

袁晨光, 田梦, 王国兵, 等. 三门峡市耕地土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J]. 环境科学与技术, 2025, 48(5): 214-224. Yuan Chenguang, Tian Meng, Wang Guobing, et al. Soil organic carbon change and carbon sequestration potential estimation in Sanmenxia City[J]. Environmental Science & Technology, 2025, 48(5): 214-224.

三门峡市耕地土壤有机碳变化及固碳潜力估算

袁晨光, 田梦, 王国兵, 高超,
张世柯, 李迪, 杨建波

(河南省科学院地理研究所, 河南 郑州 450052)

摘要:土壤固碳不仅可以保护土壤、提高土壤质量,还可以维持农业经济可持续发展、减缓温室效应;耕地土壤固碳潜力研究对于探究土壤有机碳平衡机理、提高耕地碳储量、确定耕地土壤施肥目标具有重要意义。该文利用土壤类型法,以河南省第二次全国土壤普查数据和2022年土壤化验分析数据为基础,估算了三门峡市不同耕地土壤类型的有机碳密度和碳储量,利用平衡法估算了土壤固碳潜力,同时运用ArcGIS空间分析方法,分析了1986-2022年河南省典型山区三门峡市耕地表层土壤有机碳的动态变化特征。结果表明:1986-2022年,三门峡市耕地表层土壤有机碳密度平均减少 0.60 kg/m^2 ,减少值区域主要分布在灵宝市、卢氏县北部、陕州区西部;土壤有机碳储量减少 $1.32\times 10^8\text{ kg}$,其中,褐土的土壤有机碳储量减少最多,占到了减少总量的73%,其次为红黏土、粗骨土和棕壤;饱和水平上,三门峡市棕壤碳库在达到饱和状态时土壤有机碳密度最高,为 11.86 kg/m^2 ,其次为褐土、黄棕壤和潮土,风沙土的土壤碳库在达到饱和状态时土壤有机碳密度最低,为 0.95 kg/m^2 ;从1986-2022年,三门峡市耕地表层土壤有机碳年平均变化速率为 $-0.017\text{ kg/(m}^2\cdot\text{a)}$,土壤固碳潜力为 $-2.57\times 10^8\text{ kg}$,整体呈现为碳源区。潮土、黄棕壤、石质土和紫色土呈现为碳汇区,粗骨土、风沙土、褐土、红黏土、黄褐土、新积土和棕壤呈现为碳源区,土壤固碳潜力最低的土壤类型为褐土,为 $-1.49\times 10^8\text{ kg}$ 。建议采取免耕、少耕和秸秆还田相结合的农业管理措施,提高河南省土壤固碳潜力。

关键词:土壤有机碳密度; 有机碳储量; 变化速率; 土壤固碳潜力; 三门峡市

中图分类号: X24; S153.6 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.1909.24.338 **文章编号:** 1003-6504(2025)05-0214-11

Soil Organic Carbon Change and Carbon Sequestration Potential Estimation in Sanmenxia City

YUAN Chenguang, TIAN Meng, WANG Guobing, GAO Chao,
ZHANG Shike, LI Di, YANG Jianbo

(Institute of Geographical Science, Henan Academy of Sciences, Zhengzhou 450052, China)

Abstract: Soil carbon sequestration can not only protect soil and improve soil quality, but also maintain the sustainable development of agricultural economy and reduce the greenhouse effect. The study on soil carbon sequestration potential of cultivated land is of great significance for exploring the mechanism of soil organic carbon balance, improving the carbon storage of cultivated land and determining the target of soil fertilizer cultivation. Based on the data of the Second National Soil Census in Henan Province and the data of soil laboratory analysis in 2022, this study estimated the organic carbon density and carbon storage of different cultivated soil types in Sanmenxia City by using the soil type method, and estimated the potential of soil carbon sequestration by using the balance method and ArcGIS spatial analysis. The dynamic change characteristics of soil organic carbon in cultivated land in Sanmenxia City from 1986 to 2022 were analyzed. The results showed that the average soil organic carbon density of cultivated land decreased by 0.6 kg/m^2 during 1986-2022, and the decrease areas mainly distributed in Lingbao City, the north of Lusi County and the west of Shaanxi District. Soil organic carbon storage decreased by 1.316 Tg . The soil organic carbon storage of brown soil decreased the most, accounting for 73% of the total reduction, followed by red clay, coarse bone soil and brown soil. At the saturation level, the soil organic carbon density was the highest when the brown soil carbon pool reached the saturation state, which was 11.86 kg/m^2 , followed by brown soil, yellow

brown soil and tidal soil. When the soil carbon pool of aeolian sand reaches saturation state, the soil organic carbon density is the lowest, which is 0.95 kg/m^2 . From 1986 to 2022, the average annual change rate of surface soil organic carbon was $0.017 \text{ kg/(m}^2 \cdot \text{a)}$, and the soil carbon sequestration potential was -0.257 Tg , showing a carbon source region as a whole. The aquic soil, yellow brown soil, stony soil and purple soil are carbon sink areas, while the coarse bone soil, aeolian sand soil, brown soil, red clay, yellow brown soil, new sediment soil and brown soil are carbon source areas. Among them, the soil type with the lowest carbon sequestration potential was brown soil, which was -0.149 Tg . It is suggested that agricultural management measures combining no-tillage, less tillage or straw returning should be adopted to improve soil carbon sequestration potential in Henan Province.

Key words: soil organic carbon density; organic carbon storage; rate of change; soil carbon sequestration potential; Sanmenxia City

土壤是陆地生态系统的核心枢纽,而土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)在陆地碳库中占比最大,在碳元素的交换循环过程中起着极其重要的作用^[1]。近年来,温室效应成为人们关注的焦点, SOC与温室效应及气候变化密不可分。一方面, SOC的变化与土壤碳库具有较强的相关性,可能使温室效应更加严重;另一方面,温室效应所产生的生态环境变化对于耕地农作物的影响逐步增加,耕地土壤健康状况严重影响其生产力^[2]。土壤固碳可以减少空气中 CO_2 的浓度、改善生态环境,稳定粮食安全、提高粮食产量。因此,研究耕地 SOC 变化过程和土壤固碳潜力对评价土壤在陆地碳循环中发挥的作用和提升耕地土壤有机碳固存至关重要^[3]。

近年来,随着“碳中和”和“碳达峰”的提出,对于农业减排固碳和节能降碳的研究在逐步增加。农田 SOC 储量和 SOC 的动态变化过程成为学术界关注的焦点,也是实现“双碳”目标的关键^[4-8]。在 SOC 储量研究方面, Liang 等^[9]分析了加拿大 20 年间农田土壤在不同农业管理措施情景下 SOC 储量变化情况,发现温度和土壤理化结构在 SOC 储量变化中起主导作用。Santini 等^[10]建立了 SOC 储量与区域 CO_2 排放量的数学模型,通过测算认为森林 SOC 储量减少的主要因素是森林退化过程影响了 CO_2 排放。国内现有研究大部分是选取实验田进行长期定位,获取 5~10 年的土壤实验数据,分析 SOC 变化情况^[11-13]。河南省是我国的农业大省,但与其他各省相比,河南省 SOC 储量相对较低。于建军等^[14]利用河南省 1:20 万土壤数据库估算了河南省农田 SOC 储量,研究发现河南省农田 SOC 储量为 $10.27 \times 10^8 \text{ t}$, 仅占全国 SOC 储量的 1.15%。张婧婷等^[15]运用荟萃分析、随机森林机器学习模型和卫星遥感数据,研究出 1981-2019 年华北平原农田 SOC 储量约为 $523.1 \times 10^8 \text{ t}$, 并稳步增长。同时,常规农田管理措施对 SOC 平均贡献率为 25.1%。赵占辉^[16]以河南省封丘县为例,分析出土壤容重、pH、秸秆还田与施肥是影响农田土壤固碳速率的关键因素。谷志云等^[17]

