

目次

2013~2020年天津市PM _{2.5} -O ₃ 污染变化趋势和影响因素分析	肖致美, 李亚菲, 高璟赞, 李鹏, 蔡子颖, 郑乃源, 张裕芬, 戴运峰 (4211)
2015~2020年济南市O ₃ 污染趋势及敏感性变化分析	孙晓艳, 孙军, 郭萌萌, 刘杨, 王宝琳, 范国兰, 许宏宇, 姜腾龙 (4220)
南京市南部地区O ₃ 污染特征、生成敏感性及传输影响分析	郑新梅, 胡崑, 王鸣, 谢放尖, 王艳 (4231)
天津市“十三五”期间O ₃ 污染特征和驱动因子	李源, 肖致美, 毕晓辉, 蔡子颖, 徐虹, 高璟赞, 郑乃源, 杨宁 (4241)
基于随机森林的南京市PM _{2.5} 和O ₃ 对减排的响应	尚永杰, 茅宇豪, 廖宏, 胡建林, 邹泽庸 (4250)
基于四维通量法的佛山臭氧污染输送量化	吴莉萍, 莫海华, 杨丽婷, 蔡梓炯, 吴国彤, 白玉洁, 邓思欣, 司徒淑婷, 常鸣, 王雪梅 (4262)
污染地块VOCs源衰减对室内蒸气入侵风险的影响	钟茂生, 汪洋, 姜林, 张丽娜, 马琳, 张瑞环, 赵莹, 李吉鸿 (4271)
2017~2020年长江流域水体污染物通量时空变化特征分析	郭朝臣, 雷坤, 李晓光, 周波, 吕旭波 (4279)
滹沱河流域山区地表水-地下水水化学空间变化特征、影响因素及其来源	孔晓乐, 常玉儒, 刘夏, 赵小宁, 沈彦军 (4292)
重庆东南部岩溶水金属元素空间分布、源解析及健康风险评价	谢浩, 邹胜章, 李军, 申豪勇, 林永生, 周长松, 王丹尼, 王志恒 (4304)
衡水市桃城区浅层地下水咸化成因	何锦, 张怀胜, 蔡五田, 王雨山 (4314)
吐鲁番南盆地平原区地下水污染风险评价	白凡, 周金龙, 周殷竹, 韩双宝, 孙英 (4325)
金属硫化物矿山水系统中微生物群落组成及多样性	丁聪聪, 朱旭炎, 赵兴青, 陆金, 周宇诚, 张欣怡, 王霄鹏 (4334)
白洋淀上覆水及沉积物中微塑料赋存特征	程昕煜, 杨丽虎, 宋献方 (4344)
基于溶解性有机物分子指纹特征解析城市河道污染来源与机制	朱奔, 叶建峰, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)
甾体激素在污水处理厂的赋存特征和行为归趋	刘媛媛, 冯慧, 张云, 叶亮, 钟琴, 邹华 (4364)
博鳌近岸海域表层沉积物中持久性有机污染物的分布、来源与生态风险评价	郝润波, 符国伟, 宋艳伟, 傅开哲, 袁坤 (4374)
太原市耕地土壤PAHs的含量、分布、源解析与风险评价	吴张伟, 段永红, 刘立文, 徐立帅, 陈香玲, 姚旭红 (4387)
雄安新区土壤氟地球化学特征及健康风险评价	郭志娟, 刘飞, 周亚龙, 王乔林, 王成文 (4397)
基于APCS-MLR和PMF模型解析黄河下游文化公园土壤重金属污染特征及来源分析	段海静, 马嘉玉, 彭超月, 刘德新, 王玉龙, 李旭辉, 马建华 (4406)
锰矿区周边农田土壤重金属污染特征、来源解析及风险评价	余高, 陈芬, 张晓东, 孙约兵 (4416)
老工业城市土壤-作物系统重金属的迁移累积及风险协同评价	王莹, 董爱俊, 杨建峰, 马彦斌, 王泽晶, 杨凡燕 (4429)
畜禽粪肥还田四环素类抗生素(TCs)在土壤-蔬菜系统的分布特征及风险评估	丁丹, 黄晓依, 顾静仪, 陈澄宇, 龙新亮, 曾巧云 (4440)
地质高背景区外源污染叠加条件下大白菜对Cd、Pb、Zn累积途径探究	简槐良, 刘鸿雁, 梅雪, 毛诗佳, 刘芳, 张秋野, 敬鹏 (4448)
微塑料与铅复合污染对玉米种子萌发与生长的影响	马贵, 廖彩云, 周悦, 丁家富, 周炎炎, 王展, 马燕 (4458)
施加Fe ₃ O ₄ /桑树杆生物炭对土壤团形态和水稻砷含量的影响	阮麟乔, 梁美娜, 丁艳梅, 曹海燕, 刘崇敏, 成官文, 朱义年, 王敦球 (4468)
生物炭与氮肥配施对镉污染水稻土修复效应及机制	张丽, 李如霞, 何玉奎, 姚彦坡, 林大松 (4479)
不同氮肥配施生物炭对镉污染土壤青菜镉吸收的影响	李平, 聂浩, 郎漫, 朱燕菊, 姜海波, 李楠 (4489)
椰纤维生物炭及其硝酸改性对稻田土壤中Pb钝化的影响	侯正伟, 李建宏, 李财生, 张婧旻, 林清火, 赵庆杰, 吴治澎, 王禹 (4497)
生物炭施用对微塑料污染石灰性土壤理化性质和细菌群落的影响	冉泰山, 龙健, 廖洪凯, 李娟, 杨国梅, 赵雨鑫 (4507)
改性生物炭负载零价铁对土壤中三氯乙烯的去除及微生物响应	陆海楠, 理鹏, 郭琳, 徐佳成, 杨洁, 黄沈发, 柯天英 (4519)
改性酒糟生物炭对紫色土养分及酶活性的影响	由乐林, 谢永红, 王子芳, 杨文娜, 高明 (4530)
化肥减量配施生物炭和秸秆增加了坡耕地土壤中流磷流失风险	赖佳鑫, 邓华, 朱浩宇, 黄容, 龙翼, 王子芳, 高明 (4541)
污泥和鸡粪生物炭制备及其老化过程中的碳损失	张滢, 张长浩, 张秀芳, 段文焱, 陈芳媛 (4554)
化肥和有机肥配施生物炭对根际土壤反硝化势和反硝化细菌群落的影响	谢军, 王子芳, 王莹, 熊子怡, 高明 (4565)
黄河下游谷子花生间作农田土壤细菌群落结构与功能预测	刘柱, 南镇武, 林松明, 孟维伟, 于海秋, 谢立勇, 张正, 万书波 (4575)
微咸水灌溉下微生物菌肥对盐渍土壤理化性质和细菌群落的影响	刘月, 杨树青, 张万峰, 姜帅 (4585)
高效石油降解菌修复石油污染土壤与强化机制分析	姚贞先, 王丽萍, 李丹, 李亚平, 何士龙, 赵雅琴 (4599)
土地集约利用程度对华北潮土农田土壤微生物群落丰度和死生物物质积累的影响	李胜君, 盛美君, 李刚, 王蕊, 李洁, 张贵龙, 修伟明 (4611)
中国省域碳达峰路径与政策	苗安康, 袁越, 吴涵, 马欣, 邵辰宇 (4623)
基于碳减排成本的我国省域碳补偿机制	钟诗雨, 张晓敏, 吴佳, 邹娜, 封强, 傅泽强 (4637)
不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的变化分析	刘欣宇, 卢江, 孟璇, 刘锦, 宋鹏, 李季, 田光明 (4647)
中国西北地区多情景土地利用优化与碳储量评估	陈宁, 辛存林, 唐道斌, 张亮, 辛顺杰 (4655)
陕西渭北旱塬区生境质量及碳储量时空演变分析与模拟	古圳威, 刘京, 陈怡, 卢新冉, 王思轶 (4666)
气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响	李艾雯, 宋靛颖, 冉敏, 李文丹, 张元媛, 李呈吉, 史文娇, 李启权 (4679)
降水变化下撂荒草地的化学计量失衡改变调节土壤呼吸	王佳懿, 王兴, 王源苗, 房景博, 夏开拉·阿克拜, 祖丽皮耶·居热艾提, 杨改河, 任成杰, 韩新辉 (4689)
水盐环境对黄河口淡水湿地土壤碳、氮、磷生态化学计量特征的影响	秦纪法, 张佳彭, 桑变, 杨云斐, 杨继松, 王志康, 栗云召, 周迪, 于君宝 (4698)
中国省域土壤重金属空间分布特征及分区分区管控对策	石航源, 王鹏, 郑家桐, 肖荣波, 邓一荣, 庄长伟 (4706)
壬基酚的环境生物地球化学研究进展及对新污染物管理的建议	洪亚军, 冯承莲, 徐大勇, 吴丰昌 (4717)
微塑料的形成机制及其环境分布特征研究进展	张龙飞, 刘玉环, 阮榕生, 赵蓝天, 王允圆, 张琦, 曹雷鹏, 崔宪, 巫小丹, 郑洪立 (4728)
生物炭添加对土壤温室气体排放影响的长短期效应研究进展	周咏春, 吴柳林, 李丹阳, 郭思伯, 陈志敏, 李正龙, 赵研 (4742)
铁基双金属催化剂活化过硫酸盐去除水中抗生素研究进展	魏健, 张新怡, 郭壮, 宋永会 (4751)
畜禽粪便污染的环境风险与资源化治理技术进展	安婧, 丁子明, 高程程, 胡芳雨, 魏树和 (4764)
《环境科学》征订启事(4230)	《环境科学》征稿简则(4303)
信息	(4506, 4678, 4741)

