982—1983 年第二次土壤普查时期各县土种志和相关专著^[23-24]共筛选 2 979 个耕地土壤剖面,将按发生层描述的有机质 (%)乘以 5.8,并按照等积样条函数处理为 0~15 cm、15~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 标准深度 SOC ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)^[25];由于部分土壤未采到 1 m 深度,各土层样本数实际为 2 979、2 979、2 929、2 776。(2)从河南耕地地力评价数据库中筛选出 2010—2012 年 13 372 个 0~15 cm 土壤耕层有机质数据,转化为 SOC 值。(3)2010—2012 年新调查 187 个耕地土壤剖面(其

中 168 个见《中国土系志河南卷》)^[20],将其 SOC 值转换为上述深度区间的 SOC。(1)~(3)分别标记为 SOC_{1982} , $\text{SOC}_{2010\text{top}}$, SOC_{2010} 。样点分布见图 2。

1.3 环境变量

根据数字土壤制图的 SCORPAN 范式^[21],选择包括生物、气候、地形、土壤 4 类共 26 个指标作为预测 SOC 的协变量。其中,归一化植被指数 (NDVI)采用全球库存监控和建模系统 (Global Inventory Monitoring and Modeling System) (<https://gimms.gsfc.nasa.gov/MODIS/>) 的 1982—1984 年数据和地

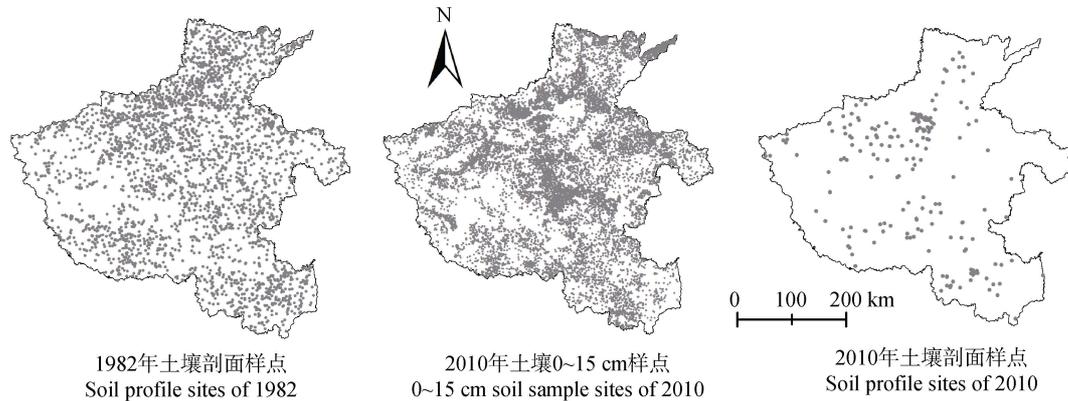


图2 土壤采样点分布
Fig. 2 Soil sample sites

理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/sources/>) 的 2010—2012 年数据; NPP 数据源自全球变化科学数据出版系统^[26]; 从中国地面气候标准值年值数据集 (<http://data.cma.cn/data/cdcdetail/dataCode/>) 提取 1980—2010 年均干燥度、蒸发、降雨量、>0 °C 积温、年均温、气温年较差。

地形变量从自动化地球科学分析系统 (SAGA GIS) (<http://www.saga-gis.org>) 提取 ASTER GDEM 30 m 生成, 包括高程、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、地形湿度、物质平衡指数、风暴露指数、多分辨率分水岭平坦度指数、多分辨率谷底平坦度指数、地形粗糙度、排水网基准高度、与最近排水网垂直距离。

土壤变量包括 1:20 万土壤类型、母质、土体构型图斑^[27]、黏粒 (<0.002 mm) 和粉粒 (0.002~0.05 mm) 含量 (经等积样条函数转化为相应深度土层数据后执行 Kriging 插值, 各土层黏粒、粉粒预测值与实测值 R^2 达 0.36~0.42 和 0.24~0.32, 极显著相关)。以上数据统一重采样为公里网格, 作为预测 SOC 的环境协变量。

以下数据用于分析 1982—2010 年的 SOC 变化, 但未参与 SOC 预测, 包括: (1) 1980—2010 年均气温变化, 从中国平均水热条件变化公里网格数据集 (1951—2010 年) 提取^[28]。(2) 2010—2012 年土壤 0~15 cm 采样点对应的产量、秸秆还田量、灌溉指数 (用灌溉保证百分率表示) (源自河南省耕地地力评价数据库, 系各县基层农技人员调查获取, 随土壤采样信息一起上报)。(3) 2010 年土壤 pH (15 cm 以下土壤 pH 以表层 pH 和环境协变量联合

预测, R^2 达 0.72~0.98, 详见文献^[29])。

1.4 SOC 时空变化分析

采用分位数随机森林 (Quantile Random Forest, QRF) 预测 SOC 及其变化^[30]。其原理为: 通过样本训练构建大量协变量与预测变量的回归树模型, 每个树模型预测出特定情境 (环境协变量随机组合) 下的一个 SOC 值, 大量随机树模型运算得到若干等概率结果。每个位置 2010 年所有 SOC 可能值与 1982 年所有 SOC 可能值随机抽样相减获得一次 SOC 变化的估计; 根据蒙特卡洛模拟原理, 基于足够多的随机抽样可对 SOC 变化概率和变化值进行估计。具体步骤如下:

