



王欢,吕国玮.我国七大农业区耕地土壤有机碳密度的影响因素分析[J].中国农业大学学报,2025,30(02):1-15.

WANG Huan,LYU Guowei. Influencing factors on soil organic carbon density in seven major agricultural regions in China[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2025, 30(02): 1-15.

DOI: 10.11841/j.issn.1007-4333.2025.02.01

我国七大农业区耕地土壤有机碳密度的影响因素分析

王欢^{1,2} 吕国玮^{1*}

(1. 中国农业大学 土地科学与技术学院,北京 100193;

2. 北京舜土规划顾问有限公司,北京 100070)

摘要 为探究影响我国耕地土壤有机碳密度(Soil Organic Carbon Density, SOCD)空间布局的关键因素,基于“中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018年)”,以农业区为研究单元建立分层回归模型和空间回归模型,分析水热、植被、施肥和秸秆还田等相关指标与耕地SOCD的关系。结果表明:1)全国各农业区耕地SOCD的分布呈现较大差异,水田SOCD由高到低表现为东北>华南>长江中下游>西南>黄淮海>甘新>黄土高原区;旱地SOCD由高到低为东北>华南>西南>长江中下游>甘新>黄土高原>黄淮海;最高均为东北区(水田 7.6 ± 2.39 ,旱地 6.58 ± 2.75),甘新区、黄土高原区及黄淮海区较低(水田分别为 3.08 ± 1.29 、 3.09 ± 0.38 和 3.15 ± 0.43 ,旱地分别为 3.24 ± 1.27 、 3.11 ± 0.97 和 2.78 ± 0.36)。2)根据分层回归模型一(HRM I),自然因素对大部分农业区耕地SOCD的空间差异起着主导作用($R^2>0.5$),加入人为因素指标后的分层回归模型二(HRM II)对各农业区耕地SOCD空间分布差异的解释水平有不同程度的增加,其中黄淮海区最为显著($\Delta R^2=0.152$, $P=0.001<0.01$)。3)通过模型参数检验,长江中下游区采用线性回归模型,东北区采用空间误差模型,其他农业区采用空间滞后模型。4)耕地SOCD的影响机制在各农业区既有共性也有差异,海拔高度(X_5)和秸秆还田面积(Z_7)对各农业区耕地SOCD全部为正向影响(各区 X_5 、 Z_7 对应系数均 >0),水热和植被条件、土壤侵蚀、化肥施用、灌溉、农业机械使用和粮食产量对不同农业区的耕地SOCD的影响存在差异。综上,全国耕地SOCD空间分布差异较大,影响各农业区耕地SOCD差异的关键因素不同;应针对不同农业区气候和土地利用条件,采取相应的耕地土壤有机碳固存策略,长江中下游区、华南区和西南区使用生物炭等土壤改良剂、推广精准配比施肥等,东北区采用土壤改良剂、推广保护性耕作技术,黄淮海区和黄土高原区应注重推广精准配比施肥和灌溉方式。此外,鼓励全国各农业区实施秸秆还田,持续改良秸秆还田方式,以促进土壤健康和农业的可持续发展。

关键词 耕地土壤有机碳密度; 分层回归模型; 空间回归模型; 影响因素; 农业生产管理政策建议

中图分类号 S153.6

文章编号 1007-4333(2025)02-0001-15

文献标志码 A

Influencing factors on soil organic carbon density in seven major agricultural regions in China

WANG Huan^{1,2}, LYU Guowei^{1*}

(1. College of Land Science and Technology, China Agricultural University, Beijing 100193, China;

2. Beijing Shuntu Planning Consulting Co., Ltd., Beijing 100070, China)

Abstract In order to explore the key factors affecting the spatial layout of Soil Organic Carbon Density (SOCD) in cultivated land, based on the “China High Resolution National Soil Information Grid Basic Attribute Dataset (2010-2018)”, taking agricultural area as the research unit, hierarchical regression model

收稿日期: 2024-07-28

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3804000);兴安盟科学技术局应用技术与开发专项(2023SYFDZ0346)

第一作者: 王欢(ORCID:0009-0003-2995-1782), 硕士, E-mail: wanghuan20221106@163.com

通讯作者: 吕国玮(ORCID:0000-0002-5198-0059), 讲师, 主要从事国土空间规划和耕地土壤固碳技术研究, E-mail: g.lyu@cau.edu.cn

and spatial regression model were established to analyze the relationship between hydrothermal condition, vegetation, fertilization and straw returning and SOCD of cultivated land. The results show that: 1) The distribution of SOCD in cultivated land showed great differences among all agricultural regions in China. The paddy field SOCD in descending order is Northeast, South China, the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, Southwest, Huang-Huai-Hai, Gan-Xin and Loess Plateau region. The SOCD of dry farm in descending is Northeast, South China, Southwest, the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, Gan-Xin, Loess Plateau and Huang-Huai-Hai region. The highest values were observed in the Northeast region (paddy field 7.60 ± 2.39 , dry farm 6.58 ± 2.75), while the lower values were observed in the Gan-Xin, Loess Plateau, and Huang-Huai-Hai region (paddy field 3.08 ± 1.29 , 3.09 ± 0.38 , and 3.15 ± 0.43 , respectively, while dry farm 3.24 ± 1.27 , 3.11 ± 0.97 , and 2.78 ± 0.36 , respectively). 2) According to the results of Hierarchical Model I, natural factors play a dominant role in the spatial difference of soil organic carbon density of cultivated land in most agricultural regions ($R^2 > 0.5$), and the interpretation level of the spatial difference of SOCD in all agricultural regions increased to different degrees with the addition of human factors in the hierarchical regression model II, among which the Huang-Huai-Hai region was the most significant ($\Delta R^2 = 0.152$, $P = 0.001 < 0.01$). 3) Through the model parameter test, the linear regression model was adopted in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, the spatial error model was adopted in the Northeast region, and the spatial lag model was adopted in other regions. 4) There are both commonality and difference in the influence mechanism of SOCD in different agricultural regions. The altitude (X_5) and straw returning area (Z_7) have positive effects on SOCD in all agricultural regions (corresponding coefficients of X_5 , Z_7 in all regions are > 0). The effects of hydrothermal and vegetation conditions, soil erosion, fertilizer application, irrigation, agricultural machinery use and grain yield on SOCD of cultivated land in different agricultural regions were different. To sum up, the spatial distribution of SOCD in cultivated land varies greatly across the country, and the factors affecting SOCD of cultivated land in different agricultural regions are different. Soil organic carbon sequestration strategies for cultivated land should be adopted according to the climate and land use conditions of different agricultural regions. Soil amendments such as biochar should be used in the Middle and Lower reaches of the Yangtze River, South China and Southwest China, and precise proportional fertilization should be promoted; soil amendments and conservation tillage techniques should be adopted in the Northeast region, and precise proportional fertilization and irrigation should be promoted in the Huang-Huai-Hai region and the Loess Plateau region. In addition, all agricultural regions in the country are encouraged to implement straw returning to the field and continuously improve the method of straw returning to the field to promote soil health and sustainable agricultural development.

Keywords cultivated soil organic carbon density; hierarchical regression model; spatial regression model; influencing factors; policy suggestions on agricultural producing management

我国农业碳排放自1961年以来呈持续上升趋势^[1]。土壤有机碳分解产生 CO_2 是土壤碳与大气 CO_2 交换的主要途径,已有研究表明,土壤因人类农业活动不当而退化,退化的土壤往往会转变为碳源^[2-4]。土壤有机碳是反映土壤有机质含量的关键指标,也是评价土壤肥力、水文特性和温室气体排放潜力的重要依据^[5]。耕地土壤碳增汇对粮食产量的提升效应显著^[6-9],研究耕地土壤的碳固持对粮食安全协调发展具有重要意义。

由于人类社会与自然环境关系密切,土壤有机

碳影响因素研究需综合考虑自然因素和人为活动^[10]。自然因素方面,气候变化对土壤有机碳的影响尤为显著^[11-16],其中降水量对土壤有机碳具有显著的正向作用,而气温与土壤有机碳的垂直地带分布呈负相关;地形因素如海拔高度、坡度坡向和土壤类型对土壤有机碳的空间分布也有重要影响^[17-21];此外,土地利用类型变化也是土壤有机碳时空分布的主要驱动因素^[12, 22-30],旱地和水浇地是土壤有机碳的主要储库^[12],由水田转为旱地和建设用地形成土壤碳源,而由旱地转化为水田和林地则构

