

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目 次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 丁建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水水质空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱发表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
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, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

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

中图分类号: X144; X821 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2432-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202010029

Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of 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 for measuring soil fertility and soil quality. To understand the spatial differentiation characteristics of cropland SOCD and its influencing factors across China, a dataset on the 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 affecting the spatial patterns of cropland SOCD. The results indicated that the mean cropland SOCD ranged from 0.83 kg·m⁻² to 4.97 kg·m⁻² in different stations across China, and was higher in humid monsoon regions than in arid and semi-arid regions. Under different land use patterns, the SOCD of paddy fields was higher than that of other croplands and showed a tendency of significant increase from 2005 to 2015, reaching 0.13 kg·(m²·a)⁻¹. The soil physical and chemical properties and precipitation were important influencing factors that affected the spatial patterns of cropland SOCD. In particular, the soil alkaline nitrogen content had the greatest impact on the cropland SOCD patterns. Furthermore, the interaction forces between the soil alkaline nitrogen content and latitude, soil type, precipitation, and soil pH were clearly strengthened. The findings can provide an 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

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, E-mail: rhwang@nuist.edu.cn

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,以期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(kg·m⁻²),OM为土壤有机质含量(g·kg⁻¹),γ为土壤容重(g·cm⁻³),H为土层厚度(cm).

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

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

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的分析.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;σ²为指标的方差;h=1,2,⋯,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 SOC_D 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 interactions between the two covariates	
互作用类型	q 值比较
非线性减弱	$q(X_1 \cap X_2) < \text{Min}[q(X_1), q(X_2)]$
单因子非线性减弱	$\text{Min}[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1 \cap X_2) < \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
双因子增强	$q(X_1 \cap X_2) > \text{Max}[q(X_1), q(X_2)]$
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 SOC_D 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 SOC_D 空间分异的影响因素.

2 结果与分析

2.1 中国典型农田 SOC_D 的统计特征

我国不同站点 SOC_D 表现出明显的空间差异性(表 3), SOC_D 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 SOC_D 在 3.0 kg·m⁻² 以上. 其中, 海伦站 SOC_D 最高, 介于 4.89 ~ 5.21 kg·m⁻² 之间, 平均值为 4.97 kg·m⁻²;

表 3 不同区域典型农田 SOC_D 的统计特征

Table 3 Statistical characteristics of the typical cropland					
SOC _D 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
东北	海伦站	5.21	4.89	4.97	0.03
	沈阳站	3.07	2.50	2.74	0.09
中南	封丘站	2.42	1.48	1.92	0.06
	桃源站	5.51	2.99	3.70	0.22
华东	常熟站	5.57	3.45	4.82	0.14
	千烟洲站	3.57	2.41	3.08	0.06
	禹城站	3.10	1.99	2.53	0.07
	鹰潭站	3.22	1.08	1.70	0.11
华北	栾城站	3.99	2.40	3.32	0.09
	奈曼站	1.88	1.35	1.64	0.05
西北	阿克苏站	1.70	1.45	1.62	0.04
	安塞站	1.91	1.61	1.77	0.03
	长武站	2.16	1.94	2.03	0.02
	策勒站	1.03	0.49	0.83	0.06
	阜康站	2.14	1.34	1.78	0.08
	临泽站	1.36	1.10	1.26	0.03
	沙坡头站	1.94	1.41	1.76	0.07
	拉萨站	3.81	3.01	3.26	0.25
西南	盐亭站	2.11	1.20	1.70	0.07

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 SOC_D 在 2.0 kg·m⁻² 以下, 特别是策勒站 SOC_D 最低, 平均值仅为 0.83 kg·m⁻². 整体而言, 湿润季风区的 SOC_D [(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 SOC_D 相对较高, 但同一区域内不同站点的 SOC_D 仍表现出较大的差异性.

