

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.10.002

基于 CENTURY 模型的淮南市 农田土壤有机碳动态模拟

吴安云¹, 李湘凌^{1,2}, 赵燕¹, 马雷¹, 宋仁亮³, 张春雷⁴

(1. 合肥工业大学 资源与环境工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 安徽省矿产资源与矿山环境工程技术研究中心, 安徽 合肥 230009;
3. 安徽省地质环境监测总站, 安徽 合肥 230001; 4. 安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源监督检测中心), 安徽 合肥
230041)

摘要: 农田土壤长期受到人类干预, 与自然土壤相比, 其碳周转强度更大。研究农田土壤有机碳的时空分布有利于推动区域生态系统碳储量管理, 对实现“双碳”目标有重要意义。文章以淮南市农田生态系统为研究对象, 运用 CENTURY 模型模拟淮南市农田耕层(0~20 cm)土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)在 1961—2023 年的变化趋势。结果表明: CENTURY 模型在淮南市农田生态系统中有着良好的适用性; 1961—2023 年淮南市农田 SOCD 呈增长趋势, 2023 年 SOCD 均值为 3.16 kg/m², 其中土壤缓性有机碳累积最强, 活性有机碳累积最弱; SOCD 呈现东北部、中南部高, 西北部低的空间分布格局; 气温、降水、pH 值、容重和农田管理均对土壤有机碳累积产生影响。研究显示, 淮南市农田土壤有着较好的碳储存能力。

关键词: 土壤有机碳; CENTURY 模型; 时空分布; 农田

中图分类号: X142

文献标志码: A

文章编号: 1003-5060(2024)10-1305-09

Simulation of soil organic carbon dynamics in farmland in Huainan City based on CENTURY model

WU Anyun¹, LI Xiangling^{1,2}, ZHAO Yan¹, MA Lei¹, SONG Renliang³, ZHANG Chunlei⁴

(1. School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Anhui Province Engineering Research Center for Mineral Resources and Mine Environments, Hefei 230009, China; 3. Anhui Institute of Geo-Environment Monitoring, Hefei 230001, China; 4. Anhui Institute of Geological Experiments(Hefei Mineral Resources Supervision and Testing Center of Ministry of Land and Resources), Hefei 230041, China)

Abstract: Farmland soil has been subject to long-term human intervention, and its carbon turnover intensity is greater than that of natural soil. Studying the spatiotemporal distribution of organic carbon in farmland soils is conducive to promoting the management of regional ecosystem carbon stock, which is of great significance for realizing the carbon peaking and carbon neutrality goals. This paper took the farmland ecosystem in Huainan City as the research object, and used the CENTURY model to simulate the variation trend of soil organic carbon density(SOCD) in the cultivated layer(0-20 cm) of farmland in Huainan City from 1961 to 2023. The results showed that the CENTURY model is applicable to the farmland ecosystem in Huainan City. The SOCD of farmland soils in Huainan City showed an increasing trend from 1961 to 2023, and the average value of SOCD in 2023 was 3.16 kg/m², with the strongest accumulation of slow soil organic carbon and the weakest accumulation of active soil organic carbon. The spatial distribution pattern of SOCD was high in the northeast and south-central

收稿日期: 2023-12-11; 修回日期: 2024-01-30

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(42072276); 安徽省公益性地质调查资助项目(2021-g-27)

作者简介: 吴安云(1998—), 男, 安徽宣城人, 合肥工业大学硕士生;

李湘凌(1969—), 女, 四川遂宁人, 合肥工业大学副教授, 硕士生导师, 通信作者, E-mail: lixiangling-hfut@126.com.

parts of the city, and low in the northwest. Air temperature, precipitation, pH value, bulk density and farmland management all had an effect on soil organic carbon accumulation. The study showed that farmland soils in Huainan City have good carbon storage capacity.

Key words: soil organic carbon; CENTURY model; spatiotemporal distribution; farmland

0 引 言

土壤碳库是陆地生态系统最主要、最活跃的碳库^[1-2]。土壤有机碳是土壤碳库中的重要组成部分,对提升土壤碳库的减排增汇能力有着重要的作用^[3-4]。与自然土壤相比,农田有机碳周转更加活跃且更容易受到人类活动的影响,其微小的改变都可能导致区域或者全球的碳循环受到影响^[5-7]。科学评估农田有机碳储量及演化趋势,在人类活动及气候变化的情境下研究农田有机碳储量动态演化是实现“双碳”目标的重要工作内容。土壤有机碳密度(soil organic carbon density, SOCD)是在土壤有机碳含量(soil organic carbon content, SOCC)基础上,纳入土壤的厚度、容重和粒径等信息,可综合反映土壤厚度、有机碳含量和有机碳周转特性^[4],是土壤有机碳演化研究工作的基础。根据有机碳的周转特性,SOCD 分为活性土壤有机碳密度(active soil organic carbon density, ASOCD)、缓性土壤有机碳密度(slow soil organic carbon density, SSOCD)和惰性土壤有机碳密度(passive soil organic carbon density, PSOCD)^[8]。

目前土壤有机碳演化研究的生物地球化学模型主要包括 CENTURY、RothC 和 DNDC 等,相较于其他模型,CENTURY 模型能够在数据需求相对较少的情况下,根据具体地区或生态系统的特点对模型内部参数进行调整和校准,从而被广泛应用于草原、农田和森林等生态系统的土壤碳演化研究^[9-10]。

众多研究者基于 CENTURY 模型探讨了不同情境下的土壤碳演化及影响因素^[11-12],研究发现甘南高寒草甸在陆地碳循环中的作用随时间和空间而变化^[13]。文献^[14]对内蒙古荒漠草原的研究发现降雨对土壤有机碳及其各组分库均有着极显著影响;文献^[15]模拟出 0~20 cm 的东北黑土在 5 000 多年时间跨度下 SOCD 可自然累积稳定到 7.9~11.7 kg/m²;文献^[16]模拟研究不同气候变化情景下的意大利东北部耕地土壤固碳潜力,发现人类活动和农业生态系统管理对碳平衡的影响比气候变化更强烈。

