



环境科学
Environmental Science
ISSN 0250-3301, CN 11-1895/X

《环境科学》网络首发论文

题目：中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素
作者：李成，王让会，李兆哲，徐扬
DOI：10.13227/j.hjlx.202010029
收稿日期：2020-10-09
网络首发日期：2020-11-25
引用格式：李成，王让会，李兆哲，徐扬. 中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素. 环境科学. <https://doi.org/10.13227/j.hjlx.202010029>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素

李成^{1,2}*, 王让会^{2*}, 李兆哲¹, 徐扬¹

(1. 扬州大学园艺与植物保护学院, 扬州 225009; 2. 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 南京 210044)

摘要: 农田土壤有机碳密度 (SOCD) 是衡量土壤肥力和土壤质量的重要指标。为理解我国农田 SOCD 空间分异特征及其影响因素, 基于中国生态系统研究网络 19 个典型农田生态站 2005—2015 年 SOCD 的监测数据, 利用地理探测器方法, 分析了农田 SOCD 空间分异的影响因素。结果表明, 我国不同站点农田 SOCD 平均值变化范围为 0.83~4.97 kg·m⁻², 并呈现出湿润季风区高于干旱半干旱地区的空间分异特征。在不同土地利用方式下, 水稻田 SOCD 明显高于其他类型的农田, 并且其表现出显著增加的趋势 ($P<0.05$), 增加速率为 0.13 kg·(m²·a)⁻¹。土壤理化性状和降水量是影响农田 SOCD 空间分布的重要因素, 特别是土壤碱解氮含量对农田 SOCD 空间分布影响最大, 且它分别与纬度、土壤类型、降水量及土壤 pH 等因素交互后影响力显著增强, 本研究结果对我国农田温室气体减排增汇提供重要的科学依据。

关键词: 农田; 土壤有机碳密度 (SOCD); 空间分异; 影响因素; 地理探测器

DOI: 10.13227/j.hjxx.202010029

Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and its Influencing Factors in Typical Croplands Across China

LI Cheng^{1,2}, WANG Rang-hui^{2*}, LI Zhao-zhe¹, XU Yang¹

(1. College of Horticulture and Plant Protection, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory of Agricultural Meteorology, Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China)

Abstract: Cropland soil organic carbon density (SOCD) is an important indicator to measure soil fertility and soil quality. In order to understand spatial differentiation characteristics of cropland SOCD and its influencing factors across China, a dataset on cropland SOCD of 19 typical stations during 2005-2015 was collected from the China Ecosystem Research Network. The geodetector method was used to analyze the influencing factors that affecting spatial patterns of cropland SOCD. The results indicated that the mean cropland SOCD ranged from 0.83 to 4.97 kg·m⁻² in different stations across China, which was higher in humid monsoon regions than that in arid and semi-arid regions. Under different land use patterns, the SOCD of paddy fields were higher than that of other croplands and showed the significantly increasing tendency from 2005 to 2015, reaching 0.13 kg·(m²·a)⁻¹. The soil physical and chemical properties and precipitation were important influencing factors that affecting spatial patterns of cropland SOCD, especially the soil alkaline nitrogen content had the greatest impact on cropland SOCD patterns. Furthermore, the interaction forces were obviously strengthened between the soil alkaline nitrogen content and latitude, soil type, precipitation and soil pH. The findings can provide important scientific basis for reducing cropland greenhouse gas emissions and increasing soil carbon sequestration across China.

Key words: cropland; soil organic carbon density (SOCD); spatial differentiation; influencing factors; geodetector

全球变暖背景下, 与大气中 CO₂ 浓度递增相关联的“碳问题”, 备受人们关注^[1-3]。农田作为陆地生态系统的重要组成部分, 受自然环境与人类活动因素的双重影响^[4]。在农田土壤碳库中, 土壤有机碳密度 (soil organic carbon density, SOCD) 表征单位面积一定深度的土层中土壤有机碳 (SOC) 的储量^[5,6], 它不仅是衡量土壤肥力和土壤质量的重要指标^[7], 而且其微小变化会引起农田不同组分之间碳通量的变

收稿日期: 2020-10-09; 修订日期: 2020-10-31

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41801013; 31801028); 江苏省自然科学基金项目 (BK20180939); 国家重点研发计划项目 (2019YFC0507403)

作者简介: 李成 (1988~), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向为地气交换与气候变化, E-mail: licheng_nj@163.com