成土壤碳汇^[22-23]。近年来,人为活动对土壤固碳影响的相关研究主要在农业耕作与管理措施方面,可持续发展的现代农业耕作与管理措施被证实能显著增强土壤的固碳潜力^[31-34],有机肥和秸秆还田作为输入性碳可直接提高土壤有机碳含量^[35-37],休耕、免耕、少耕技术的应用以及稻麦轮作、小麦玉米轮作等农业生产措施可以显著提升农田表层土壤有机碳含量^[38-40]。目前,通常采用线性回归分析、空间回归分析和建立结构方程模型等来预测土壤有机碳含量^[41-42]、研究影响因素与土壤有机碳含量之间的相互作用^[43-44],以及量化土壤有机碳含量的影响因素及作用机制等^[45-48];此外,邹润彦等^[21]利用地理加权回归模型系统分析了环鄱阳湖区农田土壤有机碳含量及其影响因素,揭示了土壤有机碳含量的空间异质性。

以上关于土壤有机碳的研究主要针对东北、华北等局部地区,且人为因素的相关研究多从微

观角度出发,重点关注某项生产或管理措施对土壤有机碳的影响,而对于全国各农业区的对比研究鲜有报道。基于此,本研究以耕地表层土壤作为研究对象,采用分层回归、空间回归分析方法,从宏观层面分析我国七大农业区耕地 SOCD 的影响因素,旨在探究影响我国耕地土壤有机碳密度 (Soil Organic Carbon Density, SOCD) 空间分布的关键因素,以期为推动耕地碳汇的农业可持续发展提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据来源

本研究中气温、降水、蒸发、海拔高度、光合有效辐射吸收比率、叶面积指数、归一化植被指数和土壤侵蚀数据以及以市域为统计口径的氮、磷、钾化肥施用量、秸秆还田面积、有效灌溉面积、农业机械总动力和粮食产量等数据的获取见表 1。

表 1 数据获取及来源
Table 1 Data requirements and acquisition

因素类型 Type of factor	数据需求 Data requirement	数据获取 Acquired data	空间分辨率 Spatial resolution	数据来源 Data source
自然 Natural	土壤有机碳密度	中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集 (2010—2018 年)	1 km	国家科技基础条件平台—国家地球系统科学数据中心-土壤分中心 (http://soil.geodata.cn)
	光合有效辐射吸收比率、叶面积指数	GLASS 产品-FAPAR、LAI (2000 年 7 月 12 日后的 8 d)	5 km	
	归一化植被指数	中国年度 NDVI 数据集 (2000 年)	1 km	
	土地利用现状数据	中国多时期土地利用遥感监测数据集 (CNLUCC) 数据 (2010 年)	1 km	资源环境科学数据注册与出版系统 (https://www.resdc.cn)
	气温、降水和蒸发数据	中国气象要素年度空间插值数据集 (2000 年)	1 km	
	海拔高度、坡度	数字高程模型 (2000 年分省 DEM)	90 m	
	土壤侵蚀模数	GloSEM_25km (2001)	25 km	欧洲土壤数据中心 (https://esdac.jrc.ec.europa.eu/)
人为 Human	氮、磷、钾化肥施用量、秸秆还田面积、有效灌溉面积、农业机械总动力和粮食产量	各省市的统计数据 (2000、2005、2010 年数据,取平均值)		中国知网统计数据 (https://data.cnki.net/)
其他 Other	综合农业区划	《中国综合农业区划》(1981 年)		数据禾网站 (https://www.databox.store/)

中国综合农业区划将海洋水产区以外的其他9个综合农业区称为九大综合农业区,分别为东北(Northeast)、内蒙及长城沿线(Inner Mongolia and along the Great Wall)、黄淮海(Huang-Huai-Hai)、黄土高原(Loess Plateau)、长江中下游(the Middle

and Lower reaches of the Yangtze River)、华南(South China)、西南(Southwest)、甘新(Gan-xin)及青藏(Qinghai-Xizang Plateau)区,见表2。内蒙及长城沿线及青藏区的样本量<30个,因此,本研究仅对其他7个农业区进行建模分析。

表2 农业区划范围
Table 2 Scope of agricultural regionalization

区域 Region	样本数 Sample number	具体范围 Specific scope
东北 Northeast	38	北至黑龙江省大兴安岭地区,东至黑龙江省佳木斯市,南至辽宁省大连市,西至内蒙古自治区呼伦贝尔市、通辽市和兴安盟及辽宁省朝阳市。
甘新 Gan-Xin	44	北至新疆维吾尔自治区阿勒泰地区,东至内蒙古自治区包头市、鄂尔多斯市及陕西省榆林市,南至西藏自治区阿里地区、那曲市,青海省玉树藏族自治州、海西蒙古族藏族自治州,甘肃省张掖市、武威市和白银市,宁夏回族自治区中卫市、吴忠市及陕西省榆林市,西至新疆维吾尔自治区克孜勒苏柯尔克孜自治州。
华南 South China	58	北至云南省保山市、临沧市、普洱市、玉溪市、红河哈尼族彝族自治州和文山壮族苗族自治州,广西壮族自治区百色市、南宁市、贵港市和梧州市,广东省云浮市、佛山市、广州市、惠州市和梅州市,福建省漳州市、泉州市和莆田市,东至台湾省,南至海南省三亚市(三沙市未统计),西至云南省德宏傣族景颇族自治州;包括香港特别行政区。
黄淮海 Huang-Huai-Hai	59	北至河北省张家口市、承德市,辽宁省葫芦岛市,东至辽宁省葫芦岛市,河北省秦皇岛市,山东省威海市,江苏省盐城市,南至河南省南阳市、信阳市,安徽省六安市、淮南市和滁州市,江苏省淮安市、盐城市,西至河北省西侧省界,河南省安阳市、焦作市、郑州市、平顶山市和南阳市。
黄土高原 Loess Plateau	33	北至青海省海北藏族自治州,甘肃省兰州市、庆阳市,宁夏回族自治区固原市,陕西省延安市,山西省吕梁市、忻州市、朔州市和大同市,东至山西省阳泉市、晋中市、长治市、临汾市和运城市,河南省济源市、洛阳市,南至甘肃省甘南藏族自治州、定西市和天水市,陕西省宝鸡市、西安市和商洛市,西至青海省海南藏族自治州。
西南 Southwest	44	北至四川省阿坝藏族羌族自治州,甘肃省陇南市,陕西省汉中市、安康市,湖北省十堰市,东至湖北省神农架林区、恩施土家族苗族自治州和湘西土家族苗族自治州,贵州省铜仁市、黔南布依族苗族自治州,南至云南省大理白族自治州、楚雄彝族自治州、昆明市和曲靖市,贵州省黔西南布依族苗族自治州,西至四川省雅安市、凉山彝族自治州,云南省迪庆藏族自治州、怒江傈僳族自治州。
长江中下游 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	81	北至湖北省襄阳市、随州市、孝感市和黄冈市,安徽省安庆市、合肥市和马鞍山市,江苏省南京市、扬州市、泰州市和南通市,东至上海市,浙江省舟山市,福建省宁德市、福州市,南至广西壮族自治区河池市、来宾市、桂林市和贺州市,广东省肇庆市、清远市、韶关市和河源市,江西省赣州市,福建省龙岩市、三明市和福州市。

注:资料来源于《中国综合农业区划》^[49]。
Notes: Data from *China Comprehensive Agricultural Regionalization*^[49].

1.2 数据处理

借鉴代杰瑞等^[12]、苗正红等^[27]、奚小环等^[50]的方法,测算土壤表层(0~30 cm)SOC_D,通过土壤有机碳含量和土壤容重计算得到:

$$SOC_D = SOC \times BD \times h \times (1 - \delta) / 100 \quad (1)$$

式中: SOC_D, 土壤有机碳密度, kg/m²; SOC, 土壤有机碳的平均含量, g/kg; BD, 土壤容重, g/cm³; h, 土层厚度, cm; δ, d>2 mm 的砾石含量, % (体积百分数)。但本研究对象为耕地, 表层土壤 d>2 mm 的颗粒可以忽略不计, 故本研究中 δ 取值为 0。

根据中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018年),土层数据分为 $0 \leq h \leq 5$ 、 $5 < h \leq 15$ 、 $15 < h \leq 30$ 及 $30 < h \leq 60$ cm等,研究耕地表层(0~30 cm)SOCD需用到 $0 \leq h \leq 5$ 、 $5 < h \leq 15$ 、 $15 < h \leq 30$ cm的3个土层的土壤容重和土壤有机碳含量栅格数据属性值。计算公式为:

$$\text{SOCD} = (\text{SOC}_{0-5} \times \text{BD}_{0-5} \times 5 + \text{SOC}_{5-15} \times \text{BD}_{5-15} \times 10 + \text{SOC}_{15-30} \times \text{BD}_{15-30} \times 15) / 1\,000 \quad (2)$$