(1) 各层均按 SOC 值排列数据, 分组随机抽取其中 20% 数据构建验证集, 其余数据参与建模。

(2) 1982 年和 2010 年 0~15 cm 土层 SOC 预测。调用软件 R4.0.3 的 quantreg 工具包执行 QRF^[31], 按 0.002 的间隔, 分别得到每个公里网格对应累积概率 0.002~1.0 的 1982 年和 2010 年 SOC 含量各 500 次, 各取其 500 次均值为预测值。

(3) 1982 年和 2010 年 15 cm 以下土层 SOC 预测。由于表层土壤往往和深层土壤 SOC 具有密切关系, 且通常表层 SOC 又能取得较高预测精度^[32], 因此将 0~15 cm SOC 预测结果加入深层 SOC 预测的协变量集合, 采用与 (1)-(2) 相同方法得到结果; 增加该步骤可充分利用 2010 年表层土壤样本数量较多的优势, 明显削减了该期土壤剖面样点不足对深层 SOC 预测的限制 (模型对 15~30 cm、30~60 cm、60~100 cm 检验数据的方差解释比分别从 0.11、0.12、0.25 提高至 0.41、0.19、0.27)。

(4) 结果检验。检验参数包括平均误差 (ME)、均方根误差 (RMSE)、模型对原始数据方差解释比 (Explainable Variance, 简称为 VE):

$$VE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (O_i - M_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (1)$$

林氏系数 ρ_c 为^[33]:

$$\rho_c = \frac{2R\sigma_0\sigma_M}{\sigma_0^2 + \sigma_M^2 + (\bar{O} - \bar{M})^2} \quad (2)$$

式中, O_i 、 \bar{O} 、 M_i 、 \bar{M} 分别为观测值、观测值均值、预测值、预测值均值, σ_0 、 σ_M 分别为观测值和预测值的标准差, n 为样本数, R 为观测值和预测值的 Pearson 相关系数。

(5) 分别从每个公里网格的 1982 年的 500 次结果和 2010 年的 500 次结果中随机取 1 个相减, 得到 1 个 SOC 变化值; 采用放回式重复随机取样并相减, 得到每个网格 1982—2010 年 SOC 变化 (ΔSOC) 的 1 000 次结果 (算法通过 Matlab 编程实现)。

(6) 计算每个网格点 1 000 次 $\Delta SOC > 0$ 的概率。参照 Minasny 等^[34]的划分, 以 0~0.33、0.33~0.67、0.67~1.0 三个概率区间分别代表明显降低、无明显变化和明显升高。

1.5 SOC 时空变化影响因素分析

从 2010 年样点中选择与 1982 年样点距离小于 50 m 的样点 1 932 个, 进行配对比较 (15 cm 以下 SOC_{2010} 从预测结果中提取), 用 ΔSOC 标记 SOC 变化量, 按土壤类型进行比较, 并计算 ΔSOC 与 SOC_{1982} 、黏粒、粉粒、2010 年土壤 pH、1982—2010 年均降雨、年均温、平均气温年较差、2001—2010 年均温与 1971—1980 年均温之差、2010—2012 年作物年均产量、2010—2012 年秸秆年均还田量、灌溉指数等的 Pearson 相关系数。

1.6 SOC 储量计算

用等积样条函数将按发生层记录的土壤容重转化为上述各土层容重, 其中 1982 年容重按 Kriging 插值、2010 年容重按亚类取均值再转化为公里网格; 同理处理 2 mm 石砾和砂姜含量 (仅按 1982 年数据); 从耕地地力数据库提取 2012 年河南耕地分布图, 并转化为公里网格 (图略); 以上数据代入式 (3)

计算 SOC 储量。

$$SOC_s = \sum_{i=1}^n (1 - \theta_i) \rho_i T_i / 100 \times S \times SOC \quad (3)$$

式中, SOC_s 表示单个栅格 SOC 储量 (t), θ_i 表示第 i 层石砾和砂姜的总含量 (%), ρ_i 表示第 i 层土壤容重 ($g \cdot cm^{-3}$), $n=4$ 代表自上而下 4 个土层, T_i 为第 i 层厚度 (cm), S 为单位栅格面积 (m^2), SOC 为栅格土壤有机碳含量 ($g \cdot kg^{-1}$)。

2 结果与讨论

2.1 SOC 基本统计特征

由表 1 可知, 1982—2010 年河南耕地各层 SOC 均值均有所增长, 自 0~15 cm 向下各层依次增加 2.36、1.65、0.77、0.59 $g \cdot kg^{-1}$ 。1982 年 SOC 具有更大的取值区间、峰度和偏度; 而 2010 年的显著特征是 0~15 cm SOC 变异系数明显降低、深层 SOC 变异系数变化不大。

2.2 不同土层 SOC 时空变化

检验表明各层 SOC 的预测值与实测值均达到极显著相关, 结果可靠 (图 3)。两个时期均显示 0~15 cm 和 15~30 cm 西部山区 SOC 大于东部平原区, 且平原区南部 SOC 大于北部; 30~60 cm 除潮土区较低外, 其他区域 SOC 的含量相当; 60~100 cm SOC 空间差异最低 (图 4)。 ΔSOC 概率图确认东部平原和西部山区中的盆地 0~15 cm SOC 普遍增长 (图 5a), 该变化使全省 0~15 cm SOC 空间差异降低 (图 4e); 15~30 cm SOC 的增长区呈大斑块状分布于黄河沿岸壤质潮土和砂质潮土区, 以及零星分布于褐土、水稻土区 (图 5b); 0~15 cm 和 15~30 cm SOC 增幅分别介于 2~4 $g \cdot kg^{-1}$ 和 0~2 $g \cdot kg^{-1}$ 之间 (图 6)。30~60 cm SOC 无明显增长区, 甚至有零星下降区 (图 5c); 而 60~100 cm 则几乎无显著变化 (图 5d)。如果考虑计算误差, 可近似认为 30 cm 以下无变化。