基于 CENTURY 模型开展的农田土壤碳演化研究过程中,由于区域差异性必然导致土壤理化性质、气候条件和农田管理措施等差异显著,为保证 CENTURY 模型在不同地区或生态系统中有良好的适应性,模型参数化是模型应用必要环节和前提^[10]。

淮南市境属于淮河流域,处于亚热带向暖温带的过度带,兼具南北气候的特点,是安徽省重要的粮食产地之一,以水稻/小麦一年两熟的种植制度为主。近年来的研究工作主要集中于土壤有机碳监测和评价^[17-18],缺乏长时序的农田有机碳时空演化及其影响因素的研究。淮南市的农田生态系统有机碳变化对淮河流域土壤有机碳的研究具有重要影响,以其作为研究对象对淮河流域的有机碳动态分析具有重要意义。因此,本文基于 CENTURY 模型开展淮南市农田土壤有机碳长时序的动态变化趋势及影响因素研究,为科学评估淮南市农田土壤固碳潜力和农田管理提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

淮南市位于安徽省的中北部,地理位置处于北纬 31°54'8"~33°00'26"与东经 116°21'5"~117°12'30"之间,淮南市的土壤类型及样点分布如图 1(基于自然资源部网站下载的审图号为 GS(2019) 333 的标准地图绘制,底图无修改)所示。土壤类型是根据《淮南土壤》与《寿县土壤》重绘的^[19-20]。

由于光照充足、热量丰富、降水量适中、无霜周期长,适宜于稻、麦、油菜、豆类等多种粮食作物和经济作物的种植、生长,有利于农业生产的持续发展。淮南市的土类主要包括有水稻土、黄棕壤、砂姜黑土、潮土、石灰土、紫色土和粗骨土等,其中以水稻土、黄棕壤、砂姜黑土和潮土为主,气候和土地资源的多样性决定了淮南市农业生产的多样性,为淮南市的农业发展提供了一个良好的基础。淮南市粮食种植面积 52.99×10⁴ hm²,2021 年全年粮食产量 317.06×10⁴ t,是安徽省重要的粮食产地。

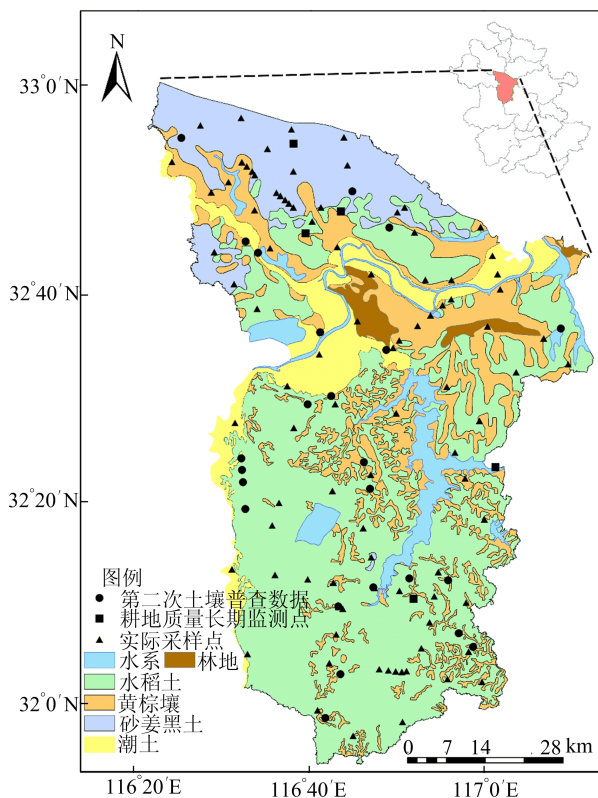


图 1 淮南市土壤类型及样点分布

1.2 数据来源

本文基于 CENTURY 4.5 开展农田土壤有机碳演化研究。模型数据分为气候数据、土壤运行/验证模型数据和控制数据^[10,21-22],CENTURY 模型主要输入参数及获取方式见表 1 所列。

表 1 CENTURY 模型主要输入参数及获取方式

输入参数	内容	获取方式
气象参数	月最高温度	栅格数据(1961—2021 年)提取
	月最低温度	淮南市气象站(2022—2023 年)
	月降水量	
土壤参数	土壤质地	实际测定(2023 年)栅格数据 (2008 年)提取
	土壤容重	
	pH 值	
控制参数	土地利用	实地走访记录(2022 年)
	农田管理措施	
	验证点经纬度	

1.2.1 气象数据

气象数据主要来源于文献^[23]。该数据由东英吉利大学气候研究部门从 CRU-TS-4.06 降尺度处理,使用 WorldClim 2.1 进行偏差校正。数据是 2.5 min 分辨率的栅格格式,包括月最低温度、月最高温度和月降水量,涵盖 1961—2021 年期间。采用 Arcgis 10.7 提取气象栅格数据后,将其分类转化成 CENTURY 模型需要的文件格式。

从淮南市气象站收集 2022—2023 年各类气象数据。

1.2.2 土壤数据

土壤数据分为运行模型数据和验证模型数据 2 类,土壤点位分布见图 1。运行模型数据包括土壤质地、土壤容重和土壤 pH 值。数据来源包括:① 联合国粮食与农业组织发布的世界土壤数据库 1.2 版本^[24](Harmonized World Soil Database v 1.2,HWSD),为 30"分辨率的栅格数据,利用 ArcGIS 10.7 提取各类土壤数据;② 2023 年在研究区内采集表层 0~20 cm 耕层土壤 91 组,采用比重法、环刀法和土壤 pH 计测定土壤质地、容重和 pH 值。测定土壤指标时,每组样品设置了 3 组平行样,每组误差未超过 5%。

验证模型数据以土壤有机碳为主,数据来源包括:① 安徽省土壤肥料总站提供 2016—2021 年的《安徽省耕地质量检测》中有关淮南市的 5 个长期监测点数据;② 全国第 2 次土壤普查淮南市域 24 个典型农田土壤剖面数据;③ 采用重铬酸钾-硫酸滴定法测定获取 91 组土壤有机碳。