表 4 显示了不同土地利用方式下典型农田 SOC_D 的统计特征. 从中可知, 水稻田 SOC_D 最高, 其 SOC_D 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, SOC_D 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 SOC_D 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 SOC_D 较低, 二者的 SOC_D 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 SOC_D 的统计特征

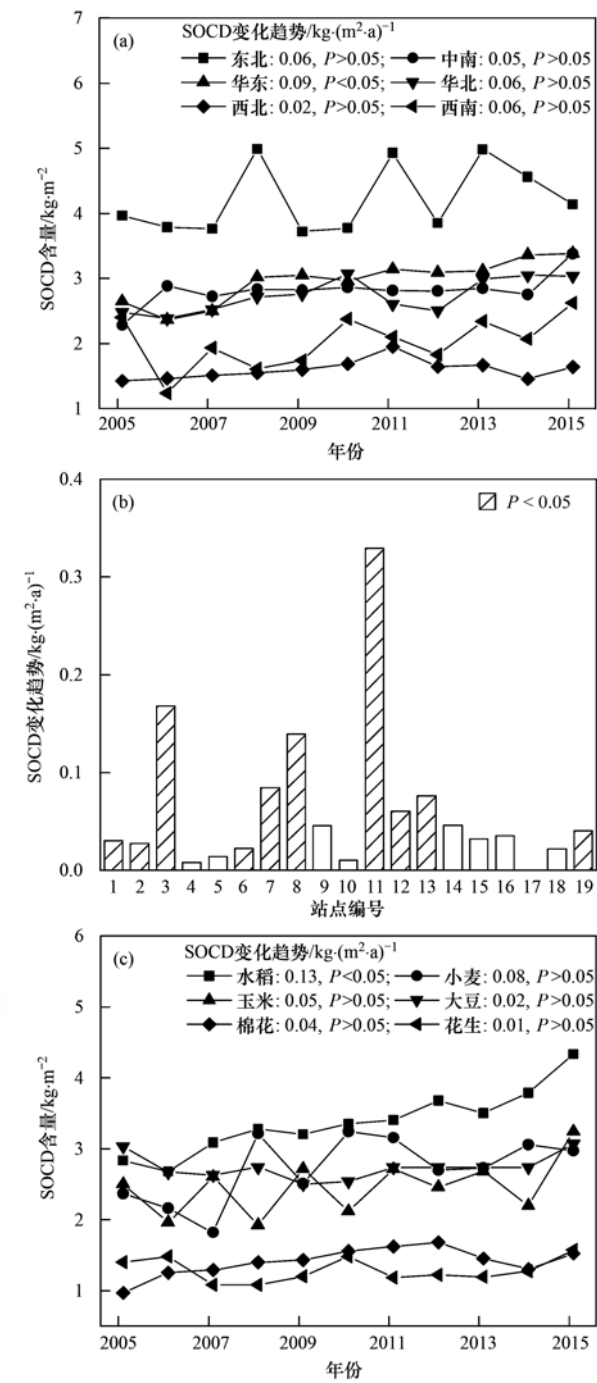
Table 4 Statistical characteristics of the typical cropland SOC _D in different land use patterns				
土地利用	最大值 /kg·m ⁻²	最小值 /kg·m ⁻²	平均值 /kg·m ⁻²	标准差
水稻	5.57	1.78	3.31	0.14
小麦	5.41	1.20	2.66	0.14
玉米	5.21	1.10	2.44	0.12
大豆	5.00	1.77	3.14	0.47
棉花	2.14	0.49	1.39	0.09
花生	1.60	1.08	1.30	0.05

2.2 中国典型农田 SOC_D 的变化趋势

2005 ~ 2015 年我国不同区域 SOC_D 变化曲线, 如图 1(a) 所示. 整体而言, 不同区域 SOC_D 呈波动增加的趋势, 湿润季风区 SOC_D 的增加速率明显高于干旱半干旱地区, 特别是华东地区 SOC_D 呈显著增加趋势 ($P < 0.05$), 增加速率为 0.09 kg·(m²·a)⁻¹.

进一步分析表明, 2005 ~ 2015 年我国各站点 SOC_D 也均表现出不同程度的增加趋势[图 1(b)], SOC_D 的增加速率介于 0 ~ 0.33 kg·(m²·a)⁻¹ 之间. 如图 1(b) 所示, 约有 52.63% 的站点 SOC_D 呈显著增加趋势 ($P < 0.05$). 其中, 桃源站、常熟站和拉萨站 SOC_D 增加速率相对较高, 分别为 0.33、0.17 和 0.14 kg·(m²·a)⁻¹. 约有 31.58% 的站点 SOC_D 变化趋势较小, 不足 0.02 kg·(m²·a)⁻¹, 主要分布在干旱半干旱地区, 特别是长武站和临泽站 SOC_D 增加速率在 0.01 kg·(m²·a)⁻¹ 以下.

图 1(c) 显示了不同土地利用方式下典型农田



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 SOC 的变化特征
Fig. 1 Changing characteristics of cropland SOC from 2005 to 2015

SOC 的变化趋势. 从中可知,不同作物类型的农田 SOC 均呈波动增加的趋势. 水稻田 SOC 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 SOC 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 SOC 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 $0.01 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$.