估算了郑州市不同土壤类型的表层 SOC 储量和密度,并通过采集耕地表层土壤样品,结合容重法(VOL)和地球化学评价指标研究出石灰性土壤类型表层 SOC 储量和密度较高,如石灰性粗骨土和石灰性褐土。在土壤固碳潜力的研究方面,王世航等^[18]以河南省获嘉县为例,选择了获嘉县一个旱地土壤肥力长期监测点,运用 Century 模型模拟了监测期间不同管理措施条件下的土壤有机碳密度(SOCD),发现 50% 秸秆还田和少耕相结合的农田管理措施条件下,监测点的 SOCD 最大。覃章才等^[19]基于土壤碳饱和理论,通过长期定位试验构建和验证了农田土壤固碳潜力模型,预测出河南省农田表土碳饱和和密度约为 32 t/hm^2 , 低温湿润地区、高黏粒含量和低 pH 的土壤 SOCD 较高。综上所述,已有的关于河南省 SOC 的研究因数据来源、研究区域、研究方法和土壤深度差异的不同,不能较好地量化 SOC 储量。对于河南省 SOC 的研究对象多基于平原区域,鲜有针对山区等典型区域的研究,不能全面反映河南省整个区域条件下 SOC 储量动态变化和土壤固碳潜力情况^[20,21]。因此,本研究选择了河南省典型山区——三门峡市作为研究对象,分析 1986 年和 2022 年三门峡市不同耕地土壤类型的有机碳密度和碳储量,并估算土壤固碳潜力,为第三次全国土壤普查提供数据基础,也为提高河南省农田土壤质量、改善生态环境提供支撑。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本研究所选三门峡市($110^{\circ}21' \sim 112^{\circ}01' \text{ E}$, $33^{\circ}31' \sim 35^{\circ}05' \text{ N}$)位于河南省西部,处于秦岭山脉东延与伏牛山、熊耳山、崤山交汇地带,面积约 $9\,935 \text{ km}^2$ 。三门峡市地势西南高,东北低,差异明显,有山地、丘陵、河谷、平原等多种类型,其中山地占 54.8%,丘陵占 36%,平原占 9.2%^[22]。三门峡市的土壤类型具有明显的垂直分布和水平分布特征,土壤主要有褐土、红黏土、粗骨土、潮土、棕壤 5 个土类,同时分为 9 个亚类、20 个土

属、42个土种。土地利用类型以林地、耕地、园地和草地为主。三门峡市是河南省主要的粮食生产基地,主要的粮食作物为小麦、玉米、豆类和水稻,经济作物有棉花、油菜和烟草等^[23]。

1.2 数据来源

1.2.1 土壤数据

本研究所采用的土壤基础数据来源于河南省土壤普查办公室编写的《河南土壤》《河南土壤地理》和《河南土种志》中记录的三门峡市30个典型土壤剖面数据库^[24]。其中包含了剖面的归属和分布、地理位置和主要性状、耕层厚度、土壤容重、土壤pH、有机质含量等属性值。河南省第二次土壤普查的时间为1979–1986年,本研究以1986年为初始点。土壤属性数据来源于南京土壤所与河南农业大学联合构建的“河南省1:20万土壤数据库”,该数据库经过空间叠加得到三门峡市耕地土壤属性数据库^[25]。

本次野外采样时间为2022年,选取了河南省第二次土壤普查中记录的三门峡市典型土壤表层附近作为中心位置,共92个采样点位,同时覆盖三门峡市所有县区中每种土壤类型。采样方法参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295–2016),结合土壤图、遥感影像和数字高程模型确定样方区域,利用梅花法设定5个采样点位,每个点位相距10 m,采集0~20 cm耕作层土壤,利用四分法将5个点位的土壤混合平均为一个土壤样品。采样时避开施肥点,去除地表秸秆与砾石,使用不锈钢锹等工具挖坑采样,每个样品质量控制为2 kg。土壤样品经过自然风干后过20目尼龙筛,经过充分混合后选取500 g作为最终样品。样品的测试分析中,SOC含量分析采用湿式氧化法,利用重铬酸盐作为氧化剂,检出限为0.1%。

1.2.2 其他数据来源

本研究中土壤分类来源于《中国土壤分类与代码》(GB/T17296–2009);土壤环境数据参照《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB/T15618–2018);土地利用现状数据参照《土地利用现状分类》(GB/T21010–2017);土壤容重取自《河南土壤》中记录的三门峡市各土壤类型的容重平均值。

1.3 研究方法

1.3.1 土壤有机碳密度计算方法

土壤有机碳密度(SOCD)指单位面积一定深度条件下土壤有机碳的储量,它是影响土壤碳库、评价SOC动态变化的重要指标^[26,27]。SOCD的计算公式为:

$$SOCD = \rho \times C \times D / 10 \times 0.58 \quad (1)$$

式中,SOCD为土壤有机碳密度,kg/m²;ρ为土壤容重,g/m³;C为土壤有机质含量,g/kg;D为土层厚度,

本研究中取三门峡市耕地表层土壤厚度20 cm;0.58为土壤有机质和有机碳的换算系数。

1.3.2 土壤有机碳变化速率计算方法

土壤有机碳变化速率(SOCR)的计算通常采用Meta分析、土壤调查数据差减和DNDC模型模拟3种方法^[28]。其中,Meta分析主要采用了以往文献中的SOC数据,而DNDC模型模拟多以大区域尺度和详细的土壤数据库为基础进行测算^[29]。因此本研究采用2期土壤数据差减法,以1986年三门峡市耕地表层SOCD为基准,计算各类土壤有机碳变化速率。计算公式为:

$$SOCR = (SOCD_{2022} - SOCD_{1986}) / H \quad (2)$$

式中,SOCR为土壤有机碳变化速率,kg/(m²·a);SOCD₂₀₂₂为2022年三门峡市耕地表层土壤有机碳密度,SOCD₁₉₈₆为1986年三门峡市耕地表层土壤有机碳密度,H为年份,本研究中取36。

1.3.3 土壤有机碳储量计算方法

按照《中国土壤分类与代码》(GB/T17296–2009)中对土壤类型的划分进行土壤有机碳储量的估算,计算公式为:

$$SOC_{\text{储量}} = \sum_{i=1}^n SOCD_i \times S_i \quad (3)$$

式中,SOC_{储量}为三门峡市某一种类型土壤的有机碳储量,kg;n为三门峡市某一种类型土壤的图斑数量;SOCD_i为三门峡市某一种类型土壤第i个图斑的有机碳密度,kg/m²;S_i为三门峡市土壤类型图中某一种类型土壤第i个图斑的面积,m²。