1.2.3 控制数据

控制数据中的土地利用和农田管理措施主要来自于实地走访调查,收集有关肥料投入时间、有机肥、农家肥的施用量与施用率、灌溉方式、作物轮作、耕作方式、秸秆还田量与方式等数据,将这些数据整理转化成模型要求的格式,为每个地点建立相应数据库。

1.3 研究方法

1.3.1 SOCD 计算

土壤有机碳密度计算公式为:

$$D_{\text{SOCD}} = T\rho(1 - \delta)S_{\text{SOCC}} \quad (1)$$

其中: D_{SOCD} 为土壤有机碳密度; T 为 0.2 m 的土层厚度; ρ 为土壤容重; δ 为粒径大于 2 mm 的砾石质量分数; S_{SOCC} 为土壤有机碳质量比。

1.3.2 模型参数化

1) 将气象数据(月最高气温、月最低气温和月降水量)转换成 .wth 格式的天气文件^[25]。事件文件(.sch)包括肥料投入时间、作物轮作和耕作方式等参数。收获事件(HARV.100)、有机质添加事件(OMAD.100)和灌溉事件(IRRI.100)分别涉及秸秆还田量与方式、农家肥施用量、施用率和灌溉方式等信息。地点文件(.100)包括经纬度、土壤容重、pH 值和质地等控制数据^[8]。

2) 模型预处理与碳动态模拟。为达到农田生态系统中碳积累和排放的平衡状态,设置运

行 2 000 a 的预热过程。在进行实际气候条件下的农田生态系统碳动态模拟前,将模型预热的结果作为模拟的初始条件^[26]。

3) 模型校准是一个参数化后的必要环节^[10],通过对模型的内部参数进行微调提高模拟值与实测值之间的相关性,进而确保模型的可靠性。校准迭代调整内部参数,反复检验模拟值与观测值之间的吻合程度^[21],达到输出的 SOCD 接近于实测的 SOCD 模拟效果。

为进一步分析模型模拟的可靠程度,分别进行线性回归分析、误差平方根值(root mean square error, RMSE)和模拟效率(simulation efficiency, ME)分析,探究模拟值与实测值的拟合程度^[27]。其中, R^2 反映模型模拟值相对于实测值的偏差程度, R^2 越接近 1, 拟合效果越好, 模拟结果越真实^[28]。RMSE 反映模拟值与实测值之间的绝对误差。ME 在 0~1 之间变化, 越接近 1, 模拟效率越好。线性回归分析 R^2 、误差平方根值 η_{RMSE} 和模拟效率 η_{ME} 的计算公式分别为:

$$R^2 = \frac{\left| \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})(O_i - \bar{O})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (S_i - \bar{S})^2 (O_i - \bar{O})^2}} \right|^2}{(2)} \quad (2)$$

$$\eta_{\text{RMSE}} = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2 \right]^{0.5} \quad (3)$$

$$\eta_{\text{ME}} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (O_i - \bar{O})^2} \quad (4)$$

其中: n 为验证点个数; S_i 、 O_i 分别为第 i 个验证点的 SOCD 模拟值、实测值; \bar{S} 为所有模拟值的平均值; \bar{O} 为所有实测值的平均值。

1.3.3 数据处理与分析

使用 Microsoft Excel 2020、Origin 2023 软件进行数据整理及图件制作,使用 SPSS 25.0 软件进行单因素方差分析。使用 Arcgis 10.7 软件进行栅格数据提取,采用普通克里金插值法绘制空间分布图。

2 结果与分析

2.1 模型验证与参数化

2.1.1 点验证

基于安徽省土壤肥料总站提供的 2016—2021 年《安徽省耕地质量检测》中淮南市的 5 个长期监测点数据进行模型点验证。土壤监测点的理化性质见表 2 所列,各监测点采用麦-稻一年两

熟种植制度。土壤监测点 SOCD 实测值与模拟值关系如图 2 所示。RMSE 和 ME 值分别为 16.59% 和 0.74,表明实测 SOCD 与模拟 SOCD 存在较强的相关性,两者之间误差较小,模型具有较好的模拟效率。因此,CENRUTY 模型在研究区的参数本地化较为成功,可进一步开展多站点的有机碳模拟演化及验证。

表 2 土壤监测点的理化性质

监测点	CJ01	CJ02	CJ03	CJ04	CJ05
土类	水稻土	黄棕壤	砂姜黑土	黄棕壤	水稻土
砂粒质量分数/%	38	42	38	42	29
粉粒质量分数/%	18	38	48	38	50
粘粒质量分数/%	44	20	18	20	12
pH 值	6.6	6.7	6.2	6.8	6.6
容重/(g/cm ³)	1.27	1.25	1.30	1.28	1.31

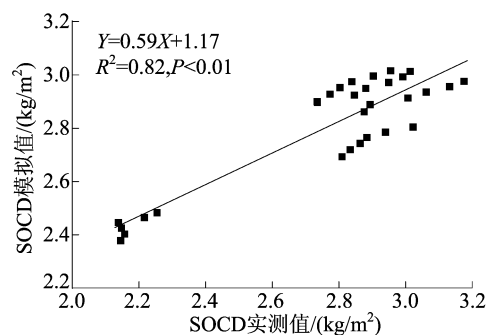


图 2 土壤监测点 SOCD 实测值与模拟值关系

2.1.2 多点验证

基于第 2 次全国土壤普查 24 个点位数据^[19-20],SOCD 实测值与模拟值关系如图 3 所示。RMSE 值和 ME 值分别为 21.77% 和 0.88。多点验证过程中的实测 SOCD 与模拟 SOCD 相关性强、误差小,结果表明,CENTURY 模型在多点验证过程中模拟值与第 2 次全国土壤普查数据拟合效果良好。