2.3 不同土壤类型的 ΔSOC 及影响因素

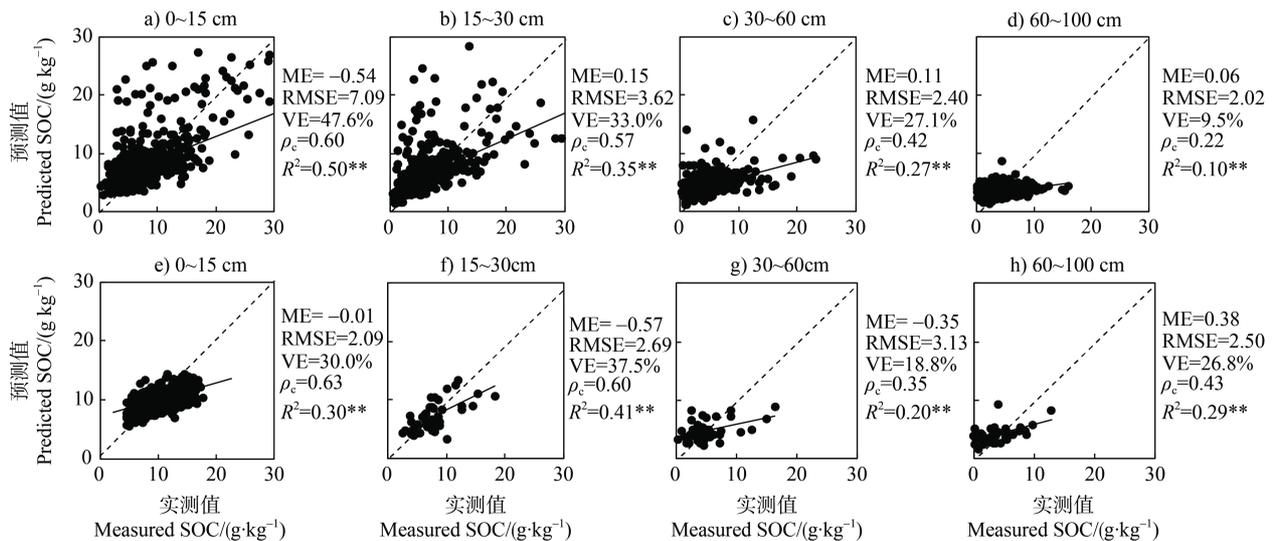
按均值, 水稻土 B (单季稻区) 0~15 cm SOC 增长最多, 其次为潮土和水稻土 A (稻麦轮作区), 再次为砂姜黑土、褐土和黄褐土, 其平均增幅依次为 2.84、2.56、2.49、2.28、2.24、1.58 $g \cdot kg^{-1}$; 而

表 1 1982 年和 2010 年土壤有机碳分层统计特征

Table 1 Summary statistics of SOC in different depth intervals for year 1982 and 2010

深度 Depth/cm	时期 Time /a	样本量 N	最小值 Min	最大值 Max	均值 Mean	标准差				
						Standard deviation	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%	
/ (g·kg ⁻¹)										
0~15	1982	2979	0.23	85.9	7.20b*	4.43	4.5	15.3	61.5	
	2010	13372	3.71	18.0	9.56a	2.50	0.4	-0.2	26.2	
15~30	1982	2979	0.26	38.0	5.70b	2.99	2.2	11.0	52.5	
	2010	187	0.26	28.5	7.35a	3.80	1.6	4.9	51.7	
30~60	1982	2929	0.17	22.6	4.10b	2.36	1.9	7.5	57.5	
	2010	187	0.11	21.8	4.87a	3.18	1.6	4.7	65.3	
60~100	1982	2776	0.01	30.1	3.23b	2.14	2.9	22.1	66.1	
	2010	187	0.03	12.8	3.82a	2.42	1.0	1.2	63.4	

注: 标注不同字母表示其差异显著 ($P < 0.01$)。Note: Different characters represent the significant difference at the $P < 0.01$ level based on the Mann-Whitney test.



注: **表示相关系数在 $P < 0.01$ 水平上显著 Note: ** denotes that correlation coefficient is significant at the level of $P < 0.01$

图 3 土壤有机碳预测均值的精度检验 (上: 1982, 下: 2010)

Fig. 3 The verification for predicted mean SOC (Upper: 1982, Below: 2010)

在 15~30 cm SOC 增长则按潮土、褐土、水稻土 A、水稻土 B、黄褐土、砂姜黑土的顺序递减, 平均增长依次为 1.14、1.04、0.91、0.87、0.60、0.13 g·kg⁻¹ (图 7)。不同土壤类型 Δ SOC 的相关因素差异明显, 但生物气候条件对 0~15 cm 层 Δ SOC 的影响一般大于土壤质地、pH 等的作用 (表 2); 在 15~30 cm 层生物气候对 Δ SOC 的影响则明显降低 (表 3)。