1.3.4 土壤固碳潜力计算方法

现有研究中较多地应用平衡法测算耕地的土壤固碳潜力^[30–32]。其中土壤碳库饱和是指保持土地耕作条件和利用方式不变,土壤碳储量在区域气候、地形地貌、土壤母质状况的作用下随时间推移逐步达到稳定状态,该稳定值即为土壤碳库的饱和状态。本研究中,把1986年三门峡市不同类型耕地SOCD平均值当作初始值,2022年三门峡市对应的SOCD平均值当作最终值,二者的差值即为三门峡市不同类型耕地的SOCD变化量。计算公式为:

$$\Delta SOCD = SOCD_{2022} - SOCD_{1986} \quad (4)$$

式中,ΔSOCD为三门峡市不同类型耕地的SOCD变化量,kg/m²;SOCD₂₀₂₂为2022年三门峡市不同类型耕地的SOCD平均值,kg/m²;SOCD₁₉₈₆为1986年三门峡市不同类型耕地的SOCD平均值,kg/m²。

土壤固碳潜力为土壤碳库达到饱和状态后,土壤固碳量与现状条件土壤有机碳储量的差值。将各土壤类型的有机碳密度与变化量建立拟合关系曲线。

有机碳密度变化量为0时对应的有机碳密度即表示为土壤碳库饱和状态下的有机碳密度,该状态下的有机碳储量为饱和值。本研究中,将1986年三门峡市耕地土壤数据库中的SOC_D进行空间插值运算后的数据作为初始SOC_D,将2022年三门峡市耕地表层土壤采样点实际检测出的SOC_D进行空间插值运算后的数据作为现状SOC_D,以SOC_{D2022}表示。将SOC_{D1986}和SOC_{D2022}进行栅格插值运算后的数据作为两期SOC_D变化量,以ΔSOC_D表示,从而建立两期SOC_D的拟合关系曲线。当ΔSOC_D为0时,该类土壤碳库达到饱和状态,所对应的SOC_{D1986}即为饱和水平。饱和值与现状有机碳储量的差值作为土壤固碳潜力值。计算公式为:

$$SOC_{潜} = \sum_{i=1}^n (SOC_{D_{饱i}} - SOC_{D_{现i}}) \times S_i \quad (5)$$

式中,SOC_潜为三门峡市耕地表层土壤固碳潜力,kg;n为三门峡市耕地表层土壤类型数量;SOC_{D_{饱i}}为三门峡市第*i*个土壤类型饱和状态时的有机碳密度,kg/m²;SOC_{D_{现i}}为三门峡市第*i*个土壤类型现状条件下的有机碳密度,kg/m²;S_i为第*i*个土壤类型面积,m²。

1.3.5 数据处理

本研究设定1986–2022年三门峡市耕地的耕作方式、施肥条件、气候状况等条件不发生变化,仅考虑土壤要素对SOC的作用影响。首先,考虑到实际采样点数量的有限性,本研究根据1986年三门峡市1:20万耕地土壤数据库和2022年SOC化验分析数据,同时结合实地采样,利用ArcGIS中的近邻分析进行空间插值,将1986年三门峡市耕地土壤属性数据库中的图斑单元与2022年采样点SOC数据进行空间连接,该数据覆盖了1986年和2022年三门峡市全部耕地土壤类型。其次,按照公式(1)中的计算方法,得到1986年和2022年三门峡市不同类型耕地表层SOC_D平均值以及二者的差值,利用ArcGIS进行空间连接,生成土壤属性空间分布图,并按照公式(3)计算SOC

储量。最后,根据1986年和2022年三门峡市耕地表层SOC_D的拟合关系,计算得到土壤固碳潜力值。

研究数据中的线性拟合分析采用Microsoft Excel 2016软件进行处理,统计分析采用SPSS26.0软件进行处理,SOC_D频率分布直方图和拟合关系曲线图的制作采用GraphPad Prism 8.0软件,数据的空间分析、叠加分析和图件制作采用ArcGIS 10.2软件进行处理。

2 结果与分析

2.1 1986–2022年三门峡市耕地表层SOC_D变化情况

2.1.1 SOC_D时间变化情况

根据河南省1:20万土壤数据库中的三门峡市土壤类型数据和测算出的SOC_D,分别计算了1986年和2022年三门峡市每种土壤类型耕地表层平均SOC_D(表1)。从表1可以看出,三门峡市主要的土壤类型为褐土、红黏土、粗骨土和棕壤,其中褐土占土壤总量的2/3。总体来看,三门峡市耕地表层土壤平均SOC_D减少了0.6 kg/m²,变异系数由22.36%升高至28.53%,说明2022年三门峡市耕地表层SOC_D变异程度升高,差异程度增加。从1986年和2022年的情况对比来看,1986年三门峡市不同类型土壤SOC_D差异较大,棕壤、黄棕壤、潮土和褐土的平均SOC_D较高,风沙土和石质土的平均SOC_D较低,说明不同土壤类型SOC_D差异程度较大。从变异系数来看,石质土的变异系数最高,为36.48%,其次为紫色土,变异系数为19.03%,其余土类除新积土为15.37%之外,变异系数均在15%以下,说明这2种土壤SOC_D空间变化较为明显。2022年三门峡市棕壤、褐土、黄棕壤和潮土的平均SOC_D较高,石质土、风沙土、新积土和紫色土的变异系数较大。同时,除褐土、黄褐土、石质土、紫色土和棕壤之外,其余土类SOC_D变异系数均有所增加,说明现状条件下三门峡市不同类型土壤的SOC_D在空间分布上差异不断增加。对比2年的数据可以看

表1 1986–2022年三门峡市耕地表层SOC_D
Table 1 SOC_D of cultivated land surface in Sanmenxia City from 1986 to 2022

土壤类型	图斑数/ 个	1986年SOC _D / (kg·m ⁻²)	2022年SOC _D / (kg·m ⁻²)	ΔSOC _D / (kg·m ⁻²)	SOCR/ (kg·m ⁻² ·a ⁻¹)	1986年变异系数/ %	2022年变异系数/ %
潮土	1 608	7.78±0.59	6.85±0.57	-0.93	-0.026	7.58	8.32
粗骨土	9 207	6.83±0.89	4.27±0.65	-2.56	-0.071	13.03	15.22
风沙土	221	1.38±0.17	1.30±0.41	-0.08	-0.002	12.32	31.54
褐土	78 133	7.64±1.13	7.17±0.86	-0.47	-0.013	14.79	11.99
红黏土	17 475	5.15±0.36	5.71±0.72	0.56	0.016	6.99	12.61
黄褐土	880	6.61±0.42	5.44±0.18	-1.17	-0.033	6.35	3.31
黄棕壤	1 920	10.47±1.21	6.91±0.90	-3.56	-0.099	11.56	13.02
石质土	339	1.59±0.58	1.32±0.42	-0.27	-0.008	36.48	31.82
新积土	156	4.49±0.69	4.56±0.82	0.07	0.002	15.37	17.98
紫色土	247	4.94±0.94	4.34±0.75	-0.6	-0.017	19.03	17.28
棕壤	5 225	13.47±0.89	11.91±0.65	-1.56	-0.043	6.61	5.46
总计	115 411	7.47±1.67	6.87±1.96	-0.6	-0.017	22.36	28.53