2023 年研究区内 91 个采样测试验证点的 SOCD 实测值与模拟值关系如图 4 所示。RMSE 和 ME 值分别为 6.72% 和 0.80,多点验证过程中的实测 SOCD 与模拟 SOCD 相关性强、误差小,模拟效率高,结果表明:CENTURY 模型模拟值与采样测试数据拟合效果良好。

从图 3、图 4 可以看出,CENTURY 模型的多时段、多点验证结果表明,验证点的实测 SOCD 与模拟 SOCD 的线性回归均通过显著,检验 ($P < 0.01$),且 RMSE 小、模拟效率良好,CENTURY 模型对淮南市农田有着较好的适用性,可基于该

模型对淮南市农田土壤有机碳演化进行研究。

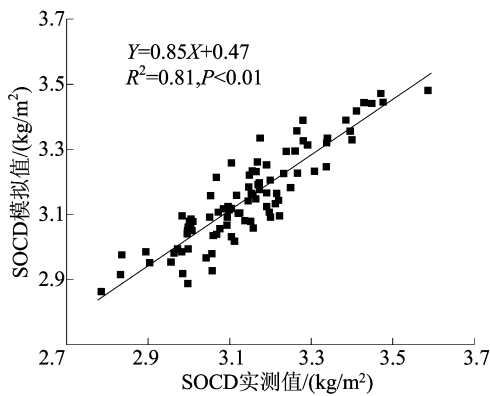


图 3 第 2 次普查点 SOCD 实测值与模拟值关系

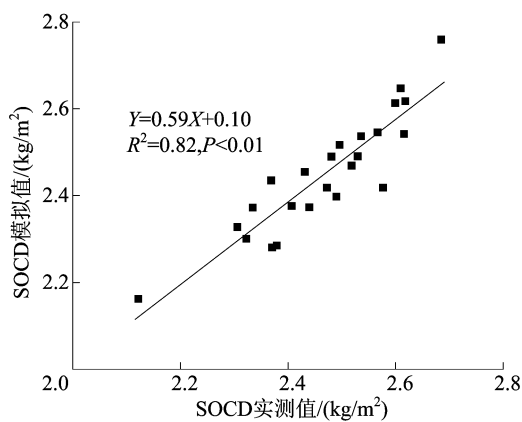


图 4 采样点 SOCD 实测值与模拟值关系

2.2 SOCD 的变化趋势

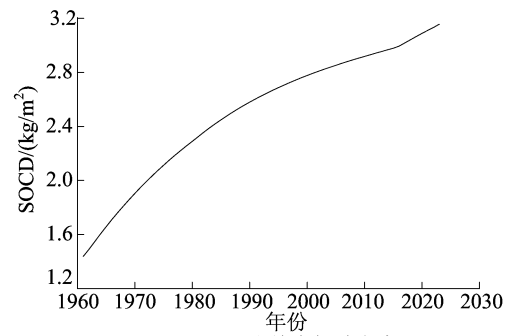
1961—2023 年的淮南市模拟土壤有机碳密度和不同碳库有机碳密度均值变化趋势曲线如图 5 所示。

由图 5 可知,1961—2023 年,淮南市农田 SOCD、ASOCD、SSOCD、PSOCD 均逐渐增加,2023 年淮南市的 SOCD、ASOCD、SSOCD、PSOCD 均值分别为 3.16、0.19、2.16、0.79 kg/m²。其中,2016—2023 年的 SOCD、ASOCD 和 SSOCD 的增长率有明显波动上升,这可能与淮南市 2016 年秸秆还田政策的大力推行有关^[29]。

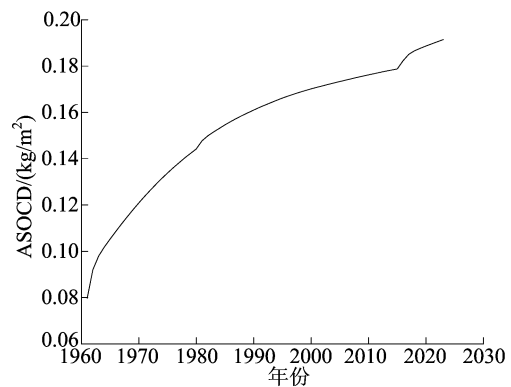
2023 年不同有机碳库的 SOCD 差异较大,SSOCD 占比最大(65.9%),PSOCD 占比为 28.0%,ASOCD 占比最小(6.2%),SSOCD 与 PSOCD 合计占比超过 90.0%,与文献[8]的研究结果一致。与 SSOCD 和 PSOCD 相比较,ASOCD 的波动更明显,与文献[30]的研究一致,表明 ASOCD 更容易受到外界干扰有关。

相关性分析表明,SOCD 与 ASOCD($R^2 = 0.9916, P < 0.01$)、SSOCD($R^2 = 0.9976, P <$

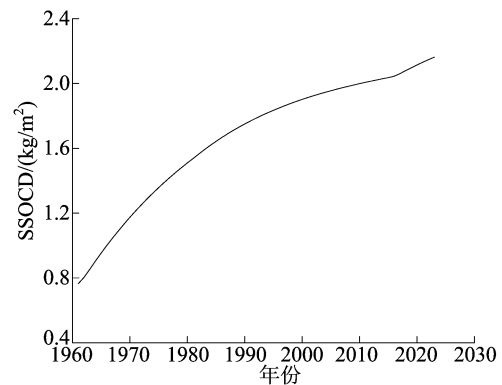
0.01)和 PSOCD($R^2 = 0.9445, P < 0.01$)均显著相关。由于 SSOCD 占比大,PSOCD 和 ASOCD 占比低,导致 SOCD 与 SSOCD 的变化趋势具有一致性。由此可见,土壤中的 SOCD 主要以 SSOCD 的形式积累并决定 SOCD 的变化趋势。