具体而言, 旱地土壤以及水旱轮作土壤 0~

15 cm Δ SOC 均与作物产量、秸秆还田量关系极显著; 且旱地 0~15 cm Δ SOC 又与灌溉指数相关性极显著, 说明了投入土壤的生物量及相关生产要素对 Δ SOC 的直接和间接贡献。但可能因为减耕效应^[35], 以及由于位于山区, 受局部地形、水热变异的影响, 单季稻区 Δ SOC 与产量和秸秆还田等的相关性不显著。旱地 0~15 cm Δ SOC 均与气温年较差关系极显著, 该结果与多数研究一致^[9, 36]; 暖季利于干物质

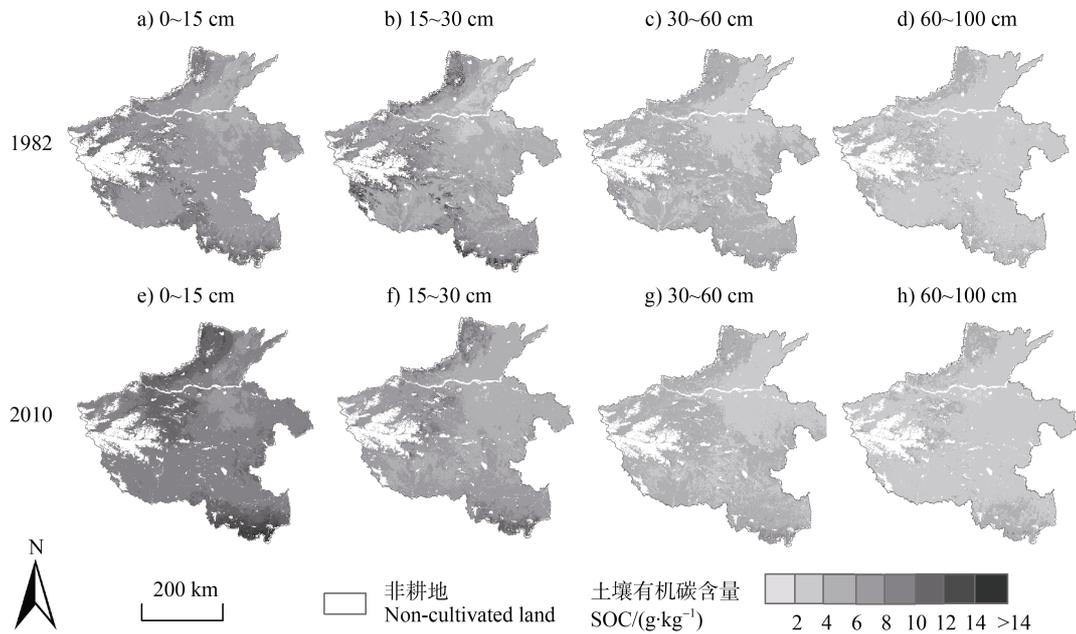


图 4 1982 年和 2010 年土壤有机碳预测均值
 Fig. 4 The mean SOC of 1982 and 2010

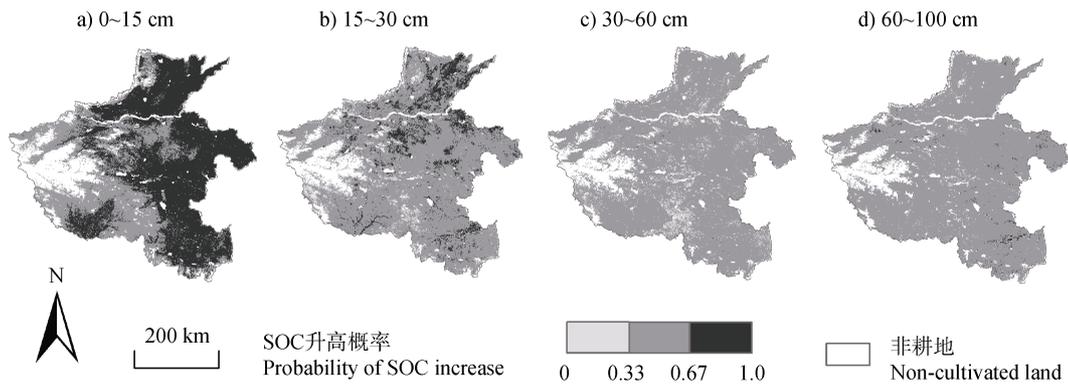


图 5 1982—2010 年河南省耕地土壤有机碳升高概率
 Fig. 5 The probability of SOC increase in cultivated soils over 1982-2010