气候变暖对四川盆地水稻土有机碳含量变化的影响

李艾雯^{1,2}, 宋靛颖¹, 冉敏¹, 李文丹¹, 张元媛¹, 李呈吉¹, 史文娇², 李启权^{1*}

(1. 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

摘要: 气候变暖会提高土壤温度从而导致土壤碳释放,但也可以通过提高初级生产力增加土壤有机碳. 农田土壤被认为具有巨大的固碳潜力,然而大区域尺度上气候变暖如何影响农田土壤有机碳变化尚缺少直接观测. 水稻土是我国重要的耕作土壤之一,基于1980~1985年全国第二次土壤普查获得的2 217个样点数据和2017~2019年2 382个实地采样数据,分析了四川盆地水稻土表层土壤有机碳含量的变化特征,并探究了水稻土有机碳含量变化与气温、降雨量、农田利用方式、施肥强度和粮食产量的关系. 结果表明,近40年间四川盆地水稻土表层有机碳含量从13.33 g·kg⁻¹上升到15.96 g·kg⁻¹,增长了2.63 g·kg⁻¹,呈“碳汇”效应;不同地貌区和不同二级流域水稻土有机碳含量变化幅度不同. 水稻土有机碳含量增加量与年均气温呈正相关关系,与年均降雨量呈负相关关系,与年均施肥量及其增长速率、年均粮食产量及增长率则均呈先增加后降低的抛物线关系. 不同农田利用方式下水稻土有机碳含量增加量与年均气温增长率关系不同,年均气温增长率的增加仅在水旱轮作下对有机碳增长具有显著影响. 以上结果表明,四川盆地水稻土有机碳变化受多种因素共同影响,但气候变暖是导致区域水稻土有机碳变化的重要因素,且其影响受农田利用方式决定的水分条件控制.

关键词: 土壤有机碳(SOC); 时空变化; 水稻土; 气候变化; 四川盆地

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4679-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.202208221

Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China

LI Ai-wen^{1,2}, SONG Liang-ying¹, RAN Min¹, LI Wen-dan¹, ZHANG Yuan-yuan¹, LI Cheng-ji¹, SHI Wen-jiao², LI Qi-quan^{1*}

(1. College of Resources, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Climate warming can increase soil temperature and lead to soil carbon release, but it can also increase soil organic carbon by increasing primary productivity. Cropland soils are considered to have a huge potential to sequester carbon; however, direct observations for the responses of cropland soil organic carbon to climate warming over broad geographic scales are rarely documented. Paddy soil is one of the important cultivated soils in China. Based on the data of 2 217 sampling points obtained during the second national soil survey and the data of 2 382 sampling points collected during 2017–2019, this study analyzed the change characteristics of soil organic carbon content of paddy surface soil in Sichuan Basin of China and explored the relationships between the soil organic carbon change of paddy soil and temperature, precipitation, cropland use type, fertilization intensity, and grain yield. The results showed that the content of soil organic carbon of paddy soil changed from 13.33 g·kg⁻¹ to 15.96 g·kg⁻¹, with an increase of 2.63 g·kg⁻¹, suggesting that soils in the Sichuan Basin have acted as a carbon sink over past 40 years. The soil organic carbon increment of paddy soil varied with different geomorphic regions and different secondary basins. The increase in SOC content in paddy soil was positively correlated with annual average temperature; negatively correlated with annual average precipitation; and initially increased and then decreased with annual average fertilizer application, annual average increase rate of fertilizer application, annual average grain yield, and annual average grain yield growth rate. The relationship between the increase in SOC content and the annual average temperature growth rate was different under different farmland utilizations, and the increase in the annual average temperature growth rate had significant effects with the increase in SOC content only on paddy-dryland rotation. These results indicate that the paddy soil organic carbon change in Sichuan Basin was co-affected by various factors, but climate warming was an important factor leading to the paddy soil organic carbon change, and its influence was controlled by the water conditions determined by farmland use.