式中:BD,土壤容重, g/cm^3 ;SOC,土壤有机碳的平均含量, g/kg ;5、10、15为土层厚度,cm;SOCD,土壤有机碳密度, kg/m^2 ;1 000,单位换算系数。

研究对象为2010年耕地范围内的SOCD。通过布设随机点来分析全国耕地SOCD分布特征及差异,通过将SOCD以地级市为单位汇总为点值分

析耕地SOCD的影响因素。

气温、降水、蒸发、海拔高度、坡度、土壤侵蚀模数、归一化植被指数和叶面积指数经过数据预处理和标准化,通过ArcGIS Desktop按照耕地范围提取处理,以地级市为单位进行统计分析。化肥施用量(农用氮、磷、钾肥施用实物量)、秸秆还田面积、有效灌溉面积、农业机械总动力、粮食产量等统计数据首先利用Python编程语言进行批量数据单位统一和标准化处理,再以地级市为单位,通过ArcGIS Desktop对数据进行矢量化处理。

1.3 研究方法

采用SPSS软件对数据进行统计分析,采用线性回归及空间回归等分析方法,利用GEODA软件构建回归模型。结合已有的相关研究选取参与本研究的耕地SOCD影响指标(表3)。

表3 耕地SOCD影响因素

Table 3 Influencing factors of cultivated soil organic carbon density (SOCD) in cultivated land

因素类型 Factor type	变量 Variable	指标 Indicator
自然 Natural	X_1	年均气温 Average annual temperature
	X_2	年均降水量 Average annual precipitation
	X_3	年均蒸发量 Average annual evaporation
	X_4	光合有效辐射吸收比率 Photosynthetic active radiation absorption ratio
	X_5	海拔高度 Altitude
	X_6	坡度 Slope
	X_7	叶面积指数 Leaf area index
	X_8	归一化植被指数 Normalized vegetation index
	X_9	土壤侵蚀模数 Soil erosion modulus
人为 Human	Z_1	氮肥施用量 Nitrogen fertilizer application rate
	Z_2	磷肥施用量 Phosphate fertilizer application rate
	Z_3	钾肥施用量 Potassium fertilizer application rate
	Z_4	有效灌溉面积 Effective irrigated area
	Z_5	农业机械总动力 Total power of agricultural machinery
	Z_6	粮食产量 Grain yield
	Z_7	秸秆还田面积 Area of straw returning to field

1.3.1 线性回归和分层回归分析

多元线性回归模型(Linear Regression Model, LRM), y 为因变量, $x_1, x_2, \dots, x_p$ 为自变量,其数学模型为:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x_1 + \beta_2 x_2 + \dots + \beta_p x_p + \epsilon \quad (3)$$

式中: β_p ,回归系数; ϵ ,误差项。

分层回归模型(Hierarchical Regression Model, HRM)建立在线性回归分析基础上,本研究将自然因素的变量引入到分层回归模型一(HRM I),随后在分层回归模型二(HRM II)中加入人为因素变量。通过比较2个模型对因变量的解释能力和显著性水平来评估核心变量的重要性。

1.3.2 空间回归分析

采用莫兰指数来衡量 SOCD 的空间分布特征。采用空间回归模型估计自变量与因变量的关系,为提高预测结果的稳健性,将在每个农业区内分别建立回归模型。空间误差模型(SEM)认为误差项在空间上存在自相关。公式如下:

$$Y = \beta X + \varepsilon, \varepsilon = \lambda w \varepsilon + u, u \sim N[0, \sigma^2 I] \quad (4)$$

式中: Y ,被解释变量矩阵; X ,解释变量矩阵; β ,参数向量; w ,残差的空间邻接权重矩阵(残差是指实际观察值与估计值或称拟合值之间的差); ε ,误差项; λ ,残差项的空间相关性,是用来度量邻近个体的残差项对被解释变量的残差项的影响程度; u ,随机误差项。

空间滞后模型(SLM)认为因变量在空间上存在自相关,公式如下:

$$Y = \rho w Y + \beta X + \varepsilon, \varepsilon \sim N[0, \sigma^2 I] \quad (5)$$

式中: Y ,被解释变量矩阵; X ,解释变量矩阵; ρ ,空

间效应系数; β ,参数向量; w ,空间邻接权重矩阵; ε ,误差项。

2 结果与分析

2.1 耕地 SOCD 空间分布特征

由表 4 和表 5 可知,耕地 SOCD 在不同农业区内的空间分布存在较大差异。其中,水田 SOCD 由高到低为东北>华南>长江中下游>西南>黄淮海>甘新>黄土高原;旱地 SOCD 由高到低为东北>华南>西南>长江中下游>甘新>黄土高原>黄淮海区。水田和旱地表层 SOCD 最高值均为东北区(水田 SOCD 为 7.6 ± 2.39 ,旱地 SOCD 为 6.58 ± 2.75),甘新区、黄土高原区及黄淮海区(水田 SOCD 分别为 3.08 ± 1.29 、 3.09 ± 0.38 及 3.15 ± 0.43 ,旱地 SOCD 分别为 3.24 ± 1.27 、 3.11 ± 0.97 、 2.78 ± 0.36 ,3 个区域的水田和旱地 SOCD 分布均无显著差异)较低,水田和旱地 SOCD 空间分布特征相似。

表 4 各农业区水田表层土壤有机碳密度(SOCD)统计

Table 4 Statistics of surface SOCD value of paddy field in each agricultural region

区域 Region	样本数量 Sample size	SOCD/(kg/m ²)	CV/%
东北 Northeast	1 402	7.60 ± 2.39^a	0.31
华南 South China	1 096	4.53 ± 0.85^b	0.19
长江中下游 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	4 767	4.31 ± 0.66^b	0.15
西南 Southwest	2 108	4.15 ± 0.99^{bc}	0.24
黄淮海 Huang-Huai-Hai	417	3.15 ± 0.43^d	0.14
甘新 Gan-Xin	103	3.09 ± 0.38^d	0.12
黄土高原 Loess Plateau	15	3.08 ± 1.29^d	0.42

注:不同字母表示差异显著($P < 0.05$)。下同。
Notes: Different letters indicate significant difference ($P < 0.05$). The same below.

表 5 各农业区旱地表层土壤有机碳密度(SOCD)统计

Table 5 Statistics of surface SOCD value of paddy field in each agricultural region

区域 Region	样本数量 Sample size	SOCD/(kg/m ²)	CV/%
东北 Northeast	1 941	6.58 ± 2.75^a	0.42
华南 South China	432	4.79 ± 0.92^{bc}	0.19
西南 Southwest	1 524	4.35 ± 1.20^{cd}	0.28
长江中下游 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	713	4.21 ± 0.81^d	0.19
甘新 Gan-Xin	905	3.24 ± 1.27^{ef}	0.39
黄土高原 Loess Plateau	1 118	3.11 ± 0.97^{ef}	0.31
黄淮海 Huang-Huai-Hai	2 060	2.78 ± 0.36^f	0.13

由图1可知,全国耕地SOCD在市域尺度下存在空间自相关。耕地SOCD在市域尺度下的全局

Moran's I 为0.704,数据在第一象限、第三象限分布,呈现“高-高”集聚和“低-低”集聚的空间分布特征。

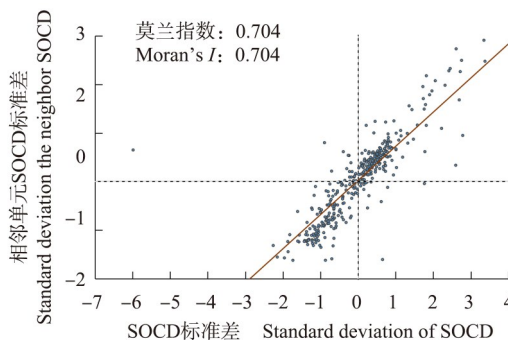


图1 耕地表层SOCD全局莫兰指数散点图

Fig. 1 Global Moran Index scatter plot of organic carbon density in cultivated surface soil

2.2 各农业区模型选择结果

由表6可知,长江中下游区SOCD空间自相关性不显著(Moran's I -error=0.23>0.1),选择线性回归模型;东北区选择空间误差模型(LM-error=0.04<0.05, Robust LM-error=0.005<0.01);甘新区选择空间滞后模型(LM-lag=0.00<0.01, Robust LM-lag=0.006<0.01),但残差不服从正态分布,模型不稳健;黄淮海区选择空间滞后模型(LM-lag=0.005<0.01, Robust LM-lag=0.001<0.01);华南区选择空间滞后模型(LM-lag=0.328, Robust LM-lag=0.08);黄土高原区选择空间滞后模型(LM-lag=0.00<0.01, Robust LM-lag=0.00<0.01),但残差不服从正态分布,模型不稳健;西南区选择空间滞后模型(LM-lag=0.563, Robust LM-lag=0.508)。