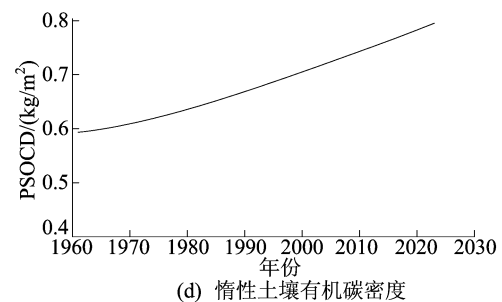
(a) 土壤有机碳密度



(b) 活性土壤有机碳密度



(c) 缓性土壤有机碳密度



(d) 惰性土壤有机碳密度

图 5 1961—2023 年淮南市不同碳库 SOCD 变化趋势

2.3 SOCD 的空间分布

淮南市 1961 年和 2023 年的 SOCD、ASOCD、

SSOCD 和 PSOCD 空间分布及其变化情况如图 6 所示。

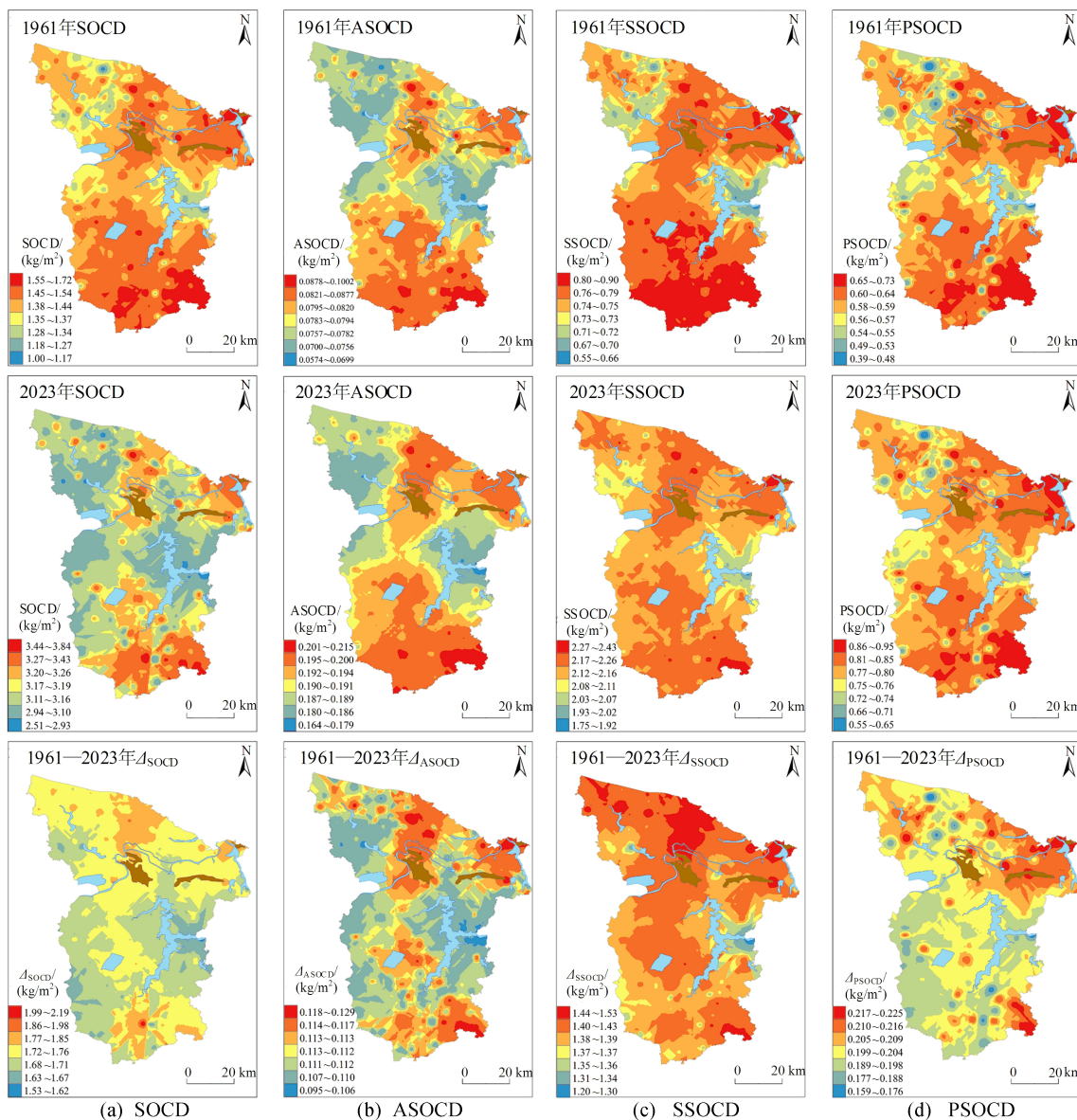


图 6 淮南市 SOCD、ASOCD、SSOCD、PSOCD 空间变化分布图

研究区有机碳密度及不同碳库的有机碳密度变化存在较大差异。1961 年 SOCD 主要分布范围为 $1.20 \sim 1.60 \text{ kg/m}^2$, 2023 年大部分区域(东北和中南部)的 SOCD 增加到 $3.00 \sim 3.40 \text{ kg/m}^2$, 大部分区域 Δ_{SOCD} 为 $1.60 \sim 1.80 \text{ kg/m}^2$ 。

1961 年和 2023 年的 ASOCD 分别集中在 $0.070 \sim 0.080 \text{ kg/m}^2$ 和 $0.180 \sim 0.200 \text{ kg/m}^2$ 间, 中南部和东北部 ASOCD 相对较高, 大多数区域的 Δ_{ASOCD} 为 $0.110 \sim 0.120 \text{ kg/m}^2$ 。与 1961 年相比, 2023 年 SSOCD 有较大的增加, 大部分区域的 SSOCD 达到 $2.10 \sim 2.30 \text{ kg/m}^2$, Δ_{SSOCD} 集中在 $1.35 \sim 1.45 \text{ kg/m}^2$ 间; 2023 年区内 PSOCD 范围