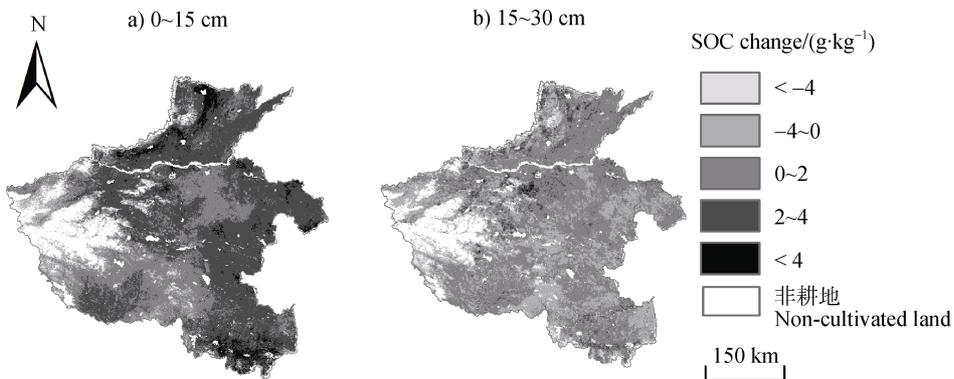
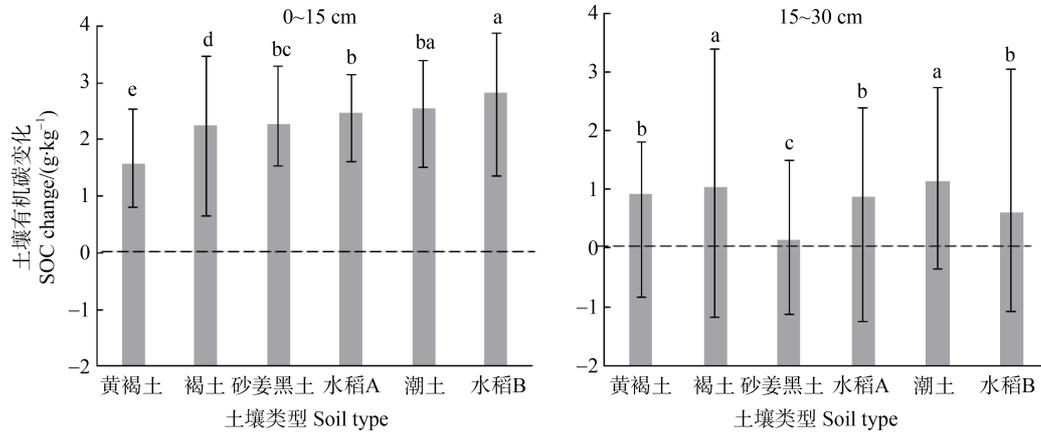


图 6 1982—2010 年 0~15 cm 和 15~30 cm 层的 SOC 预测均值变化
 Fig. 6 The predicted mean SOC changes in the layers of 0-15 cm and 15-30 cm over 1982-2010



注 1: 水稻土 A 源自沿淮低地起伏平原区稻-麦轮作, 水稻土 B 源自靠近南部省界山区单季稻。下同。Note 1: Paddy soil A distributed in a low relief plain along the Huai river with the rotation of rice-wheat and paddy; Soil B is distributed in the hill region that is close to the province borderline with the rotation of rice-fallow. The same below

注 2: 不同字母表示差异显著 ($P < 0.01$)。Note 2: Different characters represent the significant difference at the $P < 0.01$ level based on the Mann-Whitney test.

图 7 1982—2010 年各土类 0~15 cm 和 15~30 cm 土壤有机碳增长量对比

Fig. 7 The comparison of SOC increase over 1982-2010 in both 0-15 cm and 15-30 cm layers among soil types

表 2 0~15 cm SOC 增长量的相关因素

Table 2 The Pearson correlation coefficient of Δ SOC of 0~15 cm soil layer with some selected variables

土壤类型 Soil type	样本数 N	SOC ₁₉₈₂	黏粒 Clay	粉粒 Silt	pH	年均温 MT	气温年较差 MTD	气温变化 TC	产量 Yield	秸秆 Straw	灌溉指数 Irrigation index
潮土	922	-0.02	0.06 Δ	0.08*	-0.03	0.05	0.23**	-0.20**	0.20**	0.17**	0.20**
褐土	387	-0.08	0.04	-0.00	0.20**	0.40**	0.51**	-0.25**	0.41**	0.34**	0.31**
黄褐土	156	0.04	-0.14	0.14	-0.03	0.20*	0.26**	-0.12	0.44**	0.27**	0.30**
砂姜黑土	256	-0.13*	0.24**	-0.09	0.19**	-0.10	0.49**	-0.01	0.58**	0.46**	0.37**
水稻土 A	74	-0.39**	0.09	-0.05	-0.18	0.65**	-0.15	-0.29*	0.27*	0.21 Δ	0.18
水稻土 B	137	-0.14	0.05	0.08	-0.10	0.35**	0.01	-0.22*	0.14	0.13	0.12

注 1: MT、MTD、TC 分别为年均温、平均气温年较差、1980—2010 年均温变化。下同。Note 1: MT, MTD and TC represent respectively the annual mean temperature, annual mean temperature difference between the hottest month and the coldest month, mean temperature change between the 2010s and the 1980s. The same below. 注 2: Δ , *, ** 分别表示相关系数在 $P < 0.1$ 、 $P < 0.05$ 和 $P < 0.01$ 水平上显著。Note 2: Δ , *, ** respectively denotes that the correlation coefficient is significant at the level of $P < 0.1$, $P < 0.05$ and $P < 0.01$.

表 3 15~30 cm SOC 增长量的相关因素

Table 3 The Pearson correlation coefficient of Δ SOC of 15~30 cm soil layer with some selected variables

土壤类型 Soil type	样本数 N	SOC ₁₉₈₂	黏粒 Clay	粉粒 Silt	pH	年均温 MT	气温年较差 MTD	气温变化 TC	产量 Yield	秸秆 Straw
潮土	922	-0.57**	-0.26**	-0.09**	0.10**	-0.27**	0.36**	-0.20**	-0.04	-0.04
褐土	387	-0.19**	-0.02	-0.04	0.10*	0.12*	0.19**	-0.10*	0.14**	0.12*
黄褐土	156	-0.28**	0.24**	-0.37**	-0.22**	0.11	0.00	0.06	-0.14	-0.05
砂姜黑土	256	-0.45*	-0.01	0.02	0.15*	-0.12	0.00	-0.20**	0.02	-0.08
水稻土 A	74	-0.29*	0.17	-0.13	0.00	0.52**	-0.18	-0.30*	0.06	0.01
水稻土 B	137	-0.20*	0.07	0.17*	-0.01	0.17*	-0.10	-0.45**	-0.04	0.04