2.3 自然及人为因素的差异化影响

由表7可知,线性回归模型在部分农业区内对耕地SOCD与影响因素关系的拟合程度较高,其中东北、西南区HRM II的 R^2 均>0.9,黄淮海和长江中下游区HRM II的 R^2 分别为0.798和0.724;而对部分农业区SOCD与影响因素关系的拟合程度很低,黄土高原区、甘新区HRM II的 R^2 分别为0.329和0.168。在自然因素的基础上加入人为因素后,HRM II对各农业区耕地SOCD空间差异的解释水平较HRM I有不同程度的提升。其中,黄淮海区最为显著,提升程度为0.152($\Delta R^2=0.152$, $P=0.001<0.01$),其次是华南、长江中下游及西南区,提升程度分别为0.068、0.053和0.031,但均不显著($P>0.05$)。

2.4 耕地SOCD空间差异的显著影响因素

由表8可知,水热条件(年均气温、年均降水量和年均蒸发量)和植被条件(叶面积指数、归一化植被指数)对长江中下游、华南、西南和东北区的耕地SOCD的影响更为显著;土壤侵蚀仅对东北区耕地SOCD的影响显著;秸秆还田面积对耕地SOCD的影响均为正向(甘新、黄土高原区因缺少相关数据未开展分析)。

各项因素对不同农业区耕地SOCD的显著性影响存在差异:年均气温(X_1)对长江中下游区为显著正向影响,对东北和西南区均为显著负向影响;年均降水量(X_2)对长江中下游区为显著负向影响,对西南区为显著正向影响;年均蒸发量(X_3)对长江中下游和东北区均为显著负向影响;光合有效辐射吸收比率(X_4)对长江中下游、华南和西南区均为显著负向影响;海拔高度(X_5)对长江中下游、黄淮海和西南区均为显著正向影响;坡度(X_6)对黄淮海和黄土高原区均为显著正向影响;叶面积指数(X_7)对长江中下游、华南和西南区均为显著正向影响;归一化植被指数(X_8)对黄淮海区为显著负向影响,对华南区为显著正向影响;土壤侵蚀模数(X_9)对东北区为显著负向影响;氮肥施用量(Z_1)对东北和华南区为显著负向影响,对黄淮海区为显著正向影响;磷肥施用量(Z_2)对黄土高原区为显著正向影响,对西南区为显著负向影响;钾肥施用量(Z_3)对黄淮海和黄土高原区为显著负向影响,对华南区为显著正向影响;有效灌溉面积(Z_4)对黄淮海区为显著正向影响;农业机械总动力(Z_5)对长江中下游区为显著正向影响,对黄淮海区为显著负向影响;粮食产量

表6 空间回归模型参数检验结果

Table 6 Parameter test results of spatial regression model

指标 Index	长江中下游区 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	东北区 Northeast	甘新区 Gan-Xin	黄淮海区 Huang-Huai-Hai	华南区 South China	黄土高原区 Loess Plateau	西南区 Southwest
残差正态性 检验 Test on normality of Errors	0.326	0.932	0.000	0.442	0.576	0.000	0.768
空间相关性 检验 Moran' I-error	0.230	0.028*		0.065	0.039*	0.000**	0.074
空间滞后最大 似然检验 LM-lag		0.713		0.005**	0.328	0.000**	0.563
空间误差最大 似然检验 LM-error		0.040*		0.895	0.911	0.001**	0.992
空间滞后最大 似然法的稳健 性检验 Robust LM-lag		0.057	0.006**	0.001**	0.080	0.000**	0.508
空间误差最大 似然法的稳健 性检验 Robust LM-error		0.005**	0.833	0.085	0.146	0.043	0.748
适用模型 Applicable model	LRM	SEM	SLM	SLM	SLM	SLM	SLM
R ²	0.724	0.940	0.825	0.842	0.680	0.847	0.921

注:*表示在 $P<0.05$ 水平上模型拟合效果显著,**表示在 $P<0.01$ 水平上模型拟合效果显著。下同。
Notes: * indicates that the model has a significant degree of fit at $P<0.05$ level. ** indicates that the model has a significant degree of fit at $P<0.01$ level. The same below.

(Z_6)对长江中下游和西南区为显著负向影响,对黄淮海区为显著正向影响;秸秆还田面积(Z_7)对黄淮海和西南区均为显著正向影响。

3 讨论

已有研究表明,气温对耕地SOCD的影响倾向于负向,而降水则倾向于正向,蒸发的影响通常为负向^[51-56]。本研究结果发现,水热条件显著影响西南、东北和长江中下游区的耕地SOCD,年均气温在西南和东北区均表现为显著负向影响;年均降水量在西南区表现为显著正向影响;年均蒸发量在东北

区表现为显著负向影响。这些发现与冯金侠^[57]的研究结果一致,即区域耕地SOCD水平越高,其与水热因子的相关性越显著。

植被条件显著影响西南、华南、黄淮海和长江中下游区的耕地SOCD。已有研究表明,单位土地叶面积增加往往可以增加光能截获量^[58],进而影响农业生产量,随着光合作用的增强,农业生产力及粮食产量也随之得到提升^[59]。然而作物,如水稻,向地下部分分配的光合碳量比例仅为2%~28%,地上部分分配到的光合碳量在成熟期高达78%~90%^[60]。且细根死亡、周转进入到土壤的有机质是

表 7 分层回归模型结果
Table 7 Results of hierarchical regression model

区域 Region	分层模型 Hierarchical regression model	R^2	ΔR^2	ΔF 的 P P of ΔF
长江中下游 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	HRM I	0.671		0.000
	HRM II	0.724	0.053	0.110
东北 Northeast	HRM I	0.926		0.000
	HRM II	0.947	0.021	0.324
甘新 Gan-Xin	HRM I	0.149		0.737
	HRM II	0.168	0.019	0.995
黄淮海 Huang-Huai-Hai	HRM I	0.646		0.000
	HRM II	0.798	0.152 [*]	0.001
华南 South China	HRM I	0.580		0.000
	HRM II	0.648	0.068	0.365
黄土高原 Loess Plateau	HRM I	0.315		0.355
	HRM II	0.329	0.014	0.999
西南 Southwest	HRM I	0.891		0.000
	HRM II	0.921	0.031	0.212

注：HRM I，分层回归模型一；HRM II，分层回归模型二。 ΔR^2 ，人为因素加入前后，回归模型对耕地 SOCD 空间变异解释水平的变化； ΔF 的 P 检验值表示人为因素加入前后，回归模型对耕地 SOCD 空间变异解释水平变化的显著性检验结果。
Notes: HRM I, the first layer model; HRM II, second layer model. The difference of R -square represents the change of the interpretation level of SOCD spatial variation in the regression model before and after the addition of human factors. The P test value of the F change value represents the significance test result of the regression model's interpretation level change of SOCD spatial variation before and after the addition of human factors.

地上凋落物的数倍^[61-62]。本研究结果发现,植被条件对耕地 SOCD 的影响在宏观层面既有正向也有负向,但在大多数区域并不显著。这表明耕地土壤有机碳的变化更多的与地下生物量(作物根系存留)和地上凋落物(作物秸秆管理)的变化有关,与地上生物量(耕地作物植被条件)的关系虽总体呈正向,但在各区域并未形成显著的稳健性关联。

本研究结果发现,土壤侵蚀仅对东北区耕地 SOCD 空间分布产生了显著影响。这与马瑞等^[63]研究结果一致,即土壤侵蚀与土壤质量、土壤碳含量之间呈负相关关系^[64-65]。

施肥对水田和旱地土壤有机碳的影响机制存在差异^[66],在相同的化肥施用条件下,灌溉地和旱地的有机碳还田量表现出显著差异^[67]。本研究发现,在以水田为主的华南、东北及西南区,氮肥施用

量在华南和东北区表现为显著负向影响,而磷肥施用量在西南区表现为显著负向影响,与此相反,钾肥施用量在华南区表现为显著正向影响。在以旱地为主的黄淮海和黄土高原区,氮肥施用量在黄淮海区表现为显著正向影响,磷肥施用量在黄土高原区表现为显著正向影响,钾肥施用量则在 2 个地区均表现为显著负向影响。但本研究仅揭示了宏观现象,不同类型化肥施用与不同区域 SOCD 差异之间的响应关系及微观机制,仍需要进一步深入研究。