注: SOC_D数据表示为平均有机碳密度+标准差。

出,三门峡市11种土壤类型中,仅有红黏土和新积土的SOCD有所增加,其余土类均呈现下降状态。黄棕壤、粗骨土、棕壤、黄褐土和潮土的SOCD减少较多,高于平均水平 0.6 kg/m^2 ,新积土、风沙土和石质土的SOCD减少较少,不到平均SOCD减少值的一半。

同时,根据三门峡市耕地表层两期SOCD数据,计算得到平均SOCD变化速率。可以看出,三门峡市耕地表层SOCD年平均变化速率为 $-0.017 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,其中红黏土呈现最大正增长速率,为 $0.016 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,接近三门峡市整体SOCD变化速率。黄棕壤呈现出最大负增长速率,为 $-0.099 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。总的来看,从1986年到2022年,三门峡市碳固存能力以 $0.017 \text{ kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 的速率缓慢下降,但不同土壤类型SOCD增减速率有所

差异。

对比三门峡市1986年和2022年耕地表层SOCD频率直方图(图1),可以看出2022年三门峡市SOCD的分布更为集中,分布趋势接近于正态分布。从分布区间来看,1986年三门峡市SOCD集中分布在 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$,2022年三门峡市SOCD集中分布在 $5 \sim 7.5 \text{ kg/m}^2$,两者在 7.5 kg/m^2 左右的土壤占比最多。从分布态势来看,1986和2022年三门峡市SOCD均呈现不均匀分布。从分布频率来看,30年以来,三门峡市SOCD在 $0 \sim 5 \text{ kg/m}^2$ 之间的比例由6.75%升高为10.59%,在 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$ 之间的比例由86.48%减少至84.85%,在 $10 \sim 15 \text{ kg/m}^2$ 之间的比例由6.77%减少至4.56%。

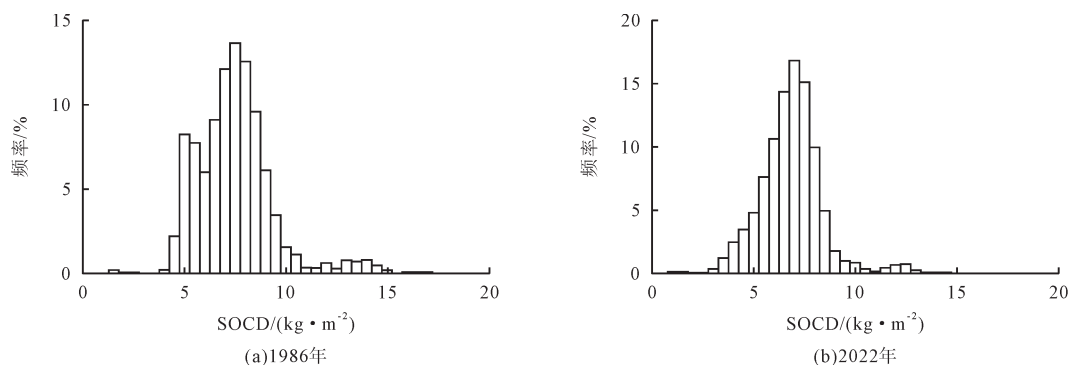


图1 1986年和2022年三门峡市耕地表层SOCD频率分布情况

Fig.1 SOCD frequency distribution of cultivated land surface in Sanmenxia City in 1986 and 2022

2.1.2 SOCD空间变化情况

将1986年和2022年三门峡市耕地表层SOCD与土壤类型数据库进行空间连接,得到三门峡市耕地表层SOCD空间分布图(图2)。可以看出,1986-2022年三门峡市耕地表层SOCD空间分布差异较大。1986年三门峡市SOCD总体上呈现西部和南部高、北部和东部低的分布态势,大部分区域的SOCD在 $5 \sim 10 \text{ kg/m}^2$,

集中分布在灵宝市、湖滨区、义马市和陕州区,渑池县的南部和卢氏县的北部区域也有分布。SOCD的高值区域集中分布在卢氏县的南部,低值区域分布在灵宝市北部和渑池县东部区域。这是由于1986年三门峡市棕壤和黄棕壤的SOCD较高,它们集中分布在卢氏县南部区域,而风沙土和石质土的SOCD较低,它们分布在灵宝市北部区域。2022年三门峡市

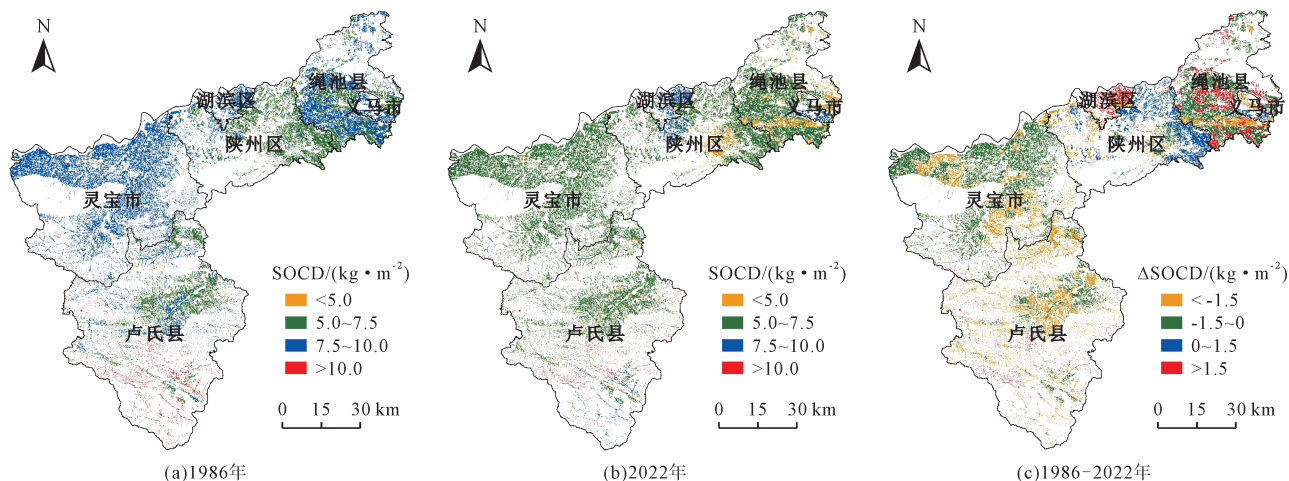


图2 1986-2022年三门峡市耕地表层SOCD空间变化分布图

Fig.2 Spatial distribution of SOCD on cultivated land surface in Sanmenxia City from 1986 to 2022