*通信作者, Email: rhwang@nuist.edu.cn

化, 进而改变农田生物地球化学循环过程^[8-10]。因此, 理解农田 SOCD 的变化特征对全球变暖背景下农田温室气体减排以及地球系统模式优化等具有重要意义。

近年来, 许多学者通过多源数据 (如野外采集^[11,12]、文献整理^[13,14]和国家土壤普查数据^[15-17]等), 对我国不同区域或站点尺度的农田 SOC 含量以及 SOCD 的变化特征, 进行了深入分析^[18-20]。在国家尺度上, 虽然一些研究表明我国农田 SOC 含量呈增加趋势^[9,21,22], 但不同结果在增加速率及空间格局等方面存在较大的差异。农田 SOCD 是 SOC 含量、土壤容重和土层深度的综合反映, 许泉等^[23]基于第二次土壤普查数据, 发现我国农田 SOCD 表现出明显的区域差异, 并在一定程度上受水热因素的影响。由于我国气候类型、下垫面条件及农业生产复杂多样, 加之不同来源的监测数据往往受空间覆盖面小、采样时间不统一、分析方法不一致等问题的制约^[24], 难以系统认识农田 SOCD 长期且连续的变化规律。此外, 在农田 SOCD 影响因素的分析方面, 一些研究常采用相关分析的方法^[25], 衡量 SOCD 与影响因素之间的线性关系。如果相关系数不显著, 则表明二者之间没有明显的线性关系, 但这并不能说明它们之间没有非线性关系。因此, 如何定量解析不同因素 (如地理环境、气候因素、作物类型和土壤因素等) 对农田 SOCD 的影响也是现阶段研究亟待解决的重要问题之一。近年来, 地理探测器方法的提出, 为分析各种复杂现象背后的驱动力以及多影响因子之间的交互作用^[26], 提供了重要工具。目前, 该方法已广泛应用于地理学、生态学和环境科学等领域^[27-29], 但涉及农业数据的大尺度空间应用研究还相对较少。

为此, 本研究以中国生态系统研究网络 (CERN) 典型农田生态站为例, 基于长期 (2005—2015 年) 的 SOCD 数据, 分析农田 SOCD 的空间分异特征; 并利用地理探测器方法, 揭示农田 SOCD 空间分异的影响因素, 以为农田温室气体减排以及地球系统模式优化等提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 数据获取与处理

本研究所用的 2005—2015 年农田表层 (0~20 cm) 逐年 SOCD 数据来源于 CERN 的 19 个典型农田生态站。如表 1 所示, 这些站点基本涵盖了我国不同气候区、不同土壤类型的农田生态系统, 主要位于松嫩平原、下辽河平原、太行山前平原、黄淮海平原、太湖平原、南方丘岗区、洞庭湖平原、川中丘陵区、黄土高原和荒漠-绿洲区等^[24]。各站点结合不同作物类型, 在每季作物监测 1 次的频度 (收获期调查) 上, 利用 SOCD 计算公式 [式 (1)], 得到各站点的 SOCD。

$$SOCD = 0.58 \times OM \times \gamma \times H \times 10^{-2} \quad (1)$$

式中, SOCD 为土壤有机碳密度 ($\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$), OM 为土壤有机质含量 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$), γ 为土壤容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$), H 为土层厚度 (cm)。

表 1 典型农田站点的基本信息
Table 1 Basic information of typical cropland stations

编号	站点	主要作物	所在省份	编号	站点	主要作物	所在省份
1	阿克苏站	棉花	新疆	11	桃源站	水稻	湖南
2	安塞站	玉米和大豆	陕西	12	禹城站	小麦和玉米	山东
3	常熟站	水稻和小麦	江苏	13	盐亭站	小麦和玉米	四川
4	长武站	小麦和玉米	陕西	14	鹰潭站	水稻和花生	江西
5	封丘站	小麦和玉米	河南	15	策勒站	棉花	新疆
6	海伦站	玉米和大豆	黑龙江	16	阜康站	棉花和小麦	新疆
7	栾城站	小麦和玉米	河北	17	临泽站	小麦和玉米	甘肃
8	拉萨站	小麦	西藏	18	奈曼站	玉米	内蒙古
9	千烟洲站	水稻	江西	19	沙坡头站	小麦和玉米	宁夏
10	沈阳站	玉米和大豆	辽宁				

为了探测不同因素对农田 SOCD 空间格局的影响作用, 本研究选取的影响因素包括地理环境、气候因素、作物类型和土壤理化性状等, 具体如下: 经度 (Lon)、纬度 (Lat) 和高程 (DEM); 气温 (Tem) 和降水量 (Pre); 作物类型 (Ctyp); 土壤类型 (Styp); 土壤砂粒 (Sand)、粉粒 (Silt) 和黏粒 (Clay)

含量；土壤 pH (SpH)；土壤碱解氮 (AN)、速效磷 (AP) 和速效钾 (AK) 含量。其中，DEM 信息一般不随时间发生变化，通过地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn>) 的数字高程模型，提取 19 个典型农田生态站点的 DEM 信息；各站点作物生长季期间的平均气温和总降水量来源于国家气候中心的逐日气象栅格化资料，从中提取 19 个典型农田生态站点的气温和降水量信息；各站点的经纬度、作物类型和土壤数据来源于 CERN，作物类型为每年记录 1 次，土壤数据一般每 5a 监测 1 次，取平均值用于本研究分析。对于连续型变量数据，本研究借助 ArcGIS 软件的重分类功能进行离散化处理，处理采用分位数分类原则，共分为 9 类。

1.2 地理探测器

如前所述，地理探测器是一种探测空间分异性，并揭示其背后驱动力的统计学方法。与传统的统计学方法相比，地理探测器具有明确的物理含义，没有线性假设，能客观地识别出自变量对因变量的解释程度，它包括因子探测、交互作用探测、生态探测等功能。具体如下。