Key words: soil organic carbon(SOC); spatiotemporal change; paddy soil; climate change; Sichuan Basin

作为全球碳循环的重要组成部分,土壤有机碳(soil organic carbon, SOC)储量约为大气和植物的2~3倍. 因此, SOC储量的细微变化都会引起大气中CO₂浓度的改变,从而对全球气候产生重要影响^[1,2]. 通过土壤固存有机碳,减少土壤碳释放,已成为缓解全球气候变暖的重要途径之一^[2~4]. 耕地是陆地表面最大的土地利用方式,其SOC含量低于自然土壤,被认为具有巨大的固碳潜力^[2,3]. 受自然因素和人为活动的影响,耕地SOC具有高度的空间异质性^[4]. 同时, SOC对植物生长有着重要影响,是土壤肥力和耕地质量的重要评价指标^[5,6]. 因此,探

明耕地SOC变化及其影响因素对提升耕地土壤质量和提高土壤固碳量以保证粮食安全和缓解气候变暖有着重要意义.

作物生产过程中有机物的输入是耕地SOC最主要的来源^[7,8]. 各种影响因素中,施肥和农地利用方式等农业措施是影响作物生产力和有机物输入的关键因素^[9]. 施肥可以通过提高作物生产力增加作

收稿日期: 2022-08-23; 修订日期: 2022-11-07

基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0104)

作者简介: 李艾雯(1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为土壤碳循环与环境变化, E-mail: ivy_laww@163.com

* 通信作者, E-mail: liqq@lreis.ac.cn

物凋落物和根系生物量,从而增加 SOC;而农地利用方式则可以影响耕地地块的施肥水平、作物生产力和包括土壤水分和温度在内的土壤环境,进而引起 SOC 呈不同的变化规律^[2,9].除农业措施外,气候因素也是影响耕地 SOC 变化的重要控制因素^[10].有研究表明,年均降雨水平显著影响植物生产力和土壤水分状况,对区域 SOC 变化的影响远高于年均气温^[11~13];而升温则可以通过改变植物生产力和土壤中的生化过程影响 SOC 的积累和分解^[14,15].由于耕地土壤被认为主要受到农业措施的影响^[16],气候变暖对区域 SOC 变化的影响研究主要集中在林地和草地等自然土壤^[15,17,18],少有的关于耕地 SOC 变化对气候变暖的响应主要是通过点位温度控制试验来探究^[19,20].目前,在气候变暖背景下大区域尺度耕地 SOC 变化的影响因素尚不清楚,这限制了耕地 SOC 提升方案的准确制定和在复杂环境条件下对耕地 SOC 未来变化的精准预测.

水稻土是我国最主要的耕作土壤之一,约占全国耕地总面积的 25% 和世界水耕土壤面积的 23%^[21].与旱地土壤相比,水稻土 SOC 含量普遍较高^[21,22].开展区域水稻土 SOC 时空变化特征及其影响因素研究,尤其是在真实田间条件下揭示区域水稻土 SOC 含量变化与气候变暖的关系,将有利于正确评价水稻土碳库对全球气候变化的响应,降低对未来气候变化预测的不确定性.四川盆地水稻种植历史悠久,是中国最大的水稻产区之一.该区的水稻土由独特紫色母质发育而来,占比面积大,仅次于紫色土.已有研究仅在区县和流域等典型区域分析了盆地内水稻土 SOC 变化特征及其影响因素^[22~25],而整个四川盆地水稻土 SOC 含量变化状况并不清楚,尤其是气候变暖与农田利用方式如何共同影响区内水稻土 SOC 变化尚不明确.因此,本研究利用 1980~1985 年全国第二次土壤普查时获得的 2 217 个水稻土典型剖面点数据和 2017~2019 年实地采集的 2 382 个水稻土壤样点数据,分析近 40 年来整个四川盆地表层水稻土 SOC 含量变化特征,揭示 SOC 含量变化与年均温、年均温增长速率、年均降雨量、施肥强度、粮食产量和农田利用方式的关系,明确不同农田利用方式下年均温变化对水稻土 SOC 含量变化量的影响,通过准确掌握在气候变暖背景下该区域水稻土 SOC 变化规律,以期为该区域科学制定农田管理措施以实现农业碳中和提供参考依据.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川盆地是我国四大盆地之一,位于我国西南

腹地,地理位置介于 27°38'~32°54' N 和 102°48'~109°16' E 之间,面积约 26 万 km²,其中耕地面积占盆地总面积的 76% 以上,是西南地区重要的粮食产区.地势中间低,四周高,地貌类型多样,可分为成都平原区、川中丘陵区、平行岭谷区和盆周山区.盆地内各地年平均气温为 14.9~18.6℃,年均降水量为 700~1 700 mm,年日照时数为 900~1 300 h,无霜期约 280~350 d,属亚热带季风性气候.近几十年来,盆地内年均温总体上呈显著上升趋势,年均降雨量略有降低但变化不显著^[26,27].水稻土约占整个四川盆地面积的 31%,低于紫色土的 45%,是盆地内分布面积第二大的土壤类型,其成土母质主要有侏罗系的蓬莱镇组、沙溪庙组和遂宁组、白垩系的夹关组和灌口组紫色砂泥岩,上更新统黄色黏土和中下更新统老冲积物以及近代河流冲积物.受地形因素的影响,区内水稻土主要有两种利用方式,一种是只能种植一季水稻的水田,分布于地势较低的丘陵冲沟或山区山沟,由于土壤易滞水且温度低,冬季为冬水田或冬闲田;另一种是水旱轮作地,多分布于盆西成都平原以及位置相对较高的丘坡或山坡,主要以水稻-小麦或水稻-油菜等轮作方式为主.尽管近年来农业结构不断调整,但上述两种利用方式的水稻土分布面积仍然远高于其他利用方式.