SOCD分布更加均匀,整体来看,大部分区域的SOCD在5~7.5 kg/m²,集中分布在灵宝市、湖滨区、义马市、渑池县和卢氏县北部。湖滨区和义马市全域范围的SOCD较高,均在7.5 kg/m²以上,该区域的土壤分布以潮土为主。陕州区南部、渑池县南部和灵宝市北部的SOCD较低,该区域的土壤类型为风沙土和红黏土。1986–2022年,三门峡市耕地表层SOCD主要呈现减少态势,减少值大多在1.5 kg/m²以上,减少值区域比较零星,主要分布在灵宝市、卢氏县北部、陕州区西部。SOCD增加的区域比较集中,主要分布在湖滨区、渑池县和义马市。

2.2 1986–2022年三门峡市耕地表层SOC储量变化情况

根据公式(3)对三门峡市耕地表层不同类型土壤SOC储量及变化情况进行了统计(表2)。总体看来,1986–2022年三门峡市耕地表层SOC储量减少了1.32×10⁹ kg,除了红黏土和新积土增加外其他类型土壤SOC储量,均有所减少。从不同类型的土壤来看,

三门峡市分布最多的褐土SOC储量最大,1986年和2022年的储量均占三门峡市耕地表层SOC总储量的73%,石质土、风沙土、新积土和紫色土的SOC储量最小,在0.01 Tg左右。从不同年份来看,各类型土壤SOC储量没有随着时间推移而变化。1986年SOC储量较高的土壤类型为褐土、红黏土、粗骨土和棕壤,到2022年没有发生显著变化,这是由于每种类型土壤的SOCD变化程度不足以弥补各类型土壤的内在差异。从不同类型土壤SOC储量变化情况来看,1986–2022年,褐土的SOC储量减少最多,为0.961 Tg,占减少总量的73%,这与褐土的分布情况最多有直接联系,其次为红黏土、粗骨土和棕壤,这与每一年中不同类型土壤的SOC储量相近。同样,石质土、新积土和紫色土的SOC储量没有发生明显变化,这是由于3种类型的土壤分布较少,同时SOCD变化也不明显。可以看出,在SOCD变化较少的情况下,不同类型土壤SOC储量和SOC储量的变化主要受其分布数量的影响。

表2 1986–2022年三门峡市耕地表层SOC储量变化
Table 2 SOC reserves of cultivated land surface in Sanmenxia City during 1986–2022

土壤类型	图斑数	面积/km ²	1986年SOC储量/kg	2022年SOC储量/kg	ΔSOC储量/kg
潮土	1 608	26.41	2.45×10 ⁸	1.79×10 ⁸	-6.6×10 ⁷
粗骨土	9 207	109.02	7.68×10 ⁸	4.62×10 ⁸	-3.06×10 ⁸
风沙土	221	4.67	8×10 ⁶	6×10 ⁶	-2×10 ⁶
褐土	78 133	1581.41	12.297×10 ⁹	11.336×10 ⁹	-9.61×10 ⁸
红黏土	17 475	437.07	2.273×10 ⁹	2.491×10 ⁹	2.18×10 ⁸
黄褐土	880	13.53	9.4×10 ⁷	7.3×10 ⁷	-2.1×10 ⁷
黄棕壤	1 920	23.68	2.53×10 ⁸	1.65×10 ⁸	-8.8×10 ⁷
石质土	339	5.17	8×10 ⁶	7×10 ⁶	-1×10 ⁶
新积土	156	2.76	1.2×10 ⁷	1.3×10 ⁷	1×10 ⁶
紫色土	247	2.55	1.4×10 ⁷	1.1×10 ⁷	-3×10 ⁶
棕壤	5 225	47.75	6.52×10 ⁸	5.65×10 ⁸	-8.7×10 ⁷
总计	115 411	2 254.03	16.624×10 ⁹	15.308×10 ⁹	-1.316×10 ⁹

2.3 三门峡市耕地表层土壤固碳潜力

2.3.1 土壤碳库饱和水平

根据1.3.4节计算方法,得到1986年SOCD和1986–2022年SOCD变化量之间的拟合关系方程(图3)。当ΔSOCD为0时,所对应的SOCD₁₉₈₆即为该类土壤达到饱和状态下的SOCD,表示1986年土壤碳库在时间推移下,SOCD都会趋近平衡状态。以三门峡市潮土为例,在气温、降水、施肥条件等保持不变的理想状态下,SOCD₁₉₈₆较低,未达到饱和状态,而ΔSOCD为正值。当达到饱和状态时,ΔSOCD变为0,该状态下的SOCD是土壤碳库达到稳定时的数值。如果SOCD继续增加超过饱和水平时,ΔSOCD将变为负值,SOCD呈现降低趋势。另一种条件下,当初始条件下SOCD较高,现状SOCD均小于初始SOCD,ΔSOCD全部变为负值,说明饱和状态下的

SOCD小于初始值,该类土壤的SOCD随着时间推移一直呈现下降趋势。如图3中黄褐土在饱和水平下的SOCD小于1986年初始SOCD的最小值,并且随着SOCD的增加,SOCD变化幅度不断增大,说明黄褐土的SOCD在近30年来在不断下降。从图3也可以看出,红黏土的R²最接近1,说明红黏土SOCD的拟合程度最高,而褐土SOCD的R²为0.387 1,分布最为离散。

根据图3统计了三门峡市耕地表层不同类型土壤碳库的饱和水平(表3)。可以看出,三门峡市棕壤碳库在达到饱和状态时SOCD最高,为11.86 kg/m²,其次为褐土、黄棕壤和潮土。风沙土的土壤碳库在达到饱和状态时SOCD最低,为0.95 kg/m²,其次为石质土。粗骨土、黄褐土、新积土和紫色土的土壤碳库在达到状态时的SOCD均在4 kg/m²左右。