(1) 因子探测 探测某因子对农田 SOCD 空间分异的解释力，用 q 值度量^[27]，它的计算见式 (2)。

$$q = 1 - (1/N\sigma^2) \times \sum N_h \sigma_h^2 \quad (2)$$

式中， q 为某指标的空间异质性； N 为研究区全部样本数； σ^2 为指标的方差； $h = 1, 2, \dots, L$ ， h 为标识分区， L 为分区数目。 q 值的值域介于 0~1， q 值越大，表明该因子的解释力越强，反之亦然。

(2) 交互作用探测 用于判断两因子共同作用时是否会增加或减弱对农田 SOCD 的解释力^[27]。根据单因子作用时的 q 值与双因子交互作用时的 q 值，将交互作用类型分为 5 类 (表 2)。

表 2 交互作用结果类型

Table 2 Types of interaction between two covariates

交互作用类型	q 值比较
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$
独立	$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$
非线性增强	$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$

(3) 生态探测 用于比较两因子对农田 SOCD 的空间分布影响是否有显著差异，以 F 统计量衡量^[27]。本研究利用 RStudio 软件和地理探测器的 R 语言包 (<https://cran.r-project.org/web/packages/geodetector/index.html>)，从地理环境、气候因素、作物类型、土壤因素等方面，揭示农田 SOCD 空间分异的影响因素。

2 结果与分析

2.1 中国典型农田 SOCD 的统计特征

我国不同站点 SOCD 表现出明显的空间差异性 (表 3)，SOCD 的平均值变化范围为 0.83~4.97 kg·m⁻²。如表 3 所示，约有 31.58% 的站点 SOCD 在 3.0 kg·m⁻² 以上。其中，海伦站 SOCD 最高，介于 4.89~5.21 kg·m⁻² 之间，平均值为 4.97 kg·m⁻²；其次为常熟站和桃源站，分别为 4.82 kg·m⁻² 和 3.70 kg·m⁻²。约有 52.63% 的站点 SOCD 在 2.0 kg·m⁻² 以下，特别是策勒站 SOCD 最低，平均值仅为 0.83 kg·m⁻²。整体而言，湿润季风区的 SOCD [(2.96±1.16) kg·m⁻²] 明显高于干旱半干旱地区 [(1.58±0.39) kg·m⁻²]，特别是东北和华东地区的 SOCD 相对较高，但同一区域内不同站点的 SOCD 仍表现出较大的差异性。

表 3 不同区域典型农田 SOCD 的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of typical cropland SOCD in different regions

地理分区	站点	最大值/ kg·m ⁻²	最小值/ kg·m ⁻²	平均值/ kg·m ⁻²	标准差	地理分区	站点	最大值/ kg·m ⁻²	最小值/ kg·m ⁻²	平均值/ kg·m ⁻²	标准差
东北	海伦站	5.21	4.89	4.97	0.03	西北	阿克苏站	1.70	1.45	1.62	0.04
	沈阳站	3.07	2.50	2.74	0.09		安塞站	1.91	1.61	1.77	0.03
中南	封丘站	2.42	1.48	1.92	0.06		长武站	2.16	1.94	2.03	0.02
	桃源站	5.51	2.99	3.70	0.22		策勒站	1.03	0.49	0.83	0.06
华东	常熟站	5.57	3.45	4.82	0.14		阜康站	2.14	1.34	1.78	0.08
	千烟洲站	3.57	2.41	3.08	0.06		临泽站	1.36	1.10	1.26	0.03
	禹城站	3.10	1.99	2.53	0.07		沙坡头站	1.94	1.41	1.76	0.07
	鹰潭站	3.22	1.08	1.70	0.11		拉萨站	3.81	3.01	3.26	0.25
华北	栾城站	3.99	2.40	3.32	0.09	西南	盐亭站	2.11	1.20	1.70	0.07
	奈曼站	1.88	1.35	1.64	0.05						

表 4 显示了不同土地利用方式下典型农田 SOCD 的统计特征。从中可知, 水稻田 SOCD 最高, 其 SOCD 介于 1.78~5.57 kg·m⁻² 之间, 平均值为 3.31 kg·m⁻²; 其次为大豆田, SOCD 介于 1.77~5.0 kg·m⁻² 之间, 平均值为 3.14 kg·m⁻²; 此外, 小麦田和玉米田 SOCD 也相对较高, 二者的平均值分别为 2.44 kg·m⁻² 和 2.66 kg·m⁻²。相较于 4 种粮食作物而言, 种植经济作物的棉花田和花生田 SOCD 较低, 二者的 SOCD 的平均值分别为 1.39 kg·m⁻² 和 1.30 kg·m⁻²。

表 4 不同土地利用方式下典型农田 SOCD 的统计特征

Table 4 Statistical characteristics of typical cropland SOCD in different land use patterns