1.2 数据来源与处理

1.2.1 土壤数据来源与分析

本研究土壤数据包括 20 世纪 80 年代(1980~1985 年)和 21 世纪 10 年代(2017~2019 年)两个时期的土壤样点数据.其中,20 世纪 80 年代土壤样点数据来自第二次全国土壤普查时形成的研究区内各区县土种志资料,采样时间为 1980~1985 年,共包括有完整数据记录信息的水稻土剖面点 2 217 个,且农田利用方式仅为水田(单季种植水稻)和水旱轮作田(水稻-小麦或水稻-油菜).每个剖面点均详细记录了采样地点、土壤类型、地形地貌和土壤理化性质等信息.21 世纪 10 年代土壤采样点参照 20 世纪 80 年代土壤采样点位置按照约 1:1 设置采样点数,除了保持土壤类型(土种)和农田利用方式不变,具体采样地块尽可能接近第二次土壤普查时样点的所在位置(同一村内或附近村镇),同时采样点所处的环境条件(地形部位)也尽可能相似.采样工作于 2016 年开始,集中在 2017~2019 年内完成,共计采集表层(0~20 cm)土壤样点 2 382 个.采样时以记录坐标为中心,在 5 m 半径内采集 4~5 个土样,然后采用四分法充分混合形成一个混合样.同时通过手持式 GPS 记录各采样点的经纬度坐标和海拔高度,并对采样时间、采样地点、地形部位、土壤类

型和农田利用方式等信息进行详细记录. 土壤样品带回实验室后置于通风处自然风干, 去除杂质并研磨过 100 目筛备用. 采用与 20 世纪 80 年代一致的重铬酸钾氧化-硫酸亚铁滴定法^[28]测定各样点 SOC 含量, 以平行样和标准物质 (GBW_07414a) 保证测定数据的准确性和精度.

1.2.2 环境数据来源与处理

环境数据包括气象数据、施肥数据和粮食产量数据. 其中, 气象数据包括研究区及其周边 144 个县级气象站点的 1981 ~ 2015 年逐日气温数据和降雨量数据; 利用该数据计算各气象站点年平均温、年降雨量和年均温变化率, 并采用普通克里格法插值得到四川盆地 30 m 空间分辨率的年均温、年降雨量和年均温变化率空间分布栅格数据. 各区县化肥施用量、粮食产量和耕地面积来自四川省农业统计年鉴和重庆市各区县统计年鉴 (1981 ~ 2015 年); 基于该数据计算得到研究区各区县年平均化肥施肥强度、年均施肥量增长速率、年均粮食产量和年均粮食产量增长速率. 此外, 两个时期各土壤样点所属农田利用方式为采样时记录的类型.

为探究年均温、降雨量、施肥强度和粮食产量对研究区水稻土 SOC 变化的影响, 按上述因素分段对 SOC 含量及其变化量进行统计. 在保证每个分段土壤样点数量不少于 30 个的前提下, 各因素按以下标准进行分段: 年均温为 0.3 °C、年均温变化率为 0.002 °C·a⁻¹、年均降雨量为 25 mm·a⁻¹、年均施肥量为 40 kg·(hm²·a)⁻¹、年均施肥量增长率为 2 kg·(hm²·a)⁻¹、粮食产量为 375 kg·(hm²·a)⁻¹ 和粮食产量增长率为 3.75 kg·(hm²·a)⁻¹. 由于第二次土壤普查剖面点位置为文字描述, 其空间位置是根据样点所在村镇和样点环境描述特征获得

的^[29,30], 且两个时期时间跨度大, 土地利用方式变化剧烈, 两期相邻采样点位置并不能完全一致. 为实现对研究区近 40 年水稻土 SOC 含量变化及其在不同环境条件下的差异的稳健估计, 采用自助抽样法对不同环境因素分段下两个时期 SOC 变化差异进行统计.

1.3 研究方法

通过方差分析和自助抽样法分析盆地内不同地貌区、不同流域和不同农田利用方式下两个时期水稻土 SOC 含量变化差异. 使用普通最小二乘法 (OLS), 选择其中决定系数最高的拟合方程来揭示水稻土有机碳含量变化量 (ΔSOC) 随年均温、年均降雨量、年均温增长速率、年均施肥量、年均施肥量增长速率 (分段数据)、年均粮食产量和年均粮食产量增长速率增加的变化规律. 以上分析均在 SPSS 27 软件中进行, 图件制作在软件 ArcGIS 10.6 和 Origin 2021 中完成.

2 结果与分析

2.1 四川盆地水稻土 SOC 含量总体变化特征

四川盆地两个时期水稻土 SOC 含量均表现为中间低四周高的空间分布格局 (图 1). 统计结果表明 (表 1), 21 世纪 10 年代盆地水稻土 ω (SOC) 为 15.96 g·kg⁻¹ (置信区间为 15.71 ~ 16.21 g·kg⁻¹), 与 20 世纪 80 年代相比, 显著增加了 2.63 g·kg⁻¹ ($P < 0.001$), 表明近 40 年来该区域水稻土 SOC 含量总体呈上升趋势, 表现为“碳汇”效应. 但不同区域水稻土 ΔSOC 差异明显 (表 1 和图 1); 与 20 世纪 80 年代相比, 盆地中部和西部水稻土 SOC 含量较高的样点明显增加 (图 1). 从不同地貌区来看, 川中丘陵区、成都平原区和川东平行岭谷区水稻土 SOC 含

表 1 近 40 年四川盆地水稻土表层 SOC 含量变化统计特征¹⁾
Table 1 Statistical characteristics of paddy topsoil organic carbon content in the Sichuan Basin in the last 40 years

分区方式	分区名	20 世纪 80 年代			21 世纪 10 年代			变化量	
		样点数	均值 /g·kg ⁻¹	置信区间 /g·kg ⁻¹	样点数	均值 /g·kg ⁻¹	置信区间 /g·kg ⁻¹	均值 /g·kg ⁻¹	置信区间
全区	四川盆地	2 217	13.33	13.06 ~ 13.60	2 382	15.96	15.71 ~ 16.21	2.63 ***	2.26 ~ 2.99
地貌	成都平原区	349	16.11a	15.47 ~ 16.75	471	19.09a	18.57 ~ 19.61	2.98 ***	2.17 ~ 3.80
	川中丘陵区	1 149	11.26c	10.97 ~ 11.56	1 184	14.50c	14.18 ~ 14.83	3.24 ***	2.80 ~ 3.68
	盆周山区	597	16.06a	15.45 ~ 16.68	634	16.69b	16.19 ~ 17.18	0.62	-0.16 ~ 1.41
	平行岭谷区	122	11.50b	10.57 ~ 12.42	93	13.67c	12.49 ~ 14.85	2.17 **	0.70 ~ 3.64
流域	涪江流域	208	11.38c	10.82 ~ 11.93	306	16.99a	16.30 ~ 17.69	5.62 ***	4.66 ~ 6.57
	嘉陵江流域	168	11.65c	10.93 ~ 12.38	224	13.69c	13.04 ~ 14.35	2.04 ***	1.06 ~ 3.02
	岷江流域	595	15.98a	15.33 ~ 16.63	532	17.79a	17.23 ~ 18.34	1.81 ***	0.94 ~ 2.67
	渠江流域	380	11.69c	11.20 ~ 12.18	440	13.17c	12.72 ~ 13.62	1.48 ***	0.82 ~ 2.15
	沱江流域	498	12.92b	12.42 ~ 13.42	543	17.35a	16.83 ~ 17.86	4.43 ***	3.71 ~ 5.14
	长江干流区	368	13.18b	12.49 ~ 13.86	337	15.05b	14.40 ~ 15.69	1.87 ***	0.93 ~ 2.81