积累、而冷季则抑制其分解;上述关系在 15~30 cm 土层仍存在(表 3),只是仅局限于更加冷凉的北部褐土和潮土区;位于亚热带的水稻土 Δ SOC 与气温年较差则无明显关系。此外,年均温与 Δ SOC 正相关或不相关、气温变化与 Δ SOC 负相关或不相关,既体现了热量对于生物和 SOC 积累的正面作用,又反映了气候变暖对 SOC 积累的负面影响。

在 0~15 cm 土层,砂姜黑土 Δ SOC 与黏粒含量呈极显著正相关,潮土 Δ SOC 与粉粒含量呈显著正相关、与黏粒含量仅弱相关($P < 0.1$),其他土壤的质地与 Δ SOC 无明显关系。虽然细粒物质是决定 SOC 固持潜力的重要因素,但 Δ SOC 还受初始含量、管理因素等影响^[4-5, 16-17, 35-36],如 Zheng 等^[37]研究表明随 SOC 增加, Δ SOC 与土壤类型、土壤质地的关系减弱;而土壤类型内质地是否有明显分异也会影响其与 Δ SOC 的统计关系。剖面土壤质地变化使各层水分、养分和通气条件差异明显,其中轻壤土和壤土较黏土更利于根系发育,影响根的剖面分布^[38],这使得砂质和壤质潮土 15~30 cm SOC 增加概率较其他区域更大(图 5b),相应潮土该层 Δ SOC 与黏粒和粉粒含量呈负相关。其他土壤 Δ SOC 在 15~30 cm 与质地的关系则无确定规律。

近期有研究表明土壤酸化对 SOC 变化有重要影响^[39]。黄褐土是河南 pH 最低、且近年酸化明显的土壤^[29];但本研究只发现其 15~30 cm Δ SOC 与 pH 呈负相关。作为复杂系统,土壤的 SOC 变化是多因素综合作用的结果;15~30 cm SOC 与土壤管理的关系减弱,而与土壤性质的关系加强,可能使 pH 作用凸显。而对于褐土、砂姜黑土、潮土等中性至偏碱性土壤,pH 一般与碳酸钙含量成正比,而后者利于形成土壤团聚体,从而对 SOC 保存和提高有利^[40],它们 0~30 cm 的 Δ SOC 与 pH 呈正相关(除潮土 0~15 cm 内二者不相关)。

Δ SOC 往往与 SOC 初始值呈负相关^[1-4]。但对 0~15 cm 土层,本文只发现砂姜黑土、水稻土 A 存在该关系;其他旱地土壤未呈现该关系,可能与不同土壤的固碳潜力及其 SOC 初始值差异有关;水稻土 B 则可能受减耕效应影响,也未呈现该关系。但所有土壤 15~30 cm Δ SOC 均与其初始值呈显著或极显著负相关,与该层 SOC 固存潜力低一致。

2.4 耕地增持 SOC 速率与 COP21 目标比较

以 2012 年耕地 $7\ 791 \times 10^4 \text{ hm}^{-2}$ 计,河南 1982

年 1 m 土体耕地 SOC 总储量为 50 770 万 t;摒除不能确定变化的区域,28 年增长 7.04%,年增长速率 2.43%;其中 0~15 cm 和 15~30 cm 的总增长量分别为 3 151 万 t 和 425 万 t,分别占 88.1%和 11.9%。按单位面积计,0~15 cm SOC 年增长 $0.16 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,略低于福建同期 0~15 cm 年增长率 $0.19 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[13],略高于安徽同期 0~20 cm 年增长速率 $0.15 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ ^[14],与赵永存等^[4]统计的我国耕地 0~30 cm SOC 年增长率 $0.09 \sim 0.28 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 也较符合。

在所有人为可控因素中,秸秆还田可能是当前普遍发生的、最利于促进 SOC 增长的因素^[5, 7, 14, 36, 41-42],本文也确认其效应。但秸秆还田增加了 SOC 的活性成分比例^[41],该部分 SOC 被分解的机率亦较大;其效应受土壤、气候和初始 SOC 含量影响,随时长而降低^[42];当前政策鼓励氮肥减量施用,但随 C/N 比增加,如果施氮不足,可能促进有机质矿化、抵消部分秸秆还田效应。基于全国性数据的 Meta 分析表明秸秆还田处理下 SOC 增幅仅高于对照 7.9%~15.4%,而秸秆还田超过 10 年后 SOC 反而下降^[42];以上研究均不支持秸秆还田具有长期固碳效应。太湖流域 SOC 在 2000—2015 年呈缓慢下降趋势^[43];河南砂姜黑土和水稻土 A 的 SOC1982 与 Δ SOC 的负相关也说明其 SOC 增速可能将降低,而潮土和水稻土 B 的 SOC 当前增速也仅略高于水稻土 A 和砂姜黑土;而气候变暖可能降低 SOC 固存潜力、缩短土壤达到碳饱和的时间。

综上所述,即便采取秸秆还田和保护性耕作,多数农业区 SOC 增速估计难达到 4‰。因此,本文认同 Baveye 等^[44]的观点——耕地 SOC 增加远不能抵消人类碳排放,降低碳的净排放量是抑制气候变化的根本。