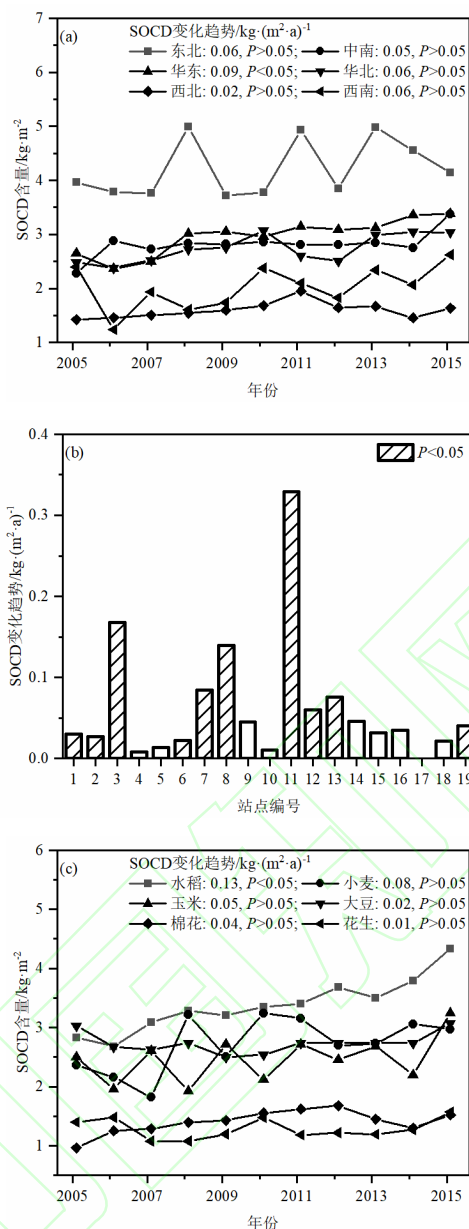
土地利用	最大值/kg·m ⁻²	最小值/kg·m ⁻²	平均值/kg·m ⁻²	标准差
水稻	5.57	1.78	3.31	0.14
小麦	5.41	1.20	2.66	0.14
玉米	5.21	1.10	2.44	0.12
大豆	5.00	1.77	3.14	0.47
棉花	2.14	0.49	1.39	0.09
花生	1.60	1.08	1.30	0.05

2.2 中国典型农田 SOCD 的变化趋势

2005—2015 年我国不同区域 SOCD 变化曲线, 如图 1 (a) 所示。整体而言, 不同区域 SOCD 呈波动增加的趋势, 湿润季风区 SOCD 的增加速率明显高于干旱半干旱地区, 特别是华东地区 SOCD 呈显著增加趋势 ($P<0.05$), 增加速率为 $0.09 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。

进一步分析表明, 2005—2015 年我国各站点 SOCD 也均表现出不同程度的增加趋势[图 1(b)], SOCD 的增加速率介于 $0 \sim 0.33 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 之间。如图 1 (b) 所示, 约有 52.63% 的站点 SOCD 呈显著增加趋势 ($P<0.05$)。其中, 桃源站、常熟站和拉萨站 SOCD 增加速率相对较高, 分别为 0.33 、 0.17 和 $0.14 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。约有 31.58% 的站点 SOCD 变化趋势较小, 不足 $0.02 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$, 主要分布在干旱半干旱地区, 特别是长武站和临泽站 SOCD 增加速率在 $0.01 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 以下。

图 1 (c) 显示了不同土地利用方式下典型农田 SOCD 的变化趋势。从中可知, 不同作物类型的农田 SOCD 均呈波动增加的趋势。水稻田 SOCD 呈显著增加的趋势 ($P<0.05$) 且增加速率最高, 为 $0.13 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。其次, 小麦田和玉米田 SOCD 增加速率也相对较高, 分别为 $0.08 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.05 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。在种植经济作物的农田中, 棉花田 SOCD 的增加速率要明显高于花生田, 二者的变化速率分别为 $0.04 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.01 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 。



站点编号所对应的各 CERN 农田站点参见表 1

图1 2005—2015年典型农田SOCD的变化特征

Fig.1 Changing characteristics of cropland SOCD from 2005 to 2015

2.3 中国典型农田 SOCD 空间分异的影响因素分析

基于地理探测器方法, 分析不同因素 (Lon、Lat 和 DEM; Tem 和 Pre; Ctyp; Styp; Sand、Silt 和 Clay; SpH; AN、AP 和 AK) 对典型农田 SOCD 空间分异的影响程度。由图 2 可知, 在因子探测中, 不同因素对 SOCD 空间分布的影响存在一定的差异性。其中, AN 和 SpH 对农田 SOCD 空间分布的影响较大, q 值均超过了 0.75, 分别为 0.78 和 0.76; 其次为 Styp、Pre 和 Clay, 它们的 q 值分别为 0.68、0.64 和 0.60, 并且这 5 种因素也都通过了显著性检验 ($P<0.05$)。其他因素由于 q 统计量未通过显著性检验, 而不存在显著的解能力, 这表明土壤理化性状和降水量是影响农田 SOCD 空间分布的重要因素。