1) 不同小写字母表示不同地貌区和不同流域之间水稻土 SOC 含量均值存在显著差异 ($P < 0.05$), ** 和 *** 分别表示显著水平 ($P < 0.01$) 和极显著水平 ($P < 0.001$)

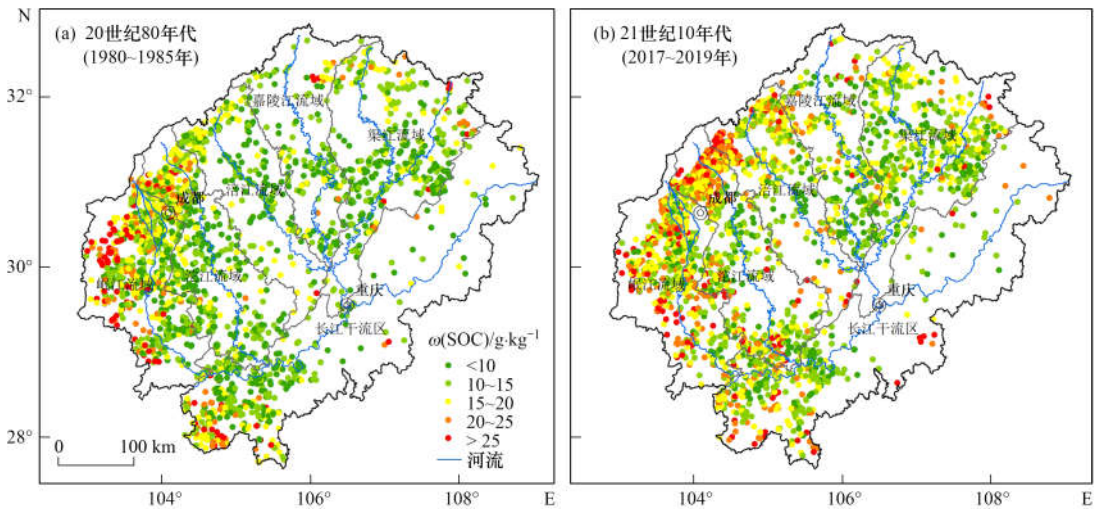


图 1 四川盆地不同时期水稻土采样点 SOC 含量分布示意

Fig. 1 Spatial distribution map in paddy soil organic carbon content of the soil sampling site in the Sichuan Basin in different periods

量均显著加 ($P < 0.001$), 盆周山地水稻土 $\omega(\text{SOC})$ 平均值增加了 $0.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 但未达到显著水平 ($P > 0.05$). 从研究区各二级流域来看, 涪江流域和沱江流域水稻土 ΔSOC 最大, 分别为 $5.62 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $4.43 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 是其他流域的 $2.75 \sim 3.80$ 倍和 $2.17 \sim 2.99$ 倍.

2.2 四川盆地水稻土 SOC 变化的主要影响因素

2.2.1 气温和降雨量

近 40 年间四川盆地水稻土 SOC 含量变化受到年均温及其变化率的显著影响 (图 2, $P < 0.001$).

其中, 水稻土 ΔSOC 与年均温呈显著的正相关关系 [图 2(a), $P < 0.001$], 而与年均温增长速率呈抛物线关系 ($P < 0.001$). 根据水稻土 ΔSOC 与年均温增长速率间的拟合方程, 当年均温增长速率为 $0.046 \text{ }^{\circ}\text{C} \cdot \text{a}^{-1}$ 时, ΔSOC 最大; 而随着年均温增长速率进一步增加, ΔSOC 开始减小. 上述结果说明盆地内年均气温较高的区域水稻土 SOC 含量增加越多; 而气温升高对水稻土 SOC 积累的促进作用存在一个阈值, 超过该值气温持续升高会引起 ΔSOC 降低.

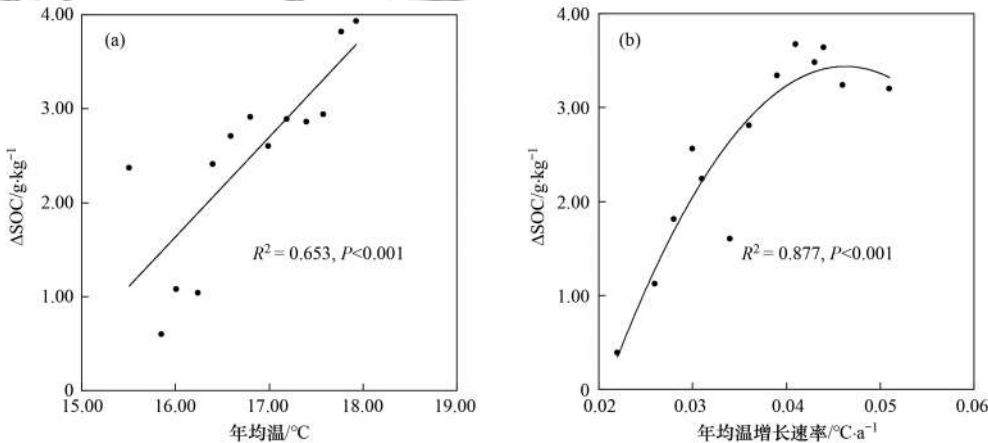


图 2 水稻土 ΔSOC 与年均温和年均温增长速率的关系

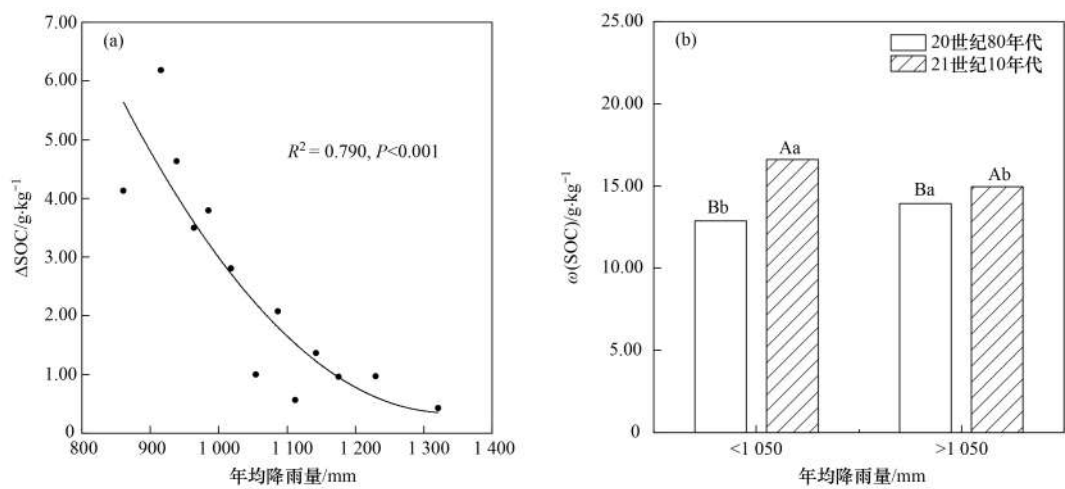
Fig. 2 Relationship between the variation in paddy soil organic carbon content and the annual average temperature and the growth rate of annual average temperature