秸秆还田可以显著提高土壤有机碳的含量^[68-69]。秸秆还田能够增加土壤中有机物质的输入,并能增强土壤保肥、保水性能,增加土壤孔隙度和通气性,改善土壤物理性质,加强植物和微生物的生理活性,从而增强土壤有机碳的转化和积累。

表8 回归模型结果

Table 8 Results of regression model

参数 Parameter	线性回归模型 LRM	空间误差模型 SEM	空间滞后模型 SLM				
	长江中下游区 Middle and Lower reaches of the Yangtze River	东北区 Northeast	甘新区 Gan-Xin	黄淮海区 Huang-Huai-Hai	华南区 South China	黄土高原区 Loess Plateau	西南区 Southwest
R^2	0.724	0.940	0.825	0.842	0.680	0.847	0.921
X_1	0.292**	-0.301*	-0.011	0.040	-0.070	0.066	-0.186**
X_2	-0.000*	-0.003	0.012	0.000	0.000	0.000	0.001**
X_3	-0.002**	-0.006**	0.000	0.000	-0.001	-0.001	0.000
X_4	-1.559*	-4.767	3.384	-0.653	-5.867**	-0.403	-7.757**
X_5	0.002**	0.004	0.001	0.001**	0.000	0.000	0.001*
X_6	-0.060	-0.587	0.220	0.429**	0.079	0.268*	-0.026
X_7	0.343*	0.602	-0.771	0.397	1.046**	-0.276	1.435**
X_8	-0.819	0.116	-4.518	-1.375*	4.977**	2.418	-2.538
X_9	0.014	-0.145**	-1.233	-0.009	0.017	0.011	0.001
Z_1	-0.018	-0.055*	0.094	0.009*	-0.057*	-0.065	0.104
Z_2	-0.021	0.112	2.514	-0.009	-0.050	0.254*	-0.511**
Z_3	0.051	0.183	-12.403	-0.032*	0.184*	-0.523*	0.221
Z_4	0.000	-0.019	0.150	0.000**	0.029	0.001	0.048
Z_5	0.002**	0.001	-0.020	-0.001**	-0.001	0.002	0.001
Z_6	-0.001*	0.000	0.016	0.001*	-0.001	-0.005	-0.004*
Z_7	0.012	0.018		0.047**	0.073		0.444**

注: X_1 , 年均气温; X_2 , 年均降水量; X_3 , 年均蒸发量; X_4 , 光合有效辐射吸收比率; X_5 , 海拔高度; X_6 , 坡度; X_7 , 叶面积指数; X_8 , 归一化植被指数; X_9 , 土壤侵蚀模数; Z_1 , 氮肥施用量; Z_2 , 磷肥施用量; Z_3 , 钾肥施用量; Z_4 , 有效灌溉面积; Z_5 , 农业机械总动力; Z_6 , 粮食产量; Z_7 , 秸秆还田面积。

Notes: X_1 , average annual temperature; X_2 , average annual precipitation; X_3 , average annual evaporation; X_4 , photosynthetic active radiation absorption ratio; X_5 , altitude; X_6 , slope; X_7 , the leaf area index; X_8 , the normalized vegetation index; X_9 , the soil erosion modulus; Z_1 , nitrogen fertilizer application rate; Z_2 , phosphate fertilizer application rate; Z_3 , potassium fertilizer application rate; Z_4 , the effective irrigation area; Z_5 , the total power of agricultural machinery; Z_6 , the grain yield; Z_7 , the area of straw returned to the field.

此外,王怀苹等^[70]针对秸秆直接还田带来的病虫害加重、作物出苗率降低等问题提出了相对应的解决方法。应鼓励采用秸秆过腹还田、秸秆腐化剂等辅助秸秆还田技术,加速秸秆转化为腐殖质。本研究发现,秸秆还田面积对西南和黄淮海区的耕地SOC_D存在显著正向影响,对其他地区的正向影响却不显著,后续可进一步对各区域秸秆还田政策落

实情况展开调查研究,以分析造成这种差异的原因。

综上,对于气温较高、降水充足、以水田为主的长江中下游、华南和西南区,水热条件、植被条件和化肥施用等对耕地SOC_D影响显著,应注重土壤物化性质的改善,使用土壤改良剂(如生物炭等)以提高耕地土壤保水保肥能力,进而辅助水热条件、植

被条件等自然因素对耕地碳汇产生正向作用;另外可采取精准配比施肥的农业生产措施,按照化肥施用对水田 SOCD 的影响机制制定科学的施肥方案,促进化肥施用对几个地区水田土壤碳汇产生正向影响。对于处于高纬度、以水田为主的东北区,水热条件和土壤侵蚀对耕地 SOCD 影响显著,需改善土壤物化性质以提高保水保肥能力,此外应更加关注土壤侵蚀对耕地土壤碳汇的负向影响,推广保护性耕作技术,通过休耕、免耕以及减少深耕等措施保护土壤物理结构,防止水土流失。对于处于中纬度、以旱地为主的黄淮海和黄土高原区,地形条件和化肥施用对耕地 SOCD 影响显著,可采取精准配比施肥的农业生产措施,按照化肥施用对旱地 SOCD 的影响机制制定科学的施肥方案,促进化肥施用对东北区水田土壤碳汇产生正向影响。此外,秸秆还田面积被证实对耕地 SOCD 有正向影响,尤其是对西南和黄淮海区有显著影响,应鼓励实施秸秆还田,持续改良秸秆还田方式,以促进耕地土壤碳的有效输入。

4 结 论

基于中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集(2010—2018年),进行统计分析和空间自相关分析,揭示了全国各农业区耕地 SOCD 分布特征,并采用分层回归和空间回归模型,分析了自然和人为因素对七大农业区耕地 SOCD 的宏观影响。研究结论如下:

1)全国各农业区耕地 SOCD 分布特征呈现较大差异,水田 SOCD 由高到低表现为东北>华南>长江中下游>西南>黄淮海>甘新>黄土高原区;旱地 SOCD 由高到低为东北>华南>西南>长江中下游>甘新>黄土高原>黄淮海区。水田和旱地 SOCD 分布特征相似,最高均为东北区(水田 7.6 ± 2.39 ,旱地 6.58 ± 2.75),甘新、黄土高原及黄淮海区(水田分别为 3.08 ± 1.29 、 3.09 ± 0.38 和 3.15 ± 0.43 ,旱地分别为 3.24 ± 1.27 、 3.11 ± 0.97 和 2.78 ± 0.36 ,3个区域的水田和旱地 SOCD 分布无显著差异)均较低。

2)根据分层回归模型一(HRM I),除甘新、黄土高原区外,其他农业区回归模型的拟合水平 $R^2 > 0.5$,自然因素对大部分农业区耕地 SOCD 的空间差异起主导作用。加入秸秆还田、氮磷钾肥施用等

人为因素指标后,分层回归模型二(HRM II)对各农业区耕地 SOCD 空间分布差异的解释水平有不同程度的提升,其中黄淮海区最为显著($\Delta R^2 = 0.152$, ΔF 的 $P = 0.001 < 0.01$)。

3)通过对模型进行参数检验,长江中下游区采用线性回归模型(空间自相关性不显著 Moran' I -error = 0.23 > 0.1 且未通过相关参数检验),东北区采用空间误差模型(空间自相关性显著 Moran' I -error = 0.028 < 0.1 且通过空间误差模型参数检验),其他几个区采用空间滞后模型(空间自相关性显著 Moran' I -error < 0.1 且通过空间滞后模型参数检验)。

4)根据各农业区回归模型结果,耕地 SOCD 的影响机制在各农业区既有共性也有差异,海拔高度(X_5)和秸秆还田面积(Z_7)对各农业区耕地 SOCD 全部为正向影响(各区 X_5 、 Z_7 对应系数均 > 0),水热和植被条件、土壤侵蚀、化肥施用、灌溉、农业机械使用和粮食产量对不同农业区的耕地 SOCD 的影响存在差异。