3 结 论

1982—2010 年河南平原和盆地地区耕地 0~15 cm 土层的 SOC 增加明显,增加幅度 $2 \sim 4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其他农区增加不明显,但亦无明显下降,该层 SOC 储量增加占比 88.1%;15~30 cm 土层 SOC 增加主要发生在沿黄壤质、砂质潮土区和零星的褐土、水稻土区,增加幅度 $0 \sim 2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,该层 SOC 储量增加占比 11.9%;30 cm 以下土层的 SOC 变化不明显。生物气候条件对 Δ SOC 的作用大于土壤属性。除单季稻

区可能受“养地”影响外,其他区域 SOC 均与生物量输入显著或极显著相关;气温年较差对处于温带旱地 SOC 积累影响更显著、对亚热带稻区影响不明显;气候变暖明显对 SOC 积累不利;由于所处环境和土壤性质差异,不同土壤类型质地和 pH 与 Δ SOC 的关系可变性较大。耕地 1 m 土体 SOC 总储量为 50 770 万 t, 历经 28 年 1 m 土体总增长率为 7.04%, 年均增长率为 2.43‰, 远低于 COP21 目标;考虑到今后秸秆还田促进土壤固碳的效应可能减弱以及全球变暖等不利因素, 不应过高估计农业土壤固碳的环境效应。

参考文献 (References)

- [1] Minasny B, Malone B P, McBratney A B, et al. Soil carbon 4 per mille[J]. *Geoderma*, 2017, 292: 59—86.
- [2] Dal Ferro N, Piccoli I, Berti A, et al. Organic carbon storage potential in deep agricultural soil layers: Evidence from long-term experiments in northeast Italy[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 300: 106967.
- [3] Ludwig B, Hu K L, Niu L G, et al. Modelling the dynamics of organic carbon in fertilization and tillage experiments in the North China Plain using the Rothamsted Carbon Model—initialization and calculation of C inputs[J]. *Plant and Soil*, 2010, 332(1/2): 193—206.
- [4] Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, et al. Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions[J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, 33(2): 191—197. [赵永存, 徐胜祥, 王美艳, 等. 中国农田土壤固碳潜力与速率: 认识、挑战与研究建议[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33 (2): 191—197.]
- [5] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16): 4045—4050.
- [6] Ou Y, Rousseau A N, Wang L X, et al. Spatio-temporal patterns of soil organic carbon and pH in relation to environmental factors—A case study of the Black Soil Region of Northeastern China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2017, 245: 22—31.
- [7] Xia X Q, Yang Z F, Liao Y, et al. Temporal variation of soil carbon stock and its controlling factors over the last two decades on the southern Song-Nen Plain, Heilongjiang Province[J]. *Geoscience Frontiers*, 2010, 1 (1): 125—132.
- [8] Cheng H X, Bai R J, Li K, et al. Study of loss or gain of soil organic carbon in Da'an region, Jilin Province in China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2012, 112: 272—275.
- [9] Dai F Q, Su Z G, Liu S Z, et al. Temporal variation of soil organic matter content and potential determinants in Tibet, China[J]. *Catena*, 2011, 85 (3): 288—294.
- [10] Wang L G, Qiu J J, Tang H J, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China[J]. *Geoderma*, 2008, 147 (1/2): 47—55.
- [11] Cao X H, Long H Y, Lei Q L, et al. Spatio-temporal variations in organic carbon density and carbon sequestration potential in the topsoil of Hebei Province, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, 15 (11): 2627—2638.
- [12] 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.]
- [13] Wu S R, Wei J, Qiu L X, et al. Study of Soil Organic Carbon Sequestration Rate and Potential of Farmland Soil in Fujian Province Based on the Large Scale Soil Database[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (5): 1293—1305. [吴世蓉, 位佳, 邱龙霞, 等. 基于大比例尺数据库的福建省耕地土壤固碳速率和潜力研究[J]. *土壤学报*, 2002, 59 (5): 1293—1305.]
- [14] 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.]
- [15] Li L, Zhang S K, Wu K N, et al. Analysis on spatio-temporal variability of soil organic matter in Henan Province based on soil taxonomy[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (5): 979—990. [李玲, 张少凯, 吴克宁, 等. 基于土壤系统分类的河南省土壤有机质时空变异[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (5): 979—990.]
- [16] Guo N J, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Environmental and anthropogenic factors driving changes in paddy soil organic matter: A case study in the middle and Lower Yangtze River plain of China[J]. *Pedosphere*, 2017, 27 (5): 926—937.
- [17] Dong L, Shi X Z, Xu S X, et al. Effects of different management measures on the organic carbon of farmland soil profile in China based on meta-analysis[J]. *Soils*, 2021, 53 (6): 1290—1298. [董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. *土壤*, 2021, 53 (6): 1290—1298.]