主要集中在 $0.70 \sim 0.90 \text{ kg/m}^2$, 1961—2023 年的 Δ_{PSOCD} 主要为 $0.190 \sim 0.220 \text{ kg/m}^2$ 。由此可见, 区内农田不同碳库有机碳密度及其变化具有相似规律, 从大到小依次为 SSOC、PSOCD、ASOCD, 缓性有机碳累积最强, 活性有机碳累积最弱。

CENTURY 模型模拟淮南市 2006 年表层 SOCD 空间分布特征与文献[31]中淮南市 SOCC 空间分布特征相似; 其中寿县 SOCD 空间分布特征与寿县 SOCC 空间分布特征^[17]也高度相似。淮南市 2006、2007、2011、2018、2019 年的表层土壤的模拟 SOCD 分别为 2.87 、 2.88 、 2.93 、 3.04 、 3.07 kg/m^2 , 与周边其他地区同期 SOCD 比较,

淮南市的 SOCD 略低于 2007 年安徽省^[32] 的 2.90 kg/m^2 、江苏省^[33] (2006 年) 的 2.91 kg/m^2 和六安市^[34] (2011 年) 的 3.10 kg/m^2 , 明显低于湖北省^[35] (2018 年) 的 4.25 kg/m^2 和福建省^[36] (2019 年) 的 3.44 kg/m^2 。

3 讨 论

3.1 气象因素影响

1961—2023 年的淮南市 SOCD 与年降水量、年均温的相关分析表明, SOCD 与年降水量之间具有显著的正相关 ($R=0.18, P<0.01$), SOCD 与气温之间有显著的正相关 ($R=0.66, P<0.01$)。ASOCD 与年降水量、年均温的 r 分别为 $0.17 (P<0.01)$ 、 $0.60 (P<0.01)$; SSOCD 与年降水量、年均温 R 分别为 $0.15 (P<0.01)$ 、 $0.62 (P<0.01)$; PSOCD 与年降水量、年均温 R 分别为 $0.18 (P<0.01)$ 、 $0.52 (P<0.01)$ 。文献^[14, 37]对我国内蒙古和东北地区土壤有机碳的研究发现, 土壤有机碳与降水量之间呈正相关关系, 与本研究结果一致。文献^[38]研究表明在年均温度小于 10°C 的地区, 土壤有机碳与温度呈负相关关系; 文献^[16]对意大利北部耕地土壤的研究表明, 有机碳与气温存在的正相关性与本研究结果一致。

相关性表明, 降水和气温都能够对淮南市农田 SOCD 与不同碳库产生显著影响, 但气温对淮南市农田土壤有机碳的影响比降水更为显著, 这与文献^[39]的研究结果一致。文献^[40]认为, 在不同降水和气温等气象条件下适宜生长的植被类型不同, 导致土壤有机质的外源物料存在差异, 而且通过改变土壤水分和温度显著影响土壤中微生物的种群、生物量及活性。由此可见, 降水、气温等气象因子一方面通过影响土壤有机质物料类型及其矿化作用影响土壤有机碳含量, 另一方面气温显著影响大气土壤的碳转移通量, 一般随着温度升高进入土壤中的植物残体和根系量增加, 进而提高土壤有机碳含量^[41]。

目前, 由于不同研究的研究区尺度、土壤类型和人为等因素的差异, 土壤有机碳与降水、气温等气象因素间关系还存在着争议, 有待进一步进行相关研究。

3.2 土壤理化性质影响

淮南市农田 SOCD 与 pH 值呈正相关性 ($R=0.21, P<0.05$)。土壤 pH 值通过影响土壤中微生物的种群、生物量和酶活性, 改变土壤中的

有机质分解、转化效率^[8], pH 值过高 (>8.5) 或过低 (<5.5) 的土壤都会使土壤中微生物的生物量和生命活动受到限制, 并影响土壤有机物的分解转化速率^[22]。淮南市农田绝大多数土壤 pH 值为 $6.5\sim 7.5$, 适宜的土壤 pH 值有利于区内的土壤外源有机物的分解转化, 促进土壤有机质的形成和累积。

淮南市 SOCD 与土壤容重之间呈显著正相关 ($R=0.22, P<0.05$), 与文献^[34]结果一致。在一定范围内, 随着土壤容重增加, 土壤的孔隙度和溶质迁移能力会逐渐下降, 通气性与渗透性也会随之降低, 从而有利于土壤有机质的累积^[34]。

3.3 土壤类型及农田管理措施影响

淮南市不同土壤类型 SOCD 如图 7 所示。由图 7 可知, 1961 年 SOCD 均值从大到小依次为水稻土 (1.46 kg/m^2)、黄棕壤 (1.44 kg/m^2)、潮土 (1.39 kg/m^2) 和砂姜黑土 (1.38 kg/m^2), 不同土壤类型 SOCD 之间存在边缘显著差异 ($P=0.054$), 与文献^[27]的研究结果相似。水稻土一般具有较高的有机物质投入和厌氧条件下其较弱的有机质分解速率使得水稻土更易于积累有机质^[42], 而砂姜黑土质地粘重、收缩膨胀性大、砂姜含量高, 不利于作物的生长和有机质的累积^[43], 从而导致砂姜黑土 SOCD 显著低于水稻土 ($P<0.01$)。

2023 年 SOCD 的均值从大到小依次为水稻土 (3.18 kg/m^2)、黄棕壤 (3.16 kg/m^2)、砂姜黑土 (3.11 kg/m^2) 和潮土 (3.08 kg/m^2), 水稻土的 SOCD 略大于其他 3 类土壤, 这与文献^[44]的研究一致, 但显著性检验表明, 2023 年不同土壤类型 SOCD 均值之间无显著性差异。这可能与土壤耕作方式转变有关, 区内早期黄棕壤、砂姜黑土和潮土主要采用旱作方式, 随着区内灌溉条件改善, 大多数黄棕壤、砂姜黑土和潮土逐渐转变为水旱轮作方式。与旱地比较, 水田具有独特的氧化还原过程, 有利于养分循环利用以及微生物介导的土壤有机碳的周转^[35]。因此, 虽然早期水稻土与其他土壤类型的 SOCD 存在一定的差异性, 但在农田管理措施的影响下, 不同土壤类型的 SOCD 差异性降低。