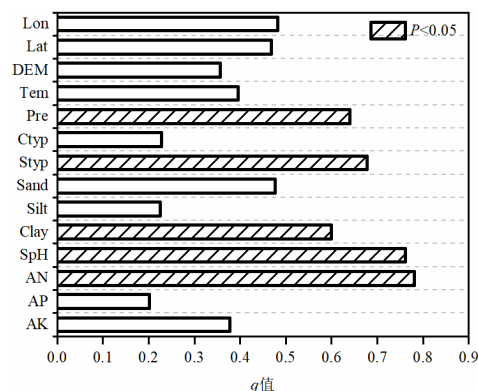


图2 不同因素对典型农田SOCD的解释力分析

Fig.2 Explanation strength of different factors on typical cropland SOCD

在实际环境条件下，农田 SOCD 的空间格局往往是由多种因素共同作用的结果。如表 5 所示，在交互作用探测中，任意两个因素交互后对农田 SOCD 的空间分布影响均表现为协同效应，即交互后对农田 SOCD 空间分布的解释能力明显高于各单因素的作用，表现出双因子增强或非线性增强的特征。从影响农田 SOCD 交互作用的强度看，AN 与 Lat 的交互作用影响最强（0.99），AN 与 Styp 的交互作用影响次之，为 0.98。此外，AN 与 Pre、AN 与 SpH 和 SpH 与 Lat 的交互作用影响也均达到了 0.97。

表 5 不同因素对典型农田 SOCD 的交互作用

Table 5 Interaction of different factors on typical cropland SOCD

	Lon	Lat	DEM	Tem	Pre	Ctyp	Styp	Sand	Silt	Clay	SpH	AN	AP	AK
Lon	0.48													
Lat	0.95	0.47												
DEM	0.59	0.84	0.36											
Tem	0.60	0.54	0.61	0.40										
Pre	0.91	0.95	0.74	0.92	0.64									
Ctyp	0.66	0.71	0.50	0.59	0.68	0.23								
Styp	0.88	0.89	0.72	0.85	0.91	0.90	0.68							
Sand	0.84	0.89	0.73	0.84	0.93	0.74	0.87	0.60						
Silt	0.84	0.80	0.57	0.72	0.68	0.47	0.79	0.75	0.23					
Clay	0.72	0.90	0.64	0.69	0.91	0.81	0.89	0.82	0.82	0.48				
SpH	0.86	0.97	0.87	0.91	0.95	0.93	0.84	0.96	0.85	0.98	0.78			
AN	0.89	0.99	0.70	0.72	0.97	0.63	0.98	0.91	0.91	0.87	0.97	0.78		
AP	0.93	0.93	0.91	0.91	0.93	0.86	0.96	0.90	0.88	0.82	0.92	0.88	0.20	
AK	0.90	0.86	0.84	0.85	0.95	0.72	0.96	0.96	0.89	0.95	0.94	0.93	0.96	0.38

为理解不同因素对农田 SOCD 空间分布的影响是否存在显著差异，在生态探测中，如果任意两个因素的影响具有显著差异（ $P < 0.05$ ），则标记为 Y，否则就记为 N。如表 6 所示，除 AN 外，其他因素两两之间的相互作用对农田 SOCD 的空间分布影响并未表现出一致的显著性差异，而 AN 与任意一个因素结合对农田 SOCD 空间分布的影响具有显著差异，这表明 AN 在各因素中表现的最为突出。

表 6 典型农田 SOCD 的生态探测结果

Table 6 Results of ecological detection of typical cropland SOCD

	Lon	Lat	DEM	Tem	Pre	Ctyp	Styp	Sand	Silt	Clay	SpH	AN	AP	AK
Lon														
Lat	N													
DEM	N	N												
Tem	N	N	N											

Pre	N	N	Y	Y									
Ctyp	N	N	N	N	Y								
Styp	Y	Y	Y	Y	N	Y							
Sand	N	N	Y	N	N	Y	N						
Silt	N	N	N	N	Y	N	Y	Y					
Clay	N	N	N	N	N	N	Y	N	N				
SpH	Y	Y	Y	Y	Y	Y	N	Y	Y	Y			
AN	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y	Y		
AP	N	N	N	N	Y	N	Y	Y	N	N	Y	Y	
AK	N	N	N	N	Y	N	Y	N	N	N	Y	Y	N

3 讨论

3.1 典型农田 SOCD 的空间分异特征及变化趋势

基于 2005—2015 年 19 个 CERN 典型农田生态站 SOCD 数据发现,不同站点 SOCD 表现出明显的空间差异性,整体表现为湿润季风区的 SOCD 高于干旱半干旱地区,主要是因为干旱半干旱地区植被净初级生产力较低,使新增的 SOC 输入量较少,而土壤中较多的砂粒含量又使 SOC 矿化速率较高,进而导致 SOCD 较低^[6,9,30]。与其他学者的研究结果对比发现,本研究得出的典型农田 SOCD 空间分布特征与李金全等^[9]通过文献整理方法,得到的我国 SOC 空间分布格局基本相似;但与许泉等^[23]通过第二次国家土壤普查资料,得到的我国 SOCD 空间分布特征存在一定的差异,主要表现在东北地区 SOCD 偏低和西北地区 SOCD 偏高,这主要与国家土壤普查资料在上述地区的取样点分布不均有关,如西北地区的取样点并未涉及风沙土、灰漠土等主要土壤类型,从而使该地区 SOCD 偏高。