参考文献 References

- [1] 金书秦,林煜,牛坤玉. 以低碳带动农业绿色转型:中国农业碳排放特征及其减排路径[J]. 改革, 2021, (5): 29-37
Jin S Q, Lin Y, Niu K Y. Driving green transformation of agriculture with low carbon: Characteristics of agricultural carbon emissions and its emission reduction path in China [J]. *Reform*, 2021, (5): 29-37 (in Chinese)
- [2] 韩明会,李保国,张丹,李颖. 再生农业:基于土地保护性利用的可持续农业[J]. 中国农业科学, 2021, 54(5): 1003-1016
Han M H, Li B G, Zhang D, Li Y. Regenerative agriculture-sustainable agriculture based on the conservational land use [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(5): 1003-1016 (in Chinese)
- [3] 马晓哲,王铮. 土地利用变化对区域碳源汇的影响研究进展[J]. 生态学报, 2015, 35(17): 5898-5907
Ma X Z, Wang Z. Progress in the study on the impact of land-use change on regional carbon sources and sinks [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35 (17): 5898-5907 (in Chinese)
- [4] 穆少杰,朱超,周可新,李建龙. 内蒙古草地退化防治对策及碳增汇途径研究[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 217-225
Mu S J, Zhu C, Zhou K X, Li J L. The preventive strategies of degradation and the approaches to enhance carbon sequestration ability in Inner Mongolia grassland [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2017, 25(2): 217-225 (in Chinese)
- [5] 任凤玲. 不同施肥下我国典型农田土壤有机碳固定特征及驱动因素[D]. 北京:中国农业科学院, 2021
Ren F L. Characteristics and driving factors of soil organic carbon fixation in typical farmland in China under different fertilization [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021 (in Chinese)

- [6] Oldfield E E, Bradford M A, Wood S A. Global meta-analysis of the relationship between soil organic matter and crop yields [J]. *Soil*, 2019, 5(1): 15-32
- [7] 贺美,王迎春,王立刚,朱平,李长生. 应用DNDC模型分析东北黑土有机碳演变规律及其与作物产量之间的协同关系[J]. 植物营养与肥料学报, 2017, 23(1): 9-19
- He M, Wang Y C, Wang L G, Zhu P, Li C S. Using DNDC model to simulate black soil organic carbon dynamics as well as its coordinate relationship with crop yield [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(1): 9-19(in Chinese)
- [8] 任其然,邓丽娟,焦小强. 华北平原潮质土壤协同实现有机碳提升,粮食增产稳产的途径:以曲周县为例[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1): 310-318
- Ren Q R, Deng L J, Jiao X Q. Approaches to the organic carbon enhancement and grain yield stability in north China plain based on the coordination of tidal soils: A case study of Quzhou County [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1): 310-318(in Chinese)
- [9] 邹文秀,邱琛,韩晓增,郝翔翔,刘晓洁,陆欣春,严君,陈旭. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. 土壤与作物, 2020, 9(4): 407-418
- Zou W X, Qiu C, Han X Z, Hao X X, Liu X J, Lu X C, Yan J, Chen X. Effects of long-term manure application on black soil fertility and maize yield [J]. *Soils and Crops*, 2020, 9(4): 407-418(in Chinese)
- [10] 黄凯文,马珍,苦君月,张珍明,姜鑫,黄先飞. 土壤有机碳损失机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(24): 26-32
- Huang K W, Ma Z, Zhan J Y, Zhang Z M, Jiang X, Huang X F. Research progress on mechanism of soil organic carbon losses [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2022, 50(24): 26-32(in Chinese)
- [11] Hobley E, Wilson B, Wilkie A, Gray J, Koen T. Drivers of soil organic carbon storage and vertical distribution in Eastern Australia [J]. *Plant and Soil*, 2015, 390(1): 111-127
- [12] 代杰瑞,庞绪贵,曾宪东,王红晋. 山东省土壤有机碳密度的空间分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2015, 28(9): 1449-1458
- Dai J R, Pang X G, Zeng X D, Wang H J. Soil carbon density and distribution and influencing factors in Shandong province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(9): 1449-1458(in Chinese)
- [13] 刘国栋,李禄军,戴慧敏,许江,刘凯,张一鹤,杨泽. 松辽平原土壤碳库变化及其原因分析[J]. 物探与化探, 2021, 45(5): 1109-1120
- Liu G D, Li L J, Dai H M, Xu J, Liu K, Zhang Y H, Yang Z. Change in soil carbon pool in Songliao Plain and its cause analysis [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1109-1120(in Chinese)
- [14] 吕丽平,王登峰,魏志远,漆智平,唐树梅. 近20年海南岛土壤有机碳时空变异[J]. 热带作物学报, 2016, 37(2): 338-344
- Lv L P, Wang D F, Wei Z Y, Qi Z P, Tang S M. The spatial and temporal variability of SOC in Hainan island over the past 20 years [J]. *Chinese Journal of Tropical Crops*, 2016, 37(2): 338-344(in Chinese)
- [15] 王丽华,薛晶月,谢雨,吴彦. 不同气候类型下四川草地土壤有机碳空间分布及影响因素[J]. 植物生态学报, 2018, 42(3): 297-306
- Wang L H, Xue J Y, Xie Y, Wu Y. Spatial distribution and influencing factors of soil organic carbon among different climate types in Sichuan, China [J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2018, 42(3): 297-306(in Chinese)
- [16] 杨红飞,穆少杰,李建龙. 气候变化对草地生态系统土壤有机碳储量的影响[J]. 草业科学, 2012, 29(3): 392-400
- Yang H F, Mu S J, Li J L. Effects of climate change on soil organic carbon storage of grassland ecosystem [J]. *Pratacultural Science*, 2012, 29(3): 392-400(in Chinese)
- [17] 贾豪,严宁珍,程永毅,刘洪斌. 渝东南农田土壤有机碳空间分布特征及影响因素[J]. 核农学报, 2019, 33(6): 1256-1263
- Jia H, Yan N Z, Cheng Y Y, Liu H B. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil organic carbon in farmland in southeast Chongqing [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2019, 33(6): 1256-1263(in Chinese)
- [18] 孔祥斌,胡莹洁,李月,段增强. 北京市耕地表层土壤有机碳分布及其影响因素[J]. 资源科学, 2019, 41(12): 2307-2315
- Kong X B, Hu Y J, Li Y, Duan Z Q. Distribution and influencing factors of soil organic carbon of cultivated land topsoil in Beijing [J]. *Resources Science*, 2019, 41(12): 2307-2315(in Chinese)
- [19] 张梦旭,刘蔚,朱猛,李若麟. 甘肃河西山地土壤有机碳储量及分布特征[J]. 中国沙漠, 2019, 39(4): 64-72
- Zhang M X, Liu W, Zhu M, Li R L. Soil organic carbon storage and distribution patterns in the mountainous areas of the Hexi region, Gansu, China [J]. *Journal of Desert Research*, 2019, 39(4): 64-72(in Chinese)
- [20] 朱猛,冯起,张梦旭,秦燕燕. 祁连山中段草地土壤有机碳分布特征及其影响因素[J]. 草地学报, 2018, 26(6): 1322-1329
- Zhu M, Feng Q, Zhang M X, Qin Y Y. Patterns and influencing factors of soil organic carbon in grasslands of the middle Qilian mountains [J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2018, 26(6): 1322-1329(in Chinese)
- [21] 邹润彦,周宏冀,郭熙,但承龙,吕添贵,李洪义. 环鄱阳湖区农田土壤有机碳影响因素空间分布格局分析及制图研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(5): 1121-1131
- Zou R Y, Zhou H J, Guo X, Dan C L, Lv T G, Li H Y. Spatial distribution and mapping of influencing factors of farmland soil organic carbon in the Poyang Lake region [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2019, 28(5): 1121-1131(in Chinese)
- [22] Xia X Q, Yang Z F, Xue Y, Shao X, Yu T, Hou Q Y. Spatial analysis of land use change effect on soil organic carbon stocks in the eastern regions of China between 1980 and 2000 [J]. *Geoscience Frontiers*, 2017, 8(3): 597-603
- [23] Zhao M S, Qiu S Q, Wang S H, Li D C, Zhang G L. Spatial-temporal change of soil organic carbon in Anhui Province of East China [J/OL]. *Geoderma Regional*, (2021-06-26). DOI:doi. org/10. 1016/j. geodrs. 2021. e00415
- [24] Zhou Y, Hartemink A E, Shi Z, Liang Z Z, Lu Y L. Land use and climate change effects on soil organic carbon in North and Northeast China [J]. *Science of The Total Environment*, 2019, 647: 1230-1238
- [25] 崔东,李卫红,朱成刚,杨玉海,孙国军. 伊犁河谷不同土地利用方式下土壤有机碳含量与土壤理化性质相关性分析[J]. 资源科学, 2016, 38(7): 1239-1245
- Cui D, Li W H, Zhu C G, Yang Y H, Sun G J. Soil organic carbon content in relation to soil physicochemical properties under different land use types in the Yili Valley [J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1239-1245(in Chinese)
- [26] 季淮. 洪泽湖河湖交汇区不同土地覆被/利用类型土壤有机碳分布特征及其影响因素[D]. 南京:南京林业大学, 2021
- Ji H. Distribution characteristics and influencing factors of soil organic carbon in different land cover/use types in the intersection of Hongze Lake and Lake [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2021(in Chinese)
- [27] 苗正红,杨清臣,邱中军,毕强,王宗明. 基于gis技术的土地利用变化对表层土壤有机碳储量的影响:以富锦市为例[J]. 水土保持研究, 2015, 22(6): 19-23
- Miao Z H, Yang Q C, Qiu Z J, Bi Q, Wang Z M. Impact of land use