合理的农田管理措施不仅能保证作物的高产, 还能提高土壤有机碳含量。由图 7 可知, 不同土壤类型有机碳在 1961—2023 年时间分布上总体呈上升趋势, 在 2016 年后该趋势加快。根据文献^[45]可知, 淮南市的复合肥投入量从 2016 年的

128 240 t/a 逐年增长至 2022 年的 149 807 t/a, 更多的肥料投入使得作物的根系生物量增加并加快土壤有机碳固定^[46]。同时 2016 年以后淮南市秸秆还田政策的推广, 使得研究区内的土壤有机碳积累速度加快^[29], 秸秆还田等农田管理措施对淮南市农田土壤有机碳有一定影响。

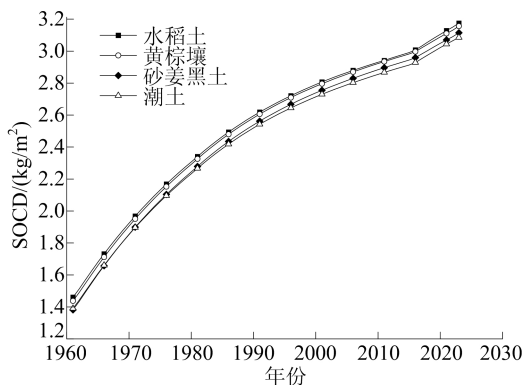


图 7 淮南市不同土壤类型的 SOCD

3.4 不确定性分析

本研究过程中, 以下因素可能会对模拟的准确性产生影响。首先, 研究中仅进行了农田土壤初步分类, 未考虑不同时间段农田土壤利用类型(旱地改水田)的变化, 可能导致模拟结果与实际存在一定的差异; 其次, 在模拟过程中, 由于气象数据的输入采用月平均模式, 未考虑到极端天气对农田的影响, 可能对 SOCD 模拟结果准确性产生影响, 最后, 人为因素对 CENTURY 模型参数调整上有着重要的影响。本研究在对模型参数进行本地化时, 考虑了相关重要因素, 如施肥管理、秸秆的处理方式、轮作制度以及农田管理措施等, 这些决策由农户自行决定, 并通过实地调查走访获取数据支持。然而, 在农作物生长过程中, 人为因素众多, 模型难以涵盖所有的影响因素, 例如耕作深度、种植方式、病虫害管理和种植密度等。因此, 这些未被完全概括的人为因素可能导致模型在模拟实际农田系统时存在一定的差异。

4 结 论

1) 1961—2023 年淮南市 SOCD 在时间尺度上呈现整体上升趋势, 从 1961 年的 1.44 kg/m^2 增长至 2023 年的 3.16 kg/m^2 。空间分布上, 淮南市 SOCD 呈现东北部和中南部高, 西北部低的空间分布格局。

2) 农田土壤缓性有机碳累积最强, 惰性有机碳次之, 活性有机碳累积最弱, 缓性有机碳的变化

决定了土壤有机碳库变化趋势。

3) 气温、降水、pH 值、容重与淮南市农田土壤有机碳具有显著正相关性, 秸秆还田可提高农田土壤有机碳密度积累。

[参 考 文 献]

- [1] PLAZA C, PEGORARO E, BRACHO R, et al. Direct observation of permafrost degradation and rapid soil carbon loss in tundra[J]. *Nature Geoscience*, 2019, 12(8): 627-631.
- [2] 龙军, 毛艳玲, 张黎明, 等. 农田土壤有机碳演变模型的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2012, 28(5): 232-239.
- [3] GRACE J. Understanding and managing the global carbon cycle[J]. *Journal of Ecology*, 2004, 92(2): 189-202.
- [4] ARAUJO-NETO R A, MAIA S M F, ALTHOFF T D, et al. Simulation of soil carbon changes due to conventional systems in the semi-arid region of Brazil: adaptation and validation of the century model [J]. *Carbon Management*, 2021, 3: 399-410.
- [5] XIN Z B, QIN Y B, YU X X, et al. Spatial variability in soil organic carbon and its influencing factors in a hilly watershed of the loess plateau, China [J]. *Catena*, 2016, 137: 660-669.
- [6] 李长生, 肖向明, FROLKING S, 等. 中国农田的温室气体排放[J]. *第四纪研究*, 2003, 23(5): 493-503.
- [7] XU Z, ZHANG Y, YANG J, et al. Effect of underground coal mining on the regional soil organic carbon pool in farmland in a mining subsidence area [J]. *Sustainability*, 2019, 11(18): 4961.
- [8] PARTON W J, SCHIMMEL D S, COLE C V, et al. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in great plains grasslands [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51(5): 1173-1179.
- [9] SMITH P, SMITH J U, POWLSON D S, et al. A comparison of the performance of nine soil organic matter models using datasets from seven long-term experiments [J]. *Geoderma*, 1997, 81(1/2): 153-225.
- [10] GALDOS M V, CERRI C C, CERRI C E P, et al. Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with the CENTURY model [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2009, 73(3): 802-811.
- [11] FOEREID B, HOGH-JENSEN H. Carbon sequestration potential of organic agriculture in northern Europe—a modelling approach [J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2004, 68(1): 13-24.
- [12] TORNQUIST C G, MIELNICZUK J, CERRI C E P. Modeling soil organic carbon dynamics in Oxisols of Ibiruba (Brazil) with the Century Model [J]. *Soil & Tillage Research*, 2009, 105(1): 33-43.
- [13] 王兴玉, 张美玲. 基于 CENTURY 模型的甘南高寒草甸过去 50 年的碳收支时空分布分析 [J]. *生态科学*, 2023, 42(2): 211-218.