2.3 中国典型农田 SOC 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 SOC 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 SOC 空间分布的影响存在一定的差异性. 其中,AN 和 SpH 对农田 SOC 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, 而不存在显著的解释能力, 这表明土壤理化性状和降水量是影响农田 SOC 空间分布的重要因素.

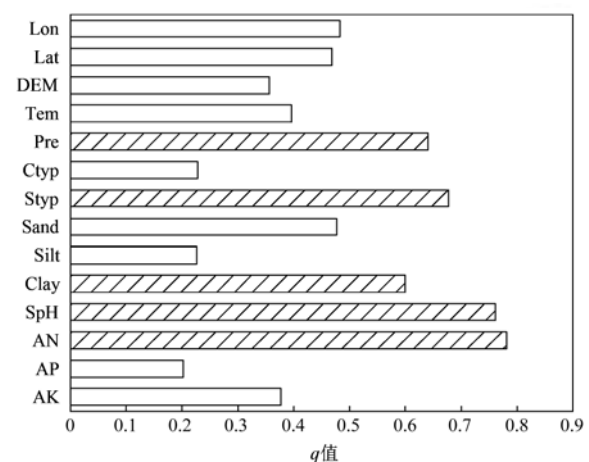


图 2 不同因素对典型农田 SOC 的解释力分析
Fig. 2 Explanation strength of different factors on typical cropland SOC

在实际环境条件下,农田 SOC 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 SOC 的空间分布影响均表现为协同效应,即交互后对农田 SOC 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 SOC 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.

为理解不同因素对农田 SOC 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 SOC 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 SOC 空间分布的影响具有显著差异, 这表明 AN 在各因素中表现得最为突出.

表 5 不同因素对典型农田 SOCD 的交互作用

Table 5 Interaction of the effects 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

表 6 典型农田 SOCD 的生态探测结果

Table 6 Ecological detection results 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 $0 \sim 0.33 \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{a})^{-1}$ 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 在各因素中表现得最为突出,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 在各因素中表现得最为突出,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[J]. *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 of the United States of America*, 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 Jianghan 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 of the Total Environment*, 2020, **709**, 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): 247-256, 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 (Natural Science)*, 2016, **55**(2): 247-256, 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**, 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 of the United States of America*, 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[J]. *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 & 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 in topsoil organic carbon of China's 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, *et al.* 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.* 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[J]. *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 [J]. *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, 闫国年, 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.

欢迎订阅 2021 年《环境科学》

《环境科学》创刊于 1976 年,由中国科学院主管,中国科学院生态环境研究中心主办,是我国环境科学学科中最早创刊的学术性期刊。

《环境科学》自创刊以来,始终坚持“防治污染,改善生态,促进发展,造福人民”的宗旨,报道我国环境科学领域内具有创新性高水平,有重要意义的基础研究和应用研究成果,以及反映控制污染,清洁生产和生态环境建设等可持续发展的战略思想、理论和实用技术等。

《环境科学》在国内外公开发行,并在国内外科技界有较大影响,被国内外一些重要检索系统收录,如工程索引 Ei Compendex;医学索引 MEDLINE;Scopus;化学文摘 CA;俄罗斯文摘杂志 AJ;美国生物学文摘预评 BP;美国医学索引 IM;日本科学技术情报中心数据库 JICST;英国动物学记录 ZR;剑桥科学文摘(CSA);Environmental Sciences;剑桥科学文摘(CSA);Pollution Abstracts;剑桥科学文摘(CAS);Life Sciences Abstracts等;国内的检索系统有中国科技论文统计与引文数据库(CSTPCD);中文科技期刊数据库(维普);中国期刊全文数据库(CNKI);数字化期刊全文数据库(万方);中国科学引文数据库(CSCD);中国生物学文摘等。

全国各地邮局均可订阅,如有漏订的读者可直接与编辑部联系,办理补订手续。

国内统一连续出版物号:CN 11-1895/X

国际标准连续出版物号:ISSN 0250-3301

国外发行代号:M 205

国内邮发代号:2-821

编辑部地址:北京市海淀区双清路 18 号(2871 信箱) 邮编:100085

电话:010-62941102;传真:010-62849343;E-mail:hjxx@rcees.ac.cn;网址:www.hjxx.ac.cn

CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)