与前期通过文献整理方法或国家土壤普查资料的结果相比,本研究基于逐年 SOCD 数据发现,不同区域 SOCD 的变化曲线呈波动增加的趋势,这在之前的研究中较少被报道^[31]。进一步分析发现,湿润季风区 SOCD 的增加速率明显高于干旱半干旱地区,特别是华东地区 SOCD 呈显著增加趋势 ($P<0.05$)。此外,各站点 SOCD 也均表现出不同程度的增加趋势,增加速率介于 $0\sim0.33\text{ kg}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{a})^{-1}$ 之间。

水田和旱地是现阶段我国农田常见的土地利用方式。其中,水稻田 SOCD 明显高于其他类型的农田,这与通过文献整理方法^[9,31]或国家土壤普查资料^[23]的分析结果相似,反映了水田具有较强的 SOC 储存能力。这主要是因为水田一般长时间处于淹水状态,相较于旱地,其 SOC 矿化速率较慢,有利于 SOC 的积累,进而使 SOCD 较高^[32]。并且,水稻田 SOCD 呈显著增加的趋势 ($P<0.05$),增加速率明显高于其他类型的农田。

3.2 典型农田 SOCD 空间分异的影响因素

前期研究证实,我国 SOCD 的空间分布特征大体与 Styp 的地带性分布相一致^[33]。由地理探测器方法可知,包括 Styp 在内的一些土壤理化性状,如 AN、SpH、Clay 以及降水量是影响农田 SOCD 空间分布格局的重要因素,特别是 AN 在各因素中表现的最为突出,反映了土壤中 C 元素与 N 元素之间存在较强的耦合关系。土壤中 N 素的富集可以通过影响微生物活动和 SOC 矿化速率等途径,从而有利于 SOC 积累^[30],即土壤 N 素积累与 SOC 的关系密切。此外 C:N 比作为土壤质量的重要参数,较高的 C:N 比也有利于 SOC 贮存^[34,35],从而提高 SOCD。SpH 一般与 SOC 含量表现为负相关关系,酸性土壤会降低微生物和酶的活性,影响 SOC 的溶解性;反之在中性或弱碱性土壤中,土壤微生物活性增强,使得 SOC 分解加快^[36],从而降低 SOCD。Moharana 等^[37]基于大田试验结果也发现,通过合理施用 N 肥,并调节 SpH,可以提高 SOC 的积累^[37]。除 AN 与 SpH 外,由于 Styp 本身包含气温、降水与成土母质等因素,因而在前期研究中被认为是影响 SOCD 空间分布的重要因素之一^[33]。Clay 含量直接影响土壤的通气性,并会与 SOC 形成有机-无机复合体。当 Clay 含量较高时,它对 SOC 的物理性保护作用就越强^[38]。在实际环境条件下,AN 分别与 Lat、Styp、Pre 及 SpH 等因素交互后影响力显著增强,反映了农田 SOCD 空间分布在一定程度上是 AN 与其他因素综合作用的结果。

近年来 Meta 分析研究也表明,农田表层 SOCD 可能还受到耕作方式、秸秆还田等因素的影响^[31],

但受限于相关数据获取以及指标定量化等因素的制约，本研究目前未能充分考虑这些因素在农田 SOCD 空间分布中的具体影响。后续我们将整合涵盖不同地理区域的多源农田 SOCD 数据，利用机器学习与地学信息图谱方法^[39,40]，定量分析自然与人为因素对农田 SOCD 的影响效应，并形成长期且连续的农田 SOCD 时空变化图谱，为我国农田温室气体减排能提前实现“2030 年联合国可持续发展目标”，提供重要的科学依据。

4 结论

（1）我国不同站点农田 SOCD 表现出明显的空间差异性，整体表现为湿润季风区的 SOCD 高于干旱半干旱地区；在不同土地利用方式下，水稻田 SOCD 明显高于其他类型的农田。

（2）2005—2015 年各站点 SOCD 均表现出不同程度的增加趋势，但干旱半干旱地区 SOCD 增加速率相对较小。水稻田 SOCD 呈显著增加的趋势（ $P<0.05$ ），其增加速率高于其他类型的农田。

（3）土壤理化性状和降水量是影响农田 SOCD 空间分布的重要因素，特别是 AN 在各因素中表现的最为突出，且 AN 与其他因素交互后的解释力显著增强。

致谢：感谢中国生态系统研究网络提供的 19 个典型农田生态站土壤有机碳密度的监测数据。

参考文献:

- [1] Baldocchi D D. How eddy covariance flux measurements have contributed to our understanding of global change biology[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(1): 242-260.
- [2] Carlson K M, Gerber J S, Mueller N D, *et al.* Greenhouse gas emissions intensity of global croplands. *Nature Climate Change* 2017, **7**: 63-68.
- [3] 于贵瑞, 何洪林, 周玉科. 大数据背景下的生态系统观测与研究[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(8): 832-837.
Yu G R, He H L, Zhou Y K. Ecosystem observation and research under background of big data[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(8): 832-837.
- [4] Fang J Y, Yu G R, Liu L L, *et al.* Climate change, human impacts, and carbon sequestration in China[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2018, **115**(16): 4015-4020.
- [5] Ren W, Banger K, Tao B, *et al.* Global pattern and change of cropland soil organic carbon during 1901-2010: Roles of climate, atmospheric chemistry, land use and management[J]. *Geography and Sustainability*, 2020, **1**(1): 59-69.
- [6] 孙忠祥, 李勇, 赵云泽, 等. 旱作区土壤有机碳密度空间分布特征与其驱动力分析[J]. *农业机械学报*, 2019, **50**(1): 255-262.
Sun Z X, Li Y, Zhao Y Z, *et al.* Analysis on spatial distribution characteristics and driving forces of soil organic carbon density in dry farming region[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, **50**(1): 255-262.
- [7] 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 等. 江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点:以潜江市为例[J]. *环境科学*, 2015, **36**(9): 3422-3428.
Wang Y Z, Xiao H A, Zhou P, *et al.* Distribution and dynamics of cropland soil organic carbon in Jiangnan Plain:a case study of Qianjiang City[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(9): 3422-3428.
- [8] Xu L, He N P, Yu G R. Nitrogen storage in China's terrestrial ecosystems[J]. *Science the Total Environment*, 2020, **709**: 136201, doi:10.1016/j.scitotenv.2019.136201.
- [9] 李金全, 李兆磊, 江国福, 等. 中国农田耕层土壤有机碳现状及控制因素[J]. *复旦学报(自然科学版)*, 2016, **55**(2): 247-266.
Li J Q, Li Z L, Jiang G F, *et al.* A study on soil organic carbon in plough layer of China's arable land[J]. *Journal of Fudan University (NaturalScience)*, 2016, **55**(2): 247-266.
- [10] 高扬, 于贵瑞. 流域生物地球化学循环与水文耦合过程及其调控机制[J]. *地理学报*, 2018, **73**(7): 1381-1393.
Gao Y, Yu G R. Biogeochemical cycle and its hydrological coupling processes and associative controlling mechanism in a watershed[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2018, **73**(7): 1381-1393.
- [11] Tu C L, He T B, Lu X H, *et al.* Extent to which pH and topographic factors control soil organic carbon level in dry farming cropland soils of the mountainous region of Southwest China[J]. *Catena*, 2018, **163**: 204-209.
- [12] 胡贵贵, 杨联安, 封涌涛, 等. 基于地理探测器的宝鸡市农田土壤养分影响因子分析[J]. *土壤通报*, 2020, **51**(1): 71-78.
Hu G G, Yang L A, Feng Y T, *et al.* Influencing factors of soil nutrients in farmland of Baoji based on geographical detector[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2020, **51**(1): 71-78.
- [13] Han P F, Zhang W, Wang G C, *et al.* Changes in soil organic carbon in croplands subjected to fertilizer management: a global meta-analysis[J]. *Scientific Reports*, 2016, **6**: 27199, doi:10.1038/srep27199.
- [14] Jian J S, Du X, Reiter M S, *et al.* A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2020, **143**, doi:10.1016/j.soilbio.2020.107735.
- [15] 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*, 2018, **115**(16): 4045-4050.
- [16] Zhou Y, Hartemink A E, Shi Z, *et al.* 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.
- [17] Xu L, Yu G R, He N P. Increased soil organic carbon storage in Chinese terrestrial ecosystems from the 1980s to the 2010s. *Journal of Geographical Sciences*, 2019, **29**, 49-66.
- [18] Man W D, Yu H, Li L, *et al.* Spatial expansion and soil organic carbon storage changes of croplands in the Sanjiang Plain,

China[J]. Sustainability, 2017, **9**(4), doi: 10.3390/su9040563.