近 40 年四川盆地水稻土 ΔSOC 随着年均降雨量增加呈明显的下降趋势, 与年均降雨量呈极显著的负相关关系 [图 3(a), $P < 0.001$]. 将研究区划分为高降雨量区 (年均降雨量 $> 1050 \text{ mm}$) 和低降雨量区 (年均降雨量 $< 1050 \text{ mm}$), 并对各区水稻土 ΔSOC 进行统计. 结果表明, 近 40 年间低降雨量区水稻土 ΔSOC 为 $3.72 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ [图 3(b)], 是高降雨

量区的 3.65 倍. 这表明, 年均降雨量较小的区域更利于水稻土 SOC 增长.

2.2.2 农田利用方式

20 世纪 80 年代两种农田利用方式下四川盆地水稻土 SOC 含量无显著差异 (图 4, $P > 0.05$), 相差 $0.27 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$; 21 世纪 10 年代水旱轮作方式下水稻土 $\omega(\text{SOC})$ 为 $16.65 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 显著高于水田 ($P <$

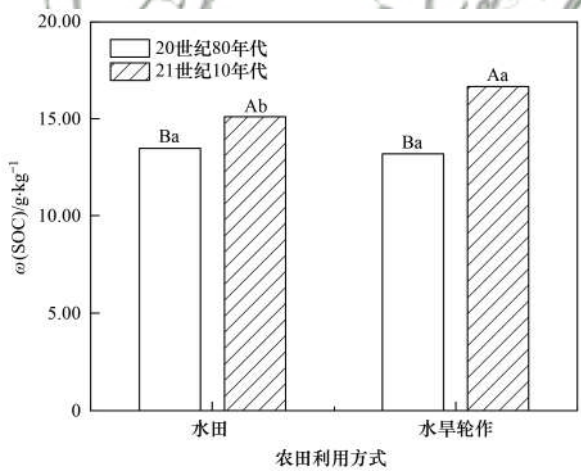


不同小写字母表示同一时期不同降雨量区域之间水稻土 SOC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同降雨量区域不同时期之间水稻土 SOC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)

图3 水稻土 ΔSOC 与年均降雨量的关系和不同降雨条件下水稻土 SOC 变化特征

Fig. 3 Relationship between the variation in paddy soil organic carbon content and the annual average rainfall and the variation in paddy soil organic carbon content under different rainfall conditions

0.05). 不同农田利用方式下近 40 年研究区水稻土 ΔSOC 不同 ($P < 0.05$), 水旱轮作方式下水稻土 ΔSOC 为 $3.45 g \cdot kg^{-1}$, 是水田的 2.14 倍. 这表明, 相较于单季种植水稻的水田, 水旱轮作方式更有利于研究区水稻土 SOC 累积.



不同小写字母表示同一时期不同农田利用方式之间水稻土 SOC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同农田利用方式不同时期之间水稻土 SOC 含量存在显著差异 ($P < 0.05$)

图4 不同农田利用方式下水稻土 SOC 含量变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of paddy soil organic carbon content under different farmland utilization

2.2.3 施肥强度和粮食产量

施肥对水稻土 SOC 含量变化影响显著, 但两者间关系并非直线关系. 从图 5 可以看出, 随着年均施肥量和年均施肥量增长速率的增加, 近 40 年四川盆地水稻土 ΔSOC 呈先增加后降低的变化趋势. 根据拟合方程, 当年均施肥量为 $503.30 kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ 或年均施肥量增长速率为 17.29

$kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ 时, 水稻土 ΔSOC 最大, 分别为 $3.53 g \cdot kg^{-1}$ 和 $3.37 g \cdot kg^{-1}$. 这表明, 适当施肥可以提高研究区水稻土 SOC 含量, 但施肥过高或施肥量持续增长并不会引起水稻土 SOC 含量的持续增加.

近 40 年间水稻土 ΔSOC 与年均粮食产量及变化也表现为呈明显的抛物线关系 (图 6, $P < 0.01$), 随着年均粮食产量和年均粮食产量增长率的增加, 水稻土 ΔSOC 呈现先增加后趋于稳定的变化趋势. 根据拟合方程, 当年均粮食产量为 $414.56 kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ 或年均粮食产量增长率为 $3.67 kg \cdot (hm^2 \cdot a)^{-1}$ 时, 水稻土 ΔSOC 达到最大值, 分别为 $3.08 g \cdot kg^{-1}$ 和 $3.17 g \cdot kg^{-1}$. 粮食产量高低可反映作物生物量大小, 从而间接反映作物生产过程中有机物输入对 SOC 含量变化的影响. 上述结果表明, 作物生物量越大或增长量越大, SOC 积累量越大; 但也存在一个阈值, 超过该值后, 作物生物量或增长量继续增加对 SOC 增加的影响并无贡献.

2.3 不同农田利用方式下水稻土 ΔSOC 与年均气温增长速率的关系

不同农田利用方式下水稻土 ΔSOC 与年均气温增长率之间的关系明显不同 (图 7). 在水田利用方式下, 研究区水稻土 ΔSOC 与年均气温增长率之间呈正相关关系, 但该相关关系并不显著 [图 7 (a), $P > 0.05$]; 而在水旱轮作下二者之间呈显著的抛物线关系 [图 7 (b), $P < 0.001$]. 根据拟合方程, 当年均气温增长速率为 $0.041 ^\circ C \cdot a^{-1}$ 时, 水旱轮作下水稻土 ΔSOC 最大, 随后随着年均气温增长