- [18] Liang F, Li J W, Zhang S Q, et al. Two-decade long fertilization induced changes in subsurface soil organic carbon stock vary with indigenous site characteristics[J]. *Geoderma*, 2019, 337: 853—862.
- [19] Blanco-Canqui H, Shapiro C, Jasa P, et al. No-till and carbon stocks: Is deep soil sampling necessary? Insights from long-term experiments[J]. *Soil and Tillage Research*, 2021, 206: 104840.
- [20] Wu K N, Li L, Ju B, et al. Henan volume in soil series of China[M]. Beijing: Science Press, 2019. [吴克宁, 李玲, 鞠兵, 等. 中国土系志·河南卷[M], 北京: 科学出版社, 2019.]
- [21] Minasny B, McBratney A B. Digital soil mapping: A brief history and some lessons[J]. *Geoderma*, 2016, 264: 301—311.
- [22] National Bureau of Statistics. 2021 China Statistical Year Book[M]. Beijing: China Statistics Press, 2021. [国家统计局. 2021 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2021.]
- [23] Wei K X. Henan soil geography[M]. Zhengzhou: Science and Technology Press of Henan Province, 1995. [魏克循. 河南土壤地理[M], 郑州: 河南科学技术出版社, 1995.]
- [24] Soil Survey Office of Henan Province. Soil Series of Henan Province [M]. Beijing: China Agriculture Press, 1995. [河南省土壤肥料工作站河南省土壤普查办公室. 河南土种志[M]. 北京: 中国农业出版社, 1995.]
- [25] Malone B P, McBratney A B, Minasny B, et al. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity[J]. *Geoderma*, 2009, 154(1/2): 138—152.
- [26] Chen P F. Monthly NPP dataset covering China's terrestrial ecosystems at north of 18°N (1985—2015) [J]. *Journal of Global Change Data & Discovery*, 2019, 3 (1): 34—41, 143. [陈鹏飞. 北纬 18° 以北中国陆地生态系统逐月净初级生产力 1 公里栅格数据集 (1985—2015) [J]. *全球变化数据学报*, 2019, 3 (1): 34—41, 143.]
- [27] Zhao Y F, Zhang H N, Cheng D Q, et al. Cultivated land productivity evaluation at provincial scale based on a map of grouped soil profile configuration pattern[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, 46 (5): 1040—1048. [赵彦锋, 张化楠, 程道全, 等. 基于归并“土体构型”图的省域耕地地力评价[J]. *土壤通报*, 2015, 46 (5): 1040—1048.]
- [28] Ning X J, Qin Y C, Cui Y P, et al. Hydrothermal conditions change data of China in 1km resolution in decades from 1951 to 2010 [J/DB/OL]. *Digital Journal of Global Change Data Repository*, 2016. <https://doi.org/10.3974/geodb.2016.01.07.V1>. [宁晓菊, 秦耀辰, 崔耀平, 等. 中国 10 年平均水热条件变化公里网格数据集 (1951—2010) [J/DB/OL]. *全球变化数据仓储* 电子杂志, 2016. <https://doi.org/10.3974/geodb.2016.01.07.V1>.]
- [29] Wei X T. The changes of soil pH and its' uncertainties in Henan Province in recent 40 years[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2021. [魏鑫涛. 河南省近 40 年土壤 pH 变化及其度量的不确定性[D]. 郑州: 郑州大学, 2021.]
- [30] Meinshausen N. quantregForest: Quantile Regression Forests. 2017. <http://github.com/lorismichel/quantregForest>.
- [31] R Core Team, R Foundation for Statistical Computing. R: A language and environment for statistical computing. 2020. <https://www.r-project.org/>.
- [32] Liu F, Zhang G L, Sun Y J, et al. Mapping the three-dimensional distribution of soil organic matter across a subtropical hilly landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2013, 77 (4): 1241—1253.
- [33] Lin L I. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility[J]. *Biometrics*, 1989, 45 (1): 255—268.
- [34] Minasny B, Hong S Y, Hartemink A E, et al. Soil pH increase under paddy in south Korea between 2000 and 2012[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2016, 221: 205—213.
- [35] Tian K, Zhao Y C, Xing Z, et al. A meta-analysis of long-term experiment data for characterizing the topsoil organic carbon changes under different conservation tillage in cropland of China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 433—440. [田康, 赵永存, 邢喆, 等. 中国保护性耕作农田土壤有机碳变化速率研究——基于长期试验点的 Meta 分析[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 433—440.]
- [36] Guo N J, Shi X Z, Zhao Y C, et al. Comparative study on impacts of anthropogenic and environment factors on soil organic matter: A case study of typical black soil region and paddy soil region[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, 53 (5): 1097—1106. [郭乃嘉, 史学正, 赵永存, 等. 人为与环境因子对农田土壤有机质影响的比较研究——以典型黑土区和水稻土区为例[J]. *土壤学报*, 2016, 53 (5): 1097—1106.]
- [37] Zheng L, Wu W L, Wei Y P, et al. Effects of straw return and regional factors on spatio-temporal variability of soil organic matter in a high-yielding area of Northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 145: 78—86.
- [38] Hu T J. Wheat ecology and production[M]. Zhengzhou: Science and Technology Press of Henan Province, 1986. [胡廷积. 小麦生态与生产技术[M]. 郑州: 河南科学技术出版社, 1986.]
- [39] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, et al. Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, 366: 114234.
- [40] Zhao H L, Zhang H J, Shar A G, et al. Enhancing organic and inorganic carbon sequestration in calcareous soil by

- the combination of wheat straw and wood ash and/or lime[J]. PLoS One, 2018, 13 (10): e0205361.
- [41] Zhao H L, Dong J J, Shi J L, et al. Effect of straw returning mode on soil organic carbon sequestration[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58 (1): 213—224. [赵惠丽, 董金璘, 师江澜, 等. 秸秆还田模式对小麦-玉米轮作体系土壤有机碳固存的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58 (1): 213—224.]
- [42] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, et al. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis[J]. Journal of Environmental Management, 2021, 288: 112391.
- [43] Xie E Z, Zhang X, Lu F Y, et al. Integration of a process-based model into the digital soil mapping improves the space-time soil organic carbon modelling in intensively human-impacted area[J]. Geoderma, 2022, 409: 115599.
- [44] Baveye P C, Berthelin J, Tessier D, et al. The “4 per 1000” initiative: A credibility issue for the soil science community? [J]. Geoderma, 2018, 309: 118—123.

(责任编辑: 檀满枝)