- [19] Li M, Han X Z, Du S L, *et al.* Profile stock of soil organic carbon and distribution in croplands of Northeast China[J]. Catena, 2019, **174**: 285-292.
- [20] Chen D Y, Xue M Y, Duan X W, *et al.* Changes in topsoil organic carbon from 1986 to 2010 in a mountainous plateau region in Southwest China[J]. Land Degradation and Development 2020, **31**(6): 734-747.
- [21] 程琨, 潘根兴, 田有国, 等. 中国农田表土有机碳含量变化特征-基于国家耕地土壤监测数据[J]. 农业环境科学学报, 2009, **28**(12): 2476-2481.
- Cheng K, Pan G X, Tian Y G, *et al.* Changes of topsoil organic carbon of cropland evidenced from the national soil monitoring network[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009, **28**(12): 2476-2481.
- [22] Yan, X Y, Cai Z C, Wang S W, *et al.* Direct measurement of soil organic carbon content change in the croplands of China[J]. Global Change Biology, 2011, **17**(3): 1487-1496.
- [23] 许泉, 芮雯奕, 何航, 等. 不同利用方式下中国农田土壤有机碳密度特征及区域差异[J]. 中国农业科学, 2006, **39**(12): 2505-2510.
- Xu Q, Rui W Y, He H Characteristics and regional differences of soil organic carbon density in farmland under different land use patterns in China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2006, **39**(12): 2505-2510.
- [24] 苏文, 陈春兰, 党廷辉, 等. 2005-2015 年中国生态系统研究网络农田生态系统生态站表层土壤有机碳密度数据集[J]. 中国科学数据, 2020, **5**(1): 56-68.
- Su W, Chen C L, Dang T H, *et al.* A dataset of topsoil organic carbon density for agricultural ecosystem field stations of Chinese Ecosystem Research Network (2005-2015)[J]. China Scientific Data, 2020, **5**(1): 56-68.
- [25] 赵明松, 李德成, 王世航. 近 30 年安徽省耕地土壤有机碳变化及影响因素[J]. 土壤学报, 2018, **55**(3): 595-605.
- Zhao M S, Li D C, Wang S H. Variation of soil organic carbon in farmland of Anhui and its influencing factors in the 30 years from 1980 to 2010. Acta Pedologica Sinica, 2018, **55**(3): 595-605.
- [26] Wang J F, Zhang T L, Fu B J. A measure of spatial stratified heterogeneity[J]. Ecological Indicators, 2016, **67**: 250-256.
- [27] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. 地理学报, 2017, **72**(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. Acta Geographica Sinica, 2017, **72**(1): 116-134.
- [28] 姬超, 侯大伟, 李发志, 等. 耕地土壤重金属健康风险空间分布特征[J]. 环境科学, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- Ji C, Hou D W, Li F Z, *et al.* Assessment and spatial characteristics analysis of human health risk of heavy metals in cultivated soil[J]. Environmental Science, 2020, **41**(3): 1440-1448.
- [29] Su Y, Li T X, Cheng S K, *et al.* Spatial distribution exploration and driving factor identification for soil salinisation based on geodetector models in coastal area[J]. Ecological Engineering, 2020, **156**, doi:10.1016/j.ecoleng.2020.105961.
- [30] Wang X J, Wang J P, Xu M G, *et al.* Carbon accumulation in arid croplands of northwest China: pedogenic carbonate exceeding organic carbon[J]. Scientific Reports, 2015, **5**, doi:10.1038/srep11439.
- [31] Tao F L, Palosuo T, Valkama E, *et al.* Cropland soils in China have a large potential for carbon sequestration based on literature survey[J]. Soil and Tillage Research, 2019, **186**: 70-78.
- [32] Tang H Y, Liu Y, Li, X M, *et al.* Carbon sequestration of cropland and paddy soils in China: potential, driving factors, and mechanisms[J]. Greenhouse Gases: Science and Technology, 2019, **9**(5): 872-885.
- [33] 罗梅, 郭龙, 张海涛, 等. 基于环境变量的中国土壤有机碳空间分布特征[J]. 土壤学报, 2020, **57**(1): 48-59.
- Luo M, Guo L, Zhang H T, *et al.* Characterization of spatial distribution of soil organic carbon in China based on environmental variables[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, **57**(1): 48-59.
- [34] Deng X F, Ma W Z, Ren Z Q, *et al.* Spatial and temporal trends of soil total nitrogen and C/N ratio for croplands of East China[J]. Geoderma, 2020, **361**, doi:10.1016/j.geoderma.2019.114035.
- [35] 张春华, 王宗明, 居为民, 等. 松嫩平原玉米带土壤碳氮比的时空变异特征[J]. 环境科学, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- Zhang C H, Wang Z M, Ju W M, *et al.* Spatial and temporal variability of soil C/N ratio in Songnen plain maize belt[J]. Environmental Science, 2011, **32**(5): 1407-1414.
- [36] Zhang X M, Guo J H, Vogt R D, *et al.* Soil acidification as an additional driver to organic carbon accumulation in major

Chinese croplands[J]. *Geoderma*, 2020, **366**, doi:10.1016/j.geoderma.2020.114234.

- [37] Moharana P C, Sharma B M, Biswas D R, *et al.* Long-term effect of nutrient management on soil fertility and soil organic carbon pools under a 6-year-old pearl millet–wheat cropping system in an Inceptisol of subtropical India. *Field Crops Research*, 2012, **136**: 32-41.
- [38] 王群艳, 吴小红, 祝贞科, 等. 土壤质地对自养固碳微生物及其同化碳的影响[J]. *环境科学*, 2016, **37**(10): 3987-3995.
Wang Q Y, Wu X H, Zhu Z K, *et al.* Effects of soil texture on autotrophic CO₂ fixation bacterial communities and their CO₂ assimilation contents[J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(10): 3987-3995.
- [39] 张洪岩, 周成虎, 阎国年, 等. 试论地学信息图谱思想的内涵与传承[J]. *地球信息科学学报*, 2020, **22**(4): 653-661.
Zhang H Y, Zhou C H, Lv G N, *et al.* The connotation and inheritance of geo-information Tupu[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, **22**(4): 653-661.
- [40] 张军, 董洁, 梁青芳, 等. 宝鸡市区土壤重金属污染影响因子探测及其源解析[J]. *环境科学*, 2019, **40**(8): 3774-3784.
Zhang J, Dong J, Liang Q F, *et al.* Heavy metal pollution characteristics and influencing factors in Baoji urban soils[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(8): 3774-3784.