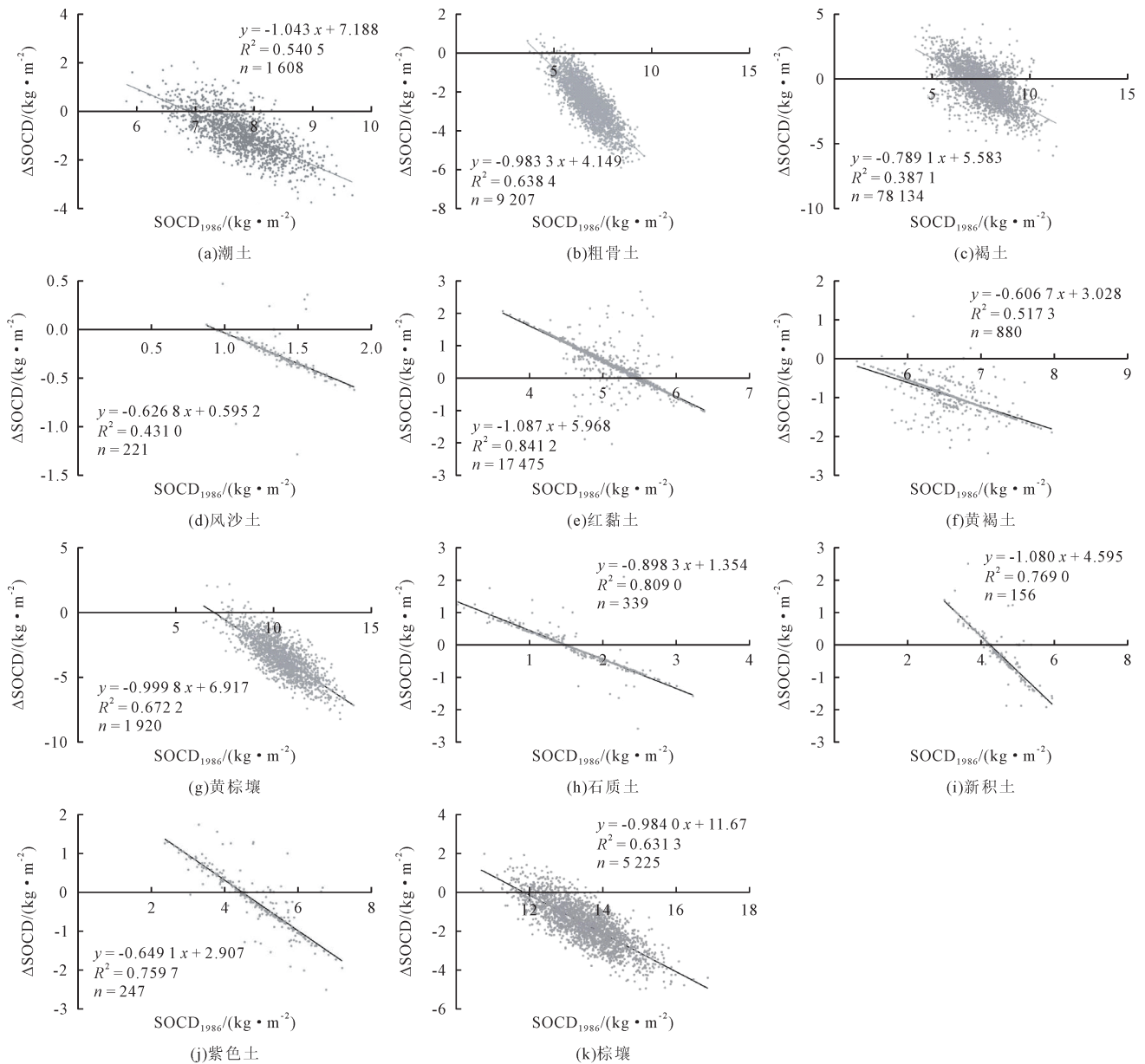


图3 1986–2022年三门峡市耕地表层SOC变化量与初始SOC的拟合关系

Fig.3 Fitting relationship between surface SOC change and initial SOC in Sanmenxia City from 1986 to 2022

表3 三门峡市耕地表层土壤碳库饱和水平

Table 3 Soil carbon pool saturation level of cultivated land in Sanmenxia City

土壤类型	拟合曲线	图斑数/个	相关系数/ R^2	土壤碳库饱和水平/($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$)
潮土	$y = -1.043x + 7.188$	1 608	0.540 5	6.89
粗骨土	$y = -0.9833x + 4.149$	9 207	0.638 4	4.22
风沙土	$y = -0.6268x + 0.5952$	221	0.431 0	0.95
褐土	$y = -0.7891x + 5.583$	78 134	0.387 1	7.08
红黏土	$y = -1.087x + 5.968$	17 475	0.841 2	5.49
黄褐土	$y = -0.6067x + 3.028$	880	0.517 3	4.99
黄棕壤	$y = -0.9998x + 6.917$	1 920	0.672 2	6.92
石质土	$y = -0.8983x + 1.354$	339	0.809 0	1.51
新积土	$y = -1.080x + 4.595$	156	0.769 0	4.25
紫色土	$y = -0.6491x + 2.907$	247	0.759 7	4.48
棕壤	$y = -0.9840x + 11.67$	5 225	0.631 3	11.86

2.3.2 土壤固碳潜力计算

在一定土地利用方式和地形、气候、母质条件下，土壤有机碳在不断变化后达到一个稳定状态，该状态下

的SOCD与初始状态SOCD的差值即为固碳潜力^[33]。利用三门峡市耕地表层不同类型土壤在饱和状态下的SOCD和初始SOCD，计算得到每种土壤的SOCD

潜力,再根据每种类型土壤的面积计算得到土壤固碳潜力(表4)。可以看出,三门峡市耕地表层土壤在气候环境、利用方式、耕作条件不变的情况下,土壤固碳潜力为 -2.57×10^8 kg。这表明1986–2022年,三门峡市耕地表层土壤为碳源区,在1986年土壤需要释放 2.57×10^8 kg的碳才能使整体逐渐达到稳定状态。从三门峡市11种土壤的固碳潜力来看,潮土、黄棕壤、石质土和紫色土的固碳潜力为正值,呈现为碳汇区。粗骨土、风沙土、褐土、红黏土、黄褐土、新积土和棕壤的固碳潜力为负值,呈现为碳源区。其中,呈现碳汇区的4种土壤的固碳潜力仅为 1×10^6 kg,而固碳潜力最低的土壤类型为褐土,为 -1.49×10^8 kg。结合不同土壤类型的SOC D变化速率可以看出,红黏土和新积土的初始SOC D较

低,SOC D变化速率较大,但是固碳潜力较低。潮土、黄棕壤、石质土和紫色土的初始SOC D较高,SOC D变化速率较小,但固碳潜力较高。这是由于三门峡市区域内的红黏土和新积土耕作层熟化程度较低,土地紧实,起始容重较大,不利于土壤有机碳微生物的分解,影响土壤固碳。而其余土类,如潮土的面积较广,人为施肥量大,田耕熟化程度较高,有利于土壤有机碳的累积。此外,黏粒含量也会影响SOC D变化速率,红黏土和新积土的黏粒含量高于40%,较高的黏粒含量也有利于碳的累积。总的来看,三门峡市耕地表层土壤在现有的农业模式下的固碳潜力较低,需要优化农业管理措施,并通过耕作方式的改变提高土壤固碳潜力,使整体呈现碳汇区。

表4 三门峡市耕地表层土壤固碳潜力
Table 4 Carbon sequestration potential of cultivated surface soil in Sanmenxia City

土壤类型	图斑数/个	面积/km ²	2022年SOC D/(kg·m ⁻²)	饱和状态SOC D/(kg·m ⁻²)	SOC D潜力/(kg·m ⁻²)	固碳潜力/kg
潮土	1 608	26.41	6.85	6.89	0.04	1×10^6
粗骨土	9 207	109.02	4.27	4.22	-0.05	-5×10^6
风沙土	221	4.67	1.30	0.95	-0.35	-2×10^6
褐土	78 133	1 581.41	7.17	7.08	-0.09	-1.49×10^8
红黏土	17 475	437.07	5.71	5.49	-0.22	-9.6×10^7
黄褐土	880	13.53	5.44	4.99	-0.45	-6×10^6
黄棕壤	1 920	23.68	6.91	6.92	0.01	1×10^6
石质土	339	5.17	1.32	1.51	0.19	1×10^6
新积土	156	2.76	4.56	4.25	-0.31	-1×10^6
紫色土	247	2.55	4.34	4.48	0.14	1×10^6
棕壤	5 225	47.75	11.91	11.86	-0.05	-2×10^6
总计	115 411	2 254.03	5.43	—	—	-2.57×10^8