- change on soil organic carbon stocks based on GIS: A case study in Fujian city[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2015, 22(6): 19-23 (in Chinese)
- [28] 张维理, KOLBE H, 张认连, 冀宏杰. 农田土壤有机碳管理与有机质平衡算法[J]. 中国农业科学, 2020, 53(2): 332-345
- Zhang W L, Kolbe H, Zhang R L, Ji H J. Soil organic carbon management and farmland organic matter balance method[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2020, 53(2): 332-345(in Chinese)
- [29] 张伟, 李鹏, 肖列, 赵宾华, 时鹏. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(5): 1140-1150
- Zhang Y, Li P, Xiao L, Zhao B H, Shi P. Effects of topography and land use on soil organic carbon in hilly region of Loess Plateau [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56(5): 1140-1150(in Chinese)
- [30] 赵苗苗, 邵蕊, 李仁强, 杨吉林, 徐明. 中国南方旱田转水田后温室气体减排年限预测[J]. 资源科学, 2019, 41(7): 1286-1294
- Zhao M M, Shao R, Li R Q, Yang J L, Xu M. Simulation of greenhouse gas emission reduction years after the conversion of cropland into paddy field in southern China[J]. *Resources Science*, 2019, 41(7): 1286-1294 (in Chinese)
- [31] Dahal N, Bajracharya R M. Effects of sustainable soil management practices on distribution of soil organic carbon in upland agricultural soils of mid-hills of nepal [J]. *Nepal Journal of Science and Technology*, 2013, 13(1):133-141
- [32] 刘杰, 李玲玲, 谢军红, 邓超超, 彭正凯, Yeboah Stephen, Lamptey Shirley. 连续14年保护性耕作对土壤总有机碳和轻组有机碳的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2017, 35(1): 8-13
- Liu J, Li L L, Xie J H, Deng C C, Peng Z K, Stephen Y, Shirley L. Soil total organic carbon and its light fractions in response to 14 years of conservation tillage[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(1): 8-13(in Chinese)
- [33] 张鹏鹏, 濮晓珍, 张旺峰. 干旱区绿洲农田不同种植模式和秸秆管理下土壤质量评价[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 839-849
- Zhang P P, Pu X Z, Zhang W F. Soil quality assessment under different cropping system and straw management in farmland of arid oasis region [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2018, 29(3): 839-849 (in Chinese)
- [34] 周泉, 王龙昌, 邢毅, 马淑敏, 张小短, 陈娇, 石超. 秸秆覆盖条件下紫云英间作油菜的土壤团聚体及有机碳特征[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4): 1235-1242
- Zhou Q, Wang L C, Xing Y, Ma S M, Zhang X D, Chen J, Shi C. Effects of Chinese milk vetch intercropped with rape under straw mulching on soil aggregate and organic carbon character[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4): 1235-1242(in Chinese)
- [35] 蔡丽君, 张敬涛, 刘婧琦, 盖志佳, 郭震华, 赵桂范. 长期免耕秸秆还田对寒地土壤有机碳及大豆产量的影响[J]. 作物杂志, 2021, (6): 189-192
- Cai L J, Zhang J T, Liu J Q, Gai Z J, Guo Z H, Zhao G F. Effects of long-term no-tillage straw returning on soil organic carbon and soybean yield in cold region[J]. *Crops*, 2021, (6): 189-192(in Chinese)
- [36] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响[J]. 地球科学进展, 2005, 20(6): 687-692
- Meng L, Ding W X, Cai Z C, Qin S W. Storage of soil organic and soil respiration as effected by long-term quantitative fertilization[J]. *Advance in Earth Sciences*, 2005, 20(6): 687-692(in Chinese)
- [37] 张莉, 李玉义, 连焕成, 王婧, 丛萍, 张珺, 郭建军. 玉米秸秆颗粒还田对土壤有机碳含量和作物产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(2): 160-168
- Zhang L, Li Y Y, Pang H C, Wang J, Cong P, Zhang J T, Guo J J. Effects of granulated maize straw incorporation on soil organic carbon contents and grain yield[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(2): 160-168(in Chinese)
- [38] Guo L B, Gifford R M. Soil carbon stocks and land use change: A meta analysis [J]. *Global Change Biology*, 2002, 8(4):345-360
- [39] Huang Y, Sun W J. Changes in topsoil organic carbon of croplands in mainland China over the last two decades [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 51(15):1785-1803
- [40] Wang Y L, Wu P N, Mei F J, Ling Y, Qiao Y B, Liu C S, Leghari S J, Guan X K, Wang T C, T Wang. Does continuous straw returning keep China farmland soil organic carbon continued increase? A meta-analysis [J/OL]. *Journal of Environmental Management*, (2021-04-07). DOI: doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112391
- [41] Nguemezi C, Tematio P, Silatsa F B T, Yemefack M. Spatial variation and temporal decline (1985 – 2017) of soil organic carbon stocks (SOCS) in relation to land use types in Tombel area, South-West Cameroon [J/OL]. *Soil and Tillage Research*, (2021-06-14). DOI: doi.org/10.1016/j.still.2021.105114
- [42] Deng X F, Chen X J, Ma W Z, Ren Z Q, Zhang M H, Grieneisen M L, Long W L, Ni Z H, Zhan Y, Lv X N. Baseline map of organic carbon stock in farmland topsoil in East China [J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 254:213-223
- [43] 刘骞. 盐碱稻田熟化过程中土壤有机碳变化及其影响因素研究[D]. 长春: 吉林大学, 2020
- Liu Q. Study on soil organic carbon change and its influencing factors during saline-alkali paddy field ripening [D]. Changchun: Jilin University, 2020(in Chinese)
- [44] 肖霜霜, 陈武荣, 许燕萍, 陈晖, 孙杰. 武夷山山地土壤有机碳的垂直分布规律及影响因素研究[J]. 安徽农学通报, 2008, 14(11): 65-67, 91
- Xiao S S, Chen W R, Xu Y P, Chen H, Sun J. Study on vertical distribution law and influencing factors of soil organic carbon in Wuyishan mountain area[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2008, 14(11): 65-67, 91(in Chinese)
- [45] Yu H Y, Zha T G, Zhang X X, Ma L M. Vertical distribution and influencing factors of soil organic carbon in the Loess Plateau, China [J/OL]. *Science of the Total Environment*, (2019-11-25). DOI: doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.133632
- [46] Li Y, Xiong K N, Liu Z Q, Li K P, Luo D. Distribution and influencing factors of soil organic carbon in a typical karst catchment undergoing natural restoration [J/OL]. *CATENA*, (2022-02-01). DOI: doi.org/10.1016/j.catena.2022.106078
- [47] 黄凯. 福建省水田土壤有机碳模拟的尺度效应及其影响因素研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2022
- Huang K. Study on scale effects and influencing factors of paddy soil organic carbon simulation in Fujian Province [D]. Fuzhou: Fujian Agriculture and Forestry University, 2022(in Chinese)
- [48] 余涛, 杨忠芳, 侯青叶, 夏学齐, 宗思锋, 李彪. 我国主要农耕地水稻土有机碳含量分布及影响因素研究[J]. 地学前缘, 2011, 18(6): 11-19
- Yu T, Yang Z F, Hou Q Y, Xia X Q, Zong S F, Li B. Distribution and influencing factors of paddy soil organic carbon content in China's major farming areas [J]. *Earth Science Frontiers*, 2011, 18(6): 11-19 (in Chinese)
- [49] 全国农业区划委员会中国综合农业区划编写组. 中国综合农业区划[M]. 北京: 中国农业出版社, 1981
- Group N A R C. *Comprehensive Agricultural Regionalization of China*