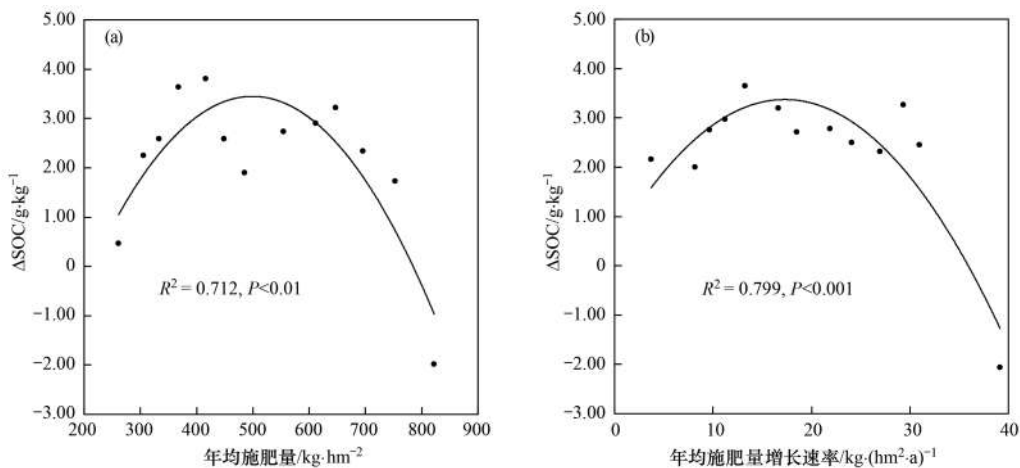


图 5 水稻土 Δ SOC 与年均施肥量和年均施肥量增长率的关系

Fig. 5 Relationship between the variation in paddy soil organic carbon content and the average annual fertilizer application and the growth rate of the average annual fertilizer application

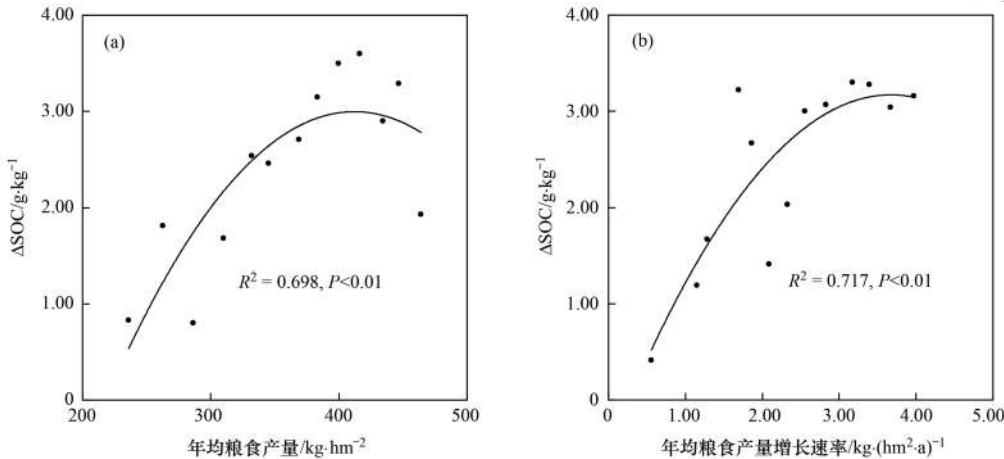


图 6 水稻土 Δ SOC 与年均粮食产量和年均粮食产量增长率的关系

Fig. 6 Relationship between the variation in paddy soil organic carbon content and the annual average grain yield and the growth rate of the average annual grain yield

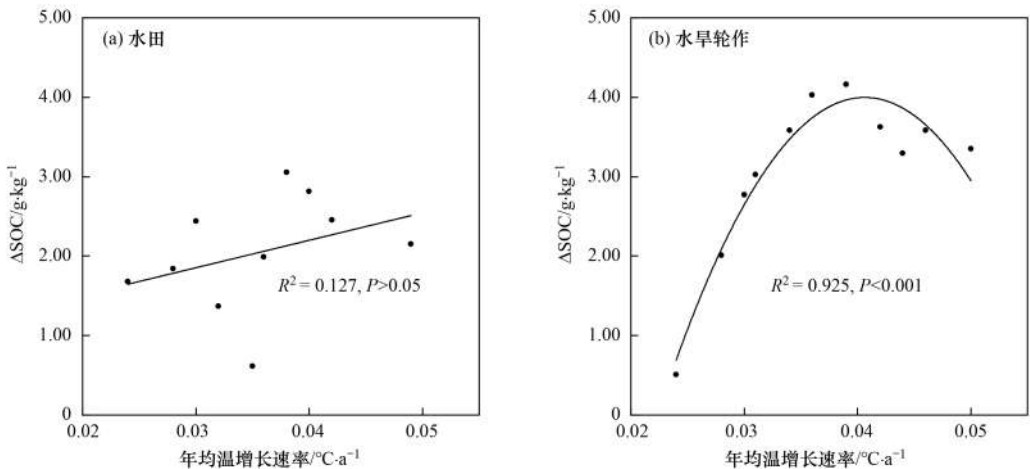


图 7 不同农田利用方式下水稻土 Δ SOC 与年均温增长率的关系

Fig. 7 Relationship between the variation in paddy soil organic carbon content and the growth rate of annual mean temperature under different farmland utilizations

速率增加而减小. 这表明, 气候变暖对盆地内水稻土 SOC 含量变化的影响受农田利用方式的控制,

气温升高只对水旱轮作下水稻土 SOC 含量具有显著的影响.

3 讨论

3.1 四川盆地水稻土 SOC 累积及其影响因素

近 40 年四川盆地水稻土 SOC 含量总体呈上升趋势, 表现为“碳汇”效应. 这一结果与盆地内小区域尺度上的研究结果一致^[2,22,23,25], 也与我国其他区域水稻土 SOC 变化趋势一致^[7,31,32]. 从增幅来看, 四川盆地水稻土 Δ SOC 为 $2.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 远低于江苏省 ($7.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)^[33], 这可能与两个地区的土壤类型和种植方式差异有关. 四川盆地种植的为单季水稻(水田/水旱轮作), 作物生物量远低于江西省种植双季稻^[2]. 此外, 相较于江西省的红壤, 四川盆地的水稻土主要由紫色页岩发育形成, 属于初育土, 有机碳初始含量较低; 且质地较粗, 易受水土流失的影响, 不利于积累^[25]. 同时, 盆地内不同区域水稻土 Δ SOC 存在明显差异, 这与不同区域水分条件、气候变化、施肥以及作物生物量有关.