3 讨论

土壤有机碳和固碳潜力研究已成为全球气候变化研究的重点,与生态系统健康状况息息相关。本研究从点位尺度上对河南省典型山区——三门峡市耕地表层土壤固碳潜力进行了分析,对于河南省乃至黄淮海平原麦玉土壤固碳潜力的提升具有参考价值。河南省是我国重要的农业大省,小麦和玉米耕作下的农田面积达到总农田面积的90.92%,但受到土壤污染影响,土壤SOC含量普遍较低^[34]。本研究得到1986年和2022年平均SOC D为 7.47 kg/m^2 和 6.87 kg/m^2 ,有机碳储量为 $1.66 \times 10^{10} \text{ kg}$ 和 $1.53 \times 10^{10} \text{ kg}$,总固碳潜力为 $-2.57 \times 10^8 \text{ kg}$ 。而全国旱地表层(0~19.4 cm)SOC D平均含量为 9.6 kg/m^2 ,同时根据王美艳等^[35]样本调查结果,在黄淮海区域中,河南省0~20 cm土壤SOC含量与河北省、江苏省和安徽省相比较低,因此还具有较大的固碳潜力。

影响土壤有机碳的因素相对较多,成土环境和成土特征是影响初始土壤有机碳含量的重要因素。其中环境中的植被覆盖、植物残体腐解和矿化也直接影

响土壤有机碳的变化。多位学者研究发现,随着城镇化的不断加快,人为扰动是导致土壤有机碳密度变化和影响土壤固碳潜力的重要原因^[36]。在旱作农业的核心区域,传统的人为耕作加速了土壤有机碳的流失,因而有机碳密度和固碳潜力较低。而拥有较高森林植被的区域,人为扰动较小,土壤有机碳密度和固碳潜力相对较高。在今后的农业生产生活中,可以通过少耕、免耕和秸秆还田相结合来代替传统的耕作方式。政府应该鼓励农民改善农业管理措施,同时采取激励政策,不仅可以提升土壤固碳潜力,也可以改善农业生态环境。

4 结论

本研究以河南省典型山区三门峡市为例,运用土壤类型法和平衡法分析了不同耕地表层土壤类型有机碳密度和碳储量,计算了土壤固碳潜力。研究发现,1986–2022年,三门峡市耕地表层土壤有机碳密度总体呈现降低趋势,变异程度增加。在空间上,1986年三门峡市耕地表层土壤有机碳密度呈现南部高、北部和东部低的态势,2022年则更加均匀。与此同时,

1986–2022年土壤有机碳储量减少了 1.32×10^9 kg,土壤固碳潜力为 -2.57×10^8 kg,整体呈现为碳源区。其中,粗骨土、风沙土、褐土、红黏土、黄褐土、新积土和棕壤的固碳潜力较低,潮土、黄棕壤、石质土和紫色土固碳潜力较高。

本研究在运用平衡法估算固碳潜力时,假设研究区域的土地利用方式、耕作方式等保持不变。但在实际中农民会根据不同的管理措施和作物品种对农业生产条件进行调整。此外,降雨量、湿度、温度和极端天气等条件也会对土壤SOC理化性质和变化过程产生影响。同时,本研究的两期土壤数据在采样和分析方法上差异较大,第二次全国土壤普查数据已经不能全面反映土壤目前的状态。在后续研究中,将根据第三次全国土壤普查数据进行更新,同时对应用情景进行多元化考量,获取更多农业生产信息,保证研究成果的实时性和实用性。

[参考文献]

- [1] Batjes N H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world[J]. *European Journal of Soil Science*, 2014,65(1):2–3.
- [2] Houghton R A. Revised estimates of the annual net flux of carbon to the atmosphere from changes in land use and land management 1850–2000[J]. *Tellus B: Chemical and Physical Meteorology*, 2003,55(2):378–390.
- [3] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004,304(5677):1623–1627.
- [4] 王建伟,李东晓,王红光,等. 中国典型农业生态系统的固碳减排现状、影响因素及减排措施[J]. *中国农学通报*, 2024,40(6):67–74.
Wang Jianwei, Li Dongxiao, Wang Hongguang, et al. Status of carbon sequestration and emission reduction, influencing factors and emission reduction measures in typical agro-ecosystem in China[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2024,40(6):67–74.
- [5] 霍丽丽,姚宗路,赵立欣,等. 我国农业农村减排固碳标准现状与体系构建[J]. *农业环境科学学报*, 2023,42(2):242–251.
Huo Lili, Yao Zonglu, Zhao Lixin, et al. Current status and construction of a standard system for greenhouse gas emission mitigation and carbon sequestration in agricultural and rural areas of China[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2023,42(2):242–251.
- [6] 谢立勇,杨育蓉,赵洪亮,等. “双碳”战略背景下农业与农村减排技术路径分析[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022,30(4):527–534.
Xie Liyong, Yang Yurong, Zhao Hongliang, et al. Technical pathways of mitigating greenhouse gases emission from agriculture and rural areas under double-carbon strategy[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2022,30(4):527–534.
- [7] 张琳,邵景安. 未来30年川东平行岭谷区县域农田SOC动态模拟[J]. *中国生态农业学报*, 2017,25(12):1848–1857.
Zhang Lin, Shao Jing'an. Dynamic simulation of farmland SOC in parallel ridge valley area in eastern Sichuan in the next 30 years[J]. *Chinese Journal of Eco-agriculture*, 2017,25(12):1848–1857.
- [8] 张蕊,赵学勇,王瑞雄,等. 干旱半干旱区土地利用/覆被类型变化对土壤有机碳动态影响的研究进展[J]. *生态学杂志*, 2024,43(7):2222–2230.
Zhang Rui, Zhao Xueyong, Wang Ruixiong, et al. Review of the effects of land use/cover change on soil organic carbon dynamic in arid and semi-arid areas[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2024,43(7):2222–2230.
- [9] Liang B C, VandenBygaart A J, MacDonald J D, et al. Re-visiting no-till's impact on soil organic carbon storage in Canada[J]. *Soil and Tillage Research*, 2020,198:104529.
- [10] 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.
- [11] 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*, 2022,59(5):1293–1305.
Wu Shirong, Wei Jia, Qiu Longxia, 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.
- [12] 孟和,郭月峰,张美丽,等. 小流域梯田土壤有机碳含量及其固碳潜力[J]. *江苏农业科学*, 2019,47(4):237–241.
Meng He, Guo Yuefeng, Zhang Meili, et al. Study on soil organic carbon content and carbon sequestration potential of terraced soil in small watershed[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019,47(4):237–241.
- [13] 姜蓝齐,臧淑英,张丽娟,等. 松嫩平原农田土壤有机碳变化及固碳潜力估算[J]. *生态学报*, 2017,37(21):7068–7081.
Jiang Lanqi, Zang Shuying, Zhang Lijuan, et al. Temporal and spatial variations of organic carbon and evaluation of carbon sequestration potential in the agricultural topsoil of the Songnen Plain[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017,37(21):7068–7081.
- [14] 于建军,杨锋,吴克宁,等. 河南省土壤有机碳储量及空间分布[J]. *应用生态学报*, 2008,19(5):1058–1063.
Yu Jianjun, Yang Feng, Wu Kening, et al. Soil organic carbon storage and its spatial distribution in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2008,19(5):1058–1063.
- [15] 张婧婷,石浩,田汉勤,等. 1981–2019年华北平原农田土壤