- [14] 于丰源. 基于 Century 模型的荒漠草原土壤有机碳动态模拟研究[D]. 呼和浩特:内蒙古农业大学, 2018.
- [15] 高鲁鹏, 梁文举, 姜勇, 等. 利用 CENTURY 模型研究东北黑土有机碳的动态变化 I. 自然状态下土壤有机碳的积累[J]. 应用生态学报, 2004, 15(5): 772-776.
- [16] LUGATO E, BERTI A. Potential carbon sequestration in a cultivated soil under different climate change scenarios: a modelling approach for evaluating promising management practices in north-east Italy[J]. *Agriculture Ecosystems & Environment*, 2008, 128(1/2): 97-103.
- [17] 谢佳. 寿县土壤养分空间变异特征研究[D]. 合肥:安徽农业大学, 2020.
- [18] 冯军, 戚士章. 寿县土壤养分现状及对策[J]. 现代农业科技, 2014(10): 238-244.
- [19] 淮南土壤普查汇总办公室. 淮南土壤[M]. [出版地不详: 出版者不详], 1987: 26-45.
- [20] 安徽省寿县土壤普查办公室. 寿县土壤[M]. [出版地不详: 出版者不详], 1985: 238-244.
- [21] 许文强, 陈曦, 罗格平, 等. 基于 CENTURY 模型研究干旱区人工绿洲开发与管理模式变化对土壤碳动态的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(14): 3707-3716.
- [22] NICOLOSO R S, AMADO T J C, RICE C W. Assessing strategies to enhance soil carbon sequestration with the DSSAT-CENTURY model[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(6): 1034-1049.
- [23] HARRIS I, OSBORN T J, JONES P, et al. Version 4 of the CRU TS monthly high-resolution gridded multivariate climate dataset. *scientific data* 7: 109 [N/OL]. [2023-07-19]. <https://www.worldclim.org/>.
- [24] FISCHER G, NACHTERGAELE F, PRIELER S, et al. Global agro-ecological zones assessment for agriculture (GAEZ 2008). IIASA, Laxenburg, Austria and FAO, Rome, Italy [N/OL]. [2022-11-28]. <https://www.fao.org/soils-portal/en/>.
- [25] MERILA P, MALMIVAARA-LAMSA M, SPETZ P, et al. Soil organic matter quality as a link between microbial community structure and vegetation composition along a successional gradient in a boreal forest[J]. *Applied Soil Ecology*, 2010, 46(2): 259-267.
- [26] HANG F, WANG S, ZHAO M, et al. Regional simulation of soil organic carbon dynamics for dry farmland in North-east China using the CENTURY model[J]. *PLoS ONE*, 2021, 16(1): e0245040.
- [27] TANG M, WANG S, ZHAO M, et al. Simulated soil organic carbon density changes from 1980 to 2016 in Shandong Province dry farmlands using the CENTURY model[J]. *Sustainability*, 2020, 12(13): 5384.
- [28] TAGIR G G, WILLIAM J, DENNIS S O, et al. Testing the 'CENTURY' ecosystem level model on data sets from eight grassland sites in the former USSR representing a wide climatic/soil gradient[J]. *Ecological Modelling*, 1997, 96(1/2/3): 191-210.
- [29] 张叶叶, 莫非, 韩娟, 等. 秸秆还田下土壤有机质激发效应研究进展[J]. *土壤学报*, 2021, 58(6): 1381-1392.
- [30] 曹瑞红, 张美玲, 李晓娟, 等. 甘南高寒草甸土壤有机碳储量时空分布特征的模拟分析[J]. *生态学杂志*, 2022, 41(11): 2145-2153.
- [31] 国土资源部中国地质调查局. 中华人民共和国多目标区域地球化学图集安徽省江淮流域[M]. 北京:地质出版社, 2011: 110.
- [32] 许信旺, 潘根兴, 曹志红, 等. 安徽省土壤有机碳空间差异及影响因素[J]. *地理研究*, 2007, 26(6): 1077-1086.
- [33] 奚小环, 杨忠芳, 廖启林, 等. 中国典型地区土壤碳储量研究[J]. *第四纪研究*, 2010, 30(3): 573-583.
- [34] 李典友. 区域湿地和农田土壤有机碳变化研究[D]. 南京:南京农业大学, 2012.
- [35] 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.
- [36] 王文俊. 福建省土壤有机碳储量估算、时空分布特征及其影响因素[J]. *现代地质*, 2019, 33(6): 1295-1305.
- [37] 王淑平, 周广胜, 高素华, 等. 中国东北样带土壤活性有机碳的分布及其对气候变化的响应[J]. *植物生态学报*, 2003, 27(6): 780-785.
- [38] 周涛, 史培军, 王绍强. 气候变化及人类活动对中国土壤有机碳储量的影响[J]. *地理学报*, 2003, 58(5): 727-734.
- [39] 王鑫婧, 张美玲, 杨敏聪, 等. 基于 CENTURY 模型的张掖草地土壤有机碳模拟及影响因素研究[J]. *草地学报*, 2023, 31(4): 1173-1185.
- [40] 位佳. 气象因子和农业管理措施变化对福建省耕地土壤有机碳的影响[D]. 福州:福建农林大学, 2014.
- [41] RUSTAD L E, FERNANDEZ I J. Experimental soil warming effects on CO₂ and CH₄ flux from a low elevation spruce-fir forest soil in Maine, USA[J]. *Global Change Biology*, 1998, 4(6): 597-605.
- [42] YANG C M, YANG L Z, ZHU O Y. Organic carbon and its fractions in paddy soil as affected by different nutrient and water regimes[J]. *Geoderma*, 2005, 124(12): 133-142.
- [43] 郭成士, 马东豪, 张丛志, 等. 典型砂姜黑土黑色物质提取方法及成分研究[J]. *土壤学报*, 2021, 58(2): 421-432.
- [44] 王绍强, 周成虎, 李克让, 等. 中国土壤有机碳库及空间分布特征分析[J]. *地理学报*, 2000, 55(5): 533-544.
- [45] 淮南市统计局. 淮南统计年鉴[N/OL]. [2023-12-25]. <https://tjj.huainan.gov.cn/tjsj/tjnj/index.html>.
- [46] 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.

(责任编辑 吴亮)