- [M]. Beijing: China Agricultural Press, 1981(in Chinese)
- [50] 奚小环,杨忠芳,夏学齐,李敏. 基于多目标区域地球化学调查的中国土壤碳储量计算方法研究[J]. 地学前缘, 2009, 16(1): 194-205
Xi X H, Yang Z F, Xia X Q, Li M. Calculation techniques for soil carbon storage of China based on multi-purpose geochemical survey[J]. *Earth Science Frontiers*, 2009, 16(1): 194-205(in Chinese)
- [51] 赵明松,张甘霖,李德成,赵玉国. 江苏省土壤有机质变异及其主要影响因素[J]. 生态学报, 2013, 33(16): 5058-5066
Zhao M S, Zhang G L, Li D C, Zhao Y G. Variability of soil organic matter and its main factors in Jiangsu Province[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2013, 33(16): 5058-5066(in Chinese)
- [52] 张婧婷,石浩,田汉勤,逯非,徐希燕,刘迪,刚诚诚,方善民,秦小羽,潘乃青,王思远. 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 J T, Shi H, Tian H Q, Lu F, Xu X Y, Liu D, Gang C C, Fang S M, Qin X Y, Pan N Q, Wang S Y. Spatial-temporal changes in and influencing mechanisms for cropland soil organic carbon storage in the North China Plain from 1981 to 2019[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2022, 42(23): 9560-9576(in Chinese)
- [53] 刘峰,赵鹏程,张昀,高晓丹,沙飞,孙萌,张景雯. 从微生物角度揭示气候变暖对土壤有机碳转化影响的研究综述[J]. 土壤通报, 2022, 53(6): 1492-1498
Liu F, Peng Cheng Z, Yun Z, Xiao Dan G, Sha F, Sun M, Jing Wen Z. Effects of climate warming on soil organic carbon storage from the viewpoint of soil microorganism[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(6): 1492-1498(in Chinese)
- [54] 高鲁鹏,梁文举,赵军,孟凡祥,姜勇,闻大中. 气候变化对黑土有机碳库影响模拟研究[J]. 辽宁工程技术大学学报:自然科学版, 2005, 24(2): 288-291
Gao L P, Liang W J, Zhao J, Meng F X, Jiang Y, Wen D Z. Simulation of climate impact on soil organic carbon pool in black soil[J]. *Journal of Liaoning Technical University: Natural Science*, 2005, 24(2): 288-291(in Chinese)
- [55] Zhang L H, Chen Y N, Zhao R F, Li W H. Significance of temperature and soil water content on soil respiration in three desert ecosystems in Northwest China[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(10): 1200-1211
- [56] Ganuza A, Almendros G. Organic carbon storage in soils of the Basque Country (Spain): The effect of climate, vegetation type and edaphic variables[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2003, 37(3): 154-162
- [57] 冯金侠. 长三角农田土壤有机碳密度及碳收集效应研究[D]. 南京:南京农业大学, 2005
Feng J X. Study on soil organic carbon density and carbon collection effect of farmland in Yangtze River Delta [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2005(in Chinese)
- [58] 张林,罗天祥. 植物叶寿命及其相关叶性状的生态学研究进展[J]. 植物生态学报, 2004, 28(6): 844-852
Zhang L, Luo T X. Advances in ecological studies on leaf lifespan and associated leaf traits[J]. *Chinese Journal of Plant Ecology*, 2004, 28(6): 844-852(in Chinese)
- [59] 李印娟. 小麦/玉米套作系统作物光能利用效率与生长竞争恢复机制研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020
Li Y J. Study on the recovery mechanism of crop light energy utilization efficiency and growth competition recovery mechanism in wheat/maize intercropping system [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2020(in Chinese)
- [60] 金剑,王光华,刘晓冰,张磊,米亮,刘俊杰,Stephen J Herbert. 作物生育期内光合碳在地下部的分配及转化[J]. 生态学杂志, 2008, 27(8): 1393-1399
Jin J, Wang G H, Liu X B, Zhang L, Mi L, Liu J J, Herbert S J. Allocation and transformation of photosynthetic carbon in belowground part of crops during their growth period: A review[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2008, 27(8): 1393-1399(in Chinese)
- [61] Haverd V, Smith B, Raupach M, Briggs P, Nieradzik L, Beringer J, Hutley L, Trudinger C M, Cleverly J. Coupling carbon allocation with leaf and root phenology predicts tree-grass partitioning along a savanna rainfall gradient[J]. *Biogeosciences*, 2016, 13(3): 761-779
- [62] 马志良,赵文强. 植物群落向土壤有机碳输入及其对气候变暖的响应研究进展[J]. 生态学报, 2020, 39(1): 270-281
Ma Z L, Zhao W Q. Research progress on input of plant community-derived soil organic carbon and its responses to climate warming[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(1): 270-281(in Chinese)
- [63] 侯亮亮,杨建雨,王永亮,苟鹏飞,胡志强. 东北黑土地土壤侵蚀防治[J]. 现代农业研究, 2024, 30(6): 44-47
Hou L L, Yang J Y, Wang Y L, Gou P F, Hu Z Q. Soil erosion prevention and control of black soil in Northeast China[J]. *Modern Agriculture Research*, 2024, 30(6): 44-47(in Chinese)
- [64] 马瑞,田芷源,赵艳,武逸杭,梁音. 东北黑土典型水蚀区农田侵蚀与退化特征[J]. 水土保持学报, 2024, 5(38): 1-12
Ma R, Tian Z Y, Zhao Y, Wu Y H, Liang Y. Characteristics of erosion and degradation for farmlands in the typical water erosion area of the black soil region, Northeast China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 5(38): 1-12(in Chinese)
- [65] 刘华征,贾燕锋,范昊明,王佳楠,韩文宁. 东北松嫩典型黑土区长缓坡耕地土壤侵蚀沿坡长变化规律及其对土壤质量的影响[J]. 自然资源学报, 2022, 37(9): 2292-2305
Liu H Z, Jia Y F, Fan H M, Wang J N, Han W N. Variation of soil erosion intensity along the long gentle farming slopes and its influence on soil quality in the typical mollisol region, Songnen Plain, Northeast China[J]. *Journal of Natural Resources*, 2022, 37(9): 2292-2305(in Chinese)
- [66] 王成己. 施肥和耕作长期试验下农田土壤有机碳及作物生产力变化的统计研究[D]. 南京:南京农业大学, 2009
Wang C J. Statistical study on changes of soil organic carbon and crop productivity in farmland under long-term experiment of fertilization and tillage[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2009(in Chinese)
- [67] 王仁杰. 长期施肥对黄土高原旱地土壤有机碳库的影响[D]. 杨凌:西北农林科技大学, 2020
Wang R J. Effects of long-term fertilization on soil organic carbon fractions in dry land of Loess Plateau[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2020(in Chinese)
- [68] 段燕,夏雨龙,卢恩佳,张晋京,李翠兰. 秸秆还田对土壤有机碳积累影响的研究进展[J]. 农业技术与装备, 2021, (7): 65-67, 69
Duan Y, Xia Y L, Lu E J, Zhang J J, Li C L. Research progress on the effect of straw returning on soil organic carbon accumulation[J]. *Agricultural Technology & Equipment*, 2021, (7): 65-67, 69(in Chinese)
- [69] 胡雪纯,解文艳,马晓楠,周怀平,杨振兴,刘志平. 长期秸秆还田对旱地玉米土壤有机碳及碳库管理指数的影响[J]. 中国农学通报, 2022, 38(34): 8-13
Hu X C, Xie W Y, Ma X N, Zhou H P, Yang Z X, Liu Z P. Effects of long-term straw returning on organic carbon and carbon pool management index in dryland maize soil[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2022, 38(34): 8-13(in Chinese)

[70] 王怀苹, 郭宇, 王国祥, 宋双全, 程玉红, 马洪波, 夏海东. 黄淮海区域农作物秸秆还田问题探析[J]. 耕作与栽培, 2023, 43(6): 136-138

Huanghuaihai region[J]. *Tillage and Cultivation*, 2023, 43(6): 136-138 (in Chinese)

Wang H P, Guo Y, Wang G X, Song S Q, Cheng Y H, Ma H B, Xia H D.
Analysis on the problem of returning crop orange stalks to the field in

责任编辑: 吕晓梅



第一作者简介: 王欢, 2021年9—2023年6月中国农业大学资源与环境专业硕士研究生。参与课题国家重点研发计划项目(2023YFC3804000)。2023年7月至今就职于北京舜土规划顾问有限公司, 技术员。



通讯作者简介: 吕国玮, 博士, 中国农业大学土地科学与技术学院讲师, 硕士生导师。主要研究方向为国土空间规划和耕地土壤固碳技术等, 主持省部合作试点项目、国家留学基金及其他项目共5项。以第一作者或通讯作者在 *Transportation Research Part A: Policy and Practice*、*Tijdschrift voor Economische en Sociale Geografie*、*International Journal of Sustainable Transportation*、*Journal of Transport Geography*、《地理学报》、《自然资源情报》、《城市发展研究》、《中国土地科学》等期刊发表研究论文9篇, 获得“2022年易智瑞杯中国大学生GIS软件开发竞赛·优秀指导老师奖”。