- 有机碳储量的时空变化及影响机制[J]. 生态学报, 2022,42(23):9560-9576.
- Zhang Jingting, Shi Hao, Tian Hanqin, et al. Spatial-temporal changes of farmland soil organic carbon storage in North China Plain from 1981 to 2019 and its influencing mechanism[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022,42(23):9560-9576.
- [16] 赵占辉. 河南省典型农田土壤有机碳时空分异特征研究[D]. 焦作:河南理工大学, 2019.
- Zhao Zhanhui. Spatiotemporal Differentiation of Soil Organic Carbon in Typical Farmland in Henan Province[D]. Jiaozuo: Henan Polytechnic University, 2019.
- [17] 谷志云,廖诗进,赵新雷,等. 郑州市耕地表层土壤有机碳量分布特征[J]. 灌溉排水学报, 2024,43(6):93-98.
- Gu Zhiyun, Liao Shijin, Zhao Xinlei, et al. Spatial distribution of soil organic carbon in the plough layer in the region of Zhengzhou[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2024,43(6):93-98.
- [18] 王世航,史学正,赵永存,等. 推荐管理措施情景下黄淮海地区旱地土壤固碳潜力模拟研究:以河南省获嘉县为例[J]. 生态环境学报, 2011,20(3):403-408.
- Wang Shihang, Shi Xuezheng, Zhao Yongcun, et al. Simulation of carbon sequestration potential for dryland soils under recommended management practice scenarios in the Huang-Huai-Hai Region: a case study of Huojia County in Henan Province[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011,20(3):403-408.
- [19] 覃章才,黄耀. 基于模型的农田土壤固碳潜力估算[J]. 中国科学:生命科学, 2010,40(7):658-676.
- Qin Zhangcai, Huang Yao. Estimation of carbon sequestration potential of farmland soil based on model[J]. *Scientia Sinica: Vitae*, 2010,40(7):658-676.
- [20] 赵彦锋,李怡欣,马盼盼,等. 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, et al. 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.
- [21] 秦艳培,徐少君,田耀武. 黄河流域河南段植被和土壤及其碳密度空间分异研究[J]. 生态环境学报, 2022,31(9):1745-1753.
- Qin Yanpei, Xu Shaojun, Tian Yaowu. The spatial differentiation of vegetation and soil carbon density in Henan section of the Yellow River Basin[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2022,31(9):1745-1753.
- [22] 史彦松,阿依吐尔逊 沙木西,徐腾,等. 农户耕地保护积极性的现状分析:以河南省三门峡市为例[J]. 中南农业科技, 2022(1):106-108.
- Shi Yansong, Shamusi Aithurson, Xu Teng, et al. Analysis on the current situation of farmers' enthusiasm for farmland protection: a case study of Sanmenxia City, Henan Province [J]. *South-Central Agricultural Science and Technology*, 2022(1):106-108.
- [23] 陈玉琴. 三门峡市园林地被植物应用研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2011.
- Chen Yuqin. Study on the Application of Garden Ground Cover Plants in Sanmenxia City[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2011.
- [24] 魏克循,马国明. 河南土壤[M]. 北京:中国农业出版社, 2004.
- [25] 杨锋,吴克宁,吕巧灵. 基于1:20万数据库的河南省土壤空间分异及其影响因素研究[J]. 中国农学通报, 2008,24(1):425-430.
- Yang Feng, Wu Kening, Lyu Qiaoling. Spatial heterogeneity of soil properties and their affecting factors: a case study based on 1:200 000 soil database of Henan Province[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2008,24(1):425-430.
- [26] 鲍丽然,李瑜,张风雷,等. 重庆市表层土壤有机碳空间分布、影响因素及对碳减排的贡献[J]. 中国地质, 2024,51(5):1501-1512.
- Bao Liran, Li Yu, Zhang Fenglei, et al. Spatial distribution, influencing factors and contribution to carbon emission reduction of topsoil organic carbon in Chongqing, China[J]. *Geology in China*, 2024,51(5):1501-1512.
- [27] 林子奇,王培俊,刘旗,等. 2005-2020年淮海经济区耕地碳储量时空演变特征及碳汇区识别[J]. 农业工程学报, 2022,38(19):259-268.
- Lin Ziqi, Wang Peijun, Liu Qi, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of cultivated land carbon storage and identification of carbon sink areas in Huaihai economic zone from 2005 to 2020[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022,38(19):259-268.
- [28] 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.
- Zhao Yongcun, Xu Shengxiang, Wang Meiyang, 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.
- [29] 鲁晶晶,周智彬,闫冰,等. 绿洲化过程中塔里木地区农田土壤固碳速率与驱动因素分析[J]. 干旱区研究, 2016,33(6):1325-1335.
- Lu Jingjing, Zhou Zhibin, Yan Bing, et al. Cropland soil organic carbon sequestration rate and its affecting factors in the oasisization process of the irrigating area in the Tarim

- Basin[J]. *Arid Zone Research*, 2016,33(6):1325-1335.
- [30] 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(4):914-922.
- Zhang Li, Jin Jingze, Jiang Xia, 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(4):914-922.
- [31] 刘国栋,李瑛,张立,等. 松嫩平原耕层土壤固碳潜力估算[J]. *中国地质*, 2014,41(2):658-664.
- Liu Guodong, Li Ying, Zhang Li, et al. The estimation of soil carbon sequestration potential in Songnen Plain[J]. *Geology in China*, 2014,41(2):658-664.
- [32] 师晨迪,曹婷婷,刘洋洋. 土壤固碳潜力估算方法研究进展[J]. *湖北农业科学*, 2019,58(S1):4-6.
- Shi Chendi, Cao Tingting, Liu Yangyang. A review of estimation methods of soil carbon sequestration potential[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2019,58(S1):4-6.
- [33] 代杰瑞,庞绪贵,董健,等. 山东省土壤有机碳库及其时空变化特征[J]. *现代地质*, 2017,31(2):386-393.
- Dai Jierui, Pang Xugui, Dong Jian, et al. Soil organic carbon pool and temporal variation characteristics in Shandong Province[J]. *Geoscience*, 2017,31(2):386-393.
- [34] 梁二,王小彬,蔡典雄,等. 河南省土壤有机碳分布空间自相关分析[J]. *应用生态学报*, 2007,18(6):1305-1310.
- Liang Er, Wang Xiaobin, Cai Dianxiong, et al. Spatial autocorrelation analysis on soil organic carbon distribution in Henan Province[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007,18(6):1305-1310.
- [35] 王美艳,史学正,于东升,等. 黄淮海农业区旱地土壤有机碳变异性的空间尺度效应[J]. *土壤*, 2013,45(4):648-654.
- Wang Meiyan, Shi Xuezheng, Yu Dongsheng, et al. Scale effects of soil organic carbon variability of uplands in Huang-Huai-Hai agriculture region of China[J]. *Soils*, 2013, 45(4):648-654.
- [36] 罗怀良. 中国农田作物植被碳储量研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014,23(4):692-697.
- Luo Huailiang. Advances on carbon storage in crops of China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2014,23(4):692-697.