首先, 相对干燥环境下(降雨量 $< 1050 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 水旱轮作), 水稻土 Δ SOC 较大, 表明水稻土 SOC 变化与水分条件有关. 这一结果与全球主要谷物种植系统的土壤 SOC 动态模拟结果以及澳大利亚农业生态系统的观测结果一致^[10,34]. 以上研究均表明, 降水对农田 SOC 变化具有负面影响. 水分条件与 Δ SOC 的负相关关系主要是与水分控制的净生物产量变化以及湿润条件下水分导致的碳损失有关^[11,12]. 有研究发现, 大区域尺度年平均降水量处于中等水平时($750 \sim 950 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$)生态系统初级生产力达到最大, 随后随着降雨量的增加, 生态系统初级生产力不断减小, 并且降水的这种效应不会被农业活动改变^[11]. 也有研究表明, 较高的土壤水分会降低作物产量^[35]. 四川盆地年均降雨量在 $700 \sim 1700 \text{ mm}$ 之间, 水分条件不是该区域植物生长和生态系统生产力的最大限制因素^[36]. 因而, 较高的降水量和土壤湿度会降低植物生产力, 从而减少对土壤的碳输入. 淹水土壤的 SOC 主要成分为颗粒态有机碳^[12], 这种成分更容易分解并随水流失^[10]. 同时, 土壤长期处于高水分状态可引起铁还原从而促进矿物保护 SOC 的矿化, 也会引起土壤中的碳损失^[12]. 此外, 水旱轮作利用方式下作物生物量也远大于只种一季水稻的水田. 上述原因使得研究区相对干燥环境下(降雨量 $< 1050 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 水旱轮作)水稻土 Δ SOC 高于相对湿润环境(降雨量 $> 1050 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$, 水田). 尽管低水分条件产生的好气条件也有利于 SOC 的分解, 但 SOC 的分解和积累还与土壤本身特性有关, 尤其是土壤容重和土壤质地^[2,10]. 由外界环境(降雨和农田利用方式)引起的水分条件

变化导致的 SOC 分解与积累可能存在着一个由土壤本身特性控制的平衡, 这有待于进一步探究.

施肥与粮食产量均与作物生产过程中有机物输入有关. 调研采样中发现, 近 20 年来本研究涉及的两种农田利用方式施肥主要以化肥为主, 有机肥施用越来越少, 甚至不施. 因此, 本研究只分析了化肥施用量对 SOC 的影响. 尽管施肥可促进作物生长增加作物凋落物和根系生物量, 从而提高耕地 SOC^[2,9], 但本研究发现, 施肥和粮食产量及其增长率与 Δ SOC 均呈抛物线关系, 即施肥与作物生物量的持续增加并不会引起水稻土 SOC 的持续增加. 对施肥而言, 过量化肥投入可以通过加速土壤酸化减少根系产量^[37], 或者通过改变微生物群落组成刺激作物残留物和 SOC 的分解^[38], 最终导致 SOC 减少. 虽然作物生物量直接影响着水稻土有机物的输入, 但土壤中碳的输入输出首先受环境因素(如水分条件)和土壤特性(质地和容重等)的控制, 其次才是植被特征^[39,40]. 当外界有机物输入超过由土壤环境和土壤特性所决定的有机物接纳容量时, SOC 将不再增长, 这就使得研究区水稻土 Δ SOC 随着粮食产量及其增长率的增加呈现先增加后趋于稳定的变化规律.

最后, 温度因素也是影响研究区水稻土 Δ SOC 的重要因素. 本研究发现, 四川盆地水稻土 Δ SOC 随着年均气温增加而增加. 这主要是因为随着年均气温的升高, 作物光温生产力也在增加, 从而进入土壤的有机物更多. 同时, 盆地内年均气温与年均降雨量呈负相关关系, 年均气温的影响包含了一部分降雨因素的影响. 气候变暖(年均气温增长率增加)则会导致作物光温生产力的增加和土壤呼吸作用加强, 从而引起 SOC 含量变化^[14,15], 成为区域尺度上水稻土 SOC 变化的控制因素.

3.2 气候变暖对四川盆地水稻土 SOC 含量变化的影响

本研究在区域真实田间条件下证实了气候变暖是四川盆地水稻土 SOC 变化的重要控制因素. 研究发现, 水稻土 Δ SOC 与年均温增长率呈抛物线关系, 且该抛物线关系只发生在地势较高、一年种植两季作物的水旱轮作农田, 而在地势较低、水分含量高、只能单季种植水稻的水田上气候变暖对水稻土 Δ SOC 的影响不明显.

首先, 对农田而言, 气候变暖可导致作物在变暖 2°C 之前作物产量增加^[41]. 这是因为如果植物的光合速率达到最大值, 或者由于其他限制因素, 如营养限制, 变暖的影响可能会消失^[42,43]. 此外, 作物生长和发育存在着最佳温度, 持续变暖导致的较高温度

可通过诱导作物不育从而降低生产力^[44,45],进而减少有机物输入。同时,气候变暖可提高土壤温度和土壤呼吸,尤其是表层土壤温度和土壤呼吸,加速 SOC 分解^[14,15]。即随着年均气温增长率持续增加,变暖对作物生产力的正向影响会逐渐消失,作物生产力不再进一步提高甚至受到抑制,从而导致进入土壤的有机物减少;而同时土壤呼吸作用加强,SOC 的分解速率逐渐大于 SOC 的输入速率,最终导致 Δ SOC 随年均气温增长率的增大而呈抛物线变化。

其次,由农田利用方式不同引起的水分条件差异进一步控制了气候变暖对研究区水稻土 SOC 变化的影响。在区域和全球尺度的研究中发现,水分在调节土壤碳变化方面的作用超过气温^[7,10,46,47],温度对 SOC 变化的调节作用只有在控制了水分条件的影响后或在温度变化梯度较大的区域才会变得显著^[48,49]。这可能是因为相对湿润的条件下,由于水的热容量较大,气温和土壤温度变化幅度较小,不能显著改变长期以来碳输入和分解之间的平衡,导致 SOC 对变暖的敏感性较低。许多区域观测结果也证实了上述推断,即陆地碳交换和土壤呼吸对温度变化的响应受水分条件的调节,在干燥条件下 SOC 更容易受到温度变化的影响^[17,50,51]。

本研究中两个时期土壤采样点位置并不完全一致,气象因子的空间分布通过普通克里格法插值得到,各因素的影响是通过分段统计来分析的,这可能为研究结果带来一些不确定性,但这种不确定性不会改变研究结论。一是本研究样本量大,同时利用自助抽样法确保了对两个时期 SOC 及其变化量的稳健估计。二是由于时间跨度大且土地利用方式转变剧烈,在如此大区域很难实现两个时期之间严格的土壤重采样。本研究在采样时尽可能保证了两个时期样点位置接近、土壤类型和农田利用方式相同并具有相似的土壤环境。三是已有大量研究采用了类似方法并成功估计了不同时期之间 SOC 含量变化及其影响因素^[7,16,32]。此外,气象因子具有较强的空间自相关性,克里格方法能够很好地描述其空间分布趋势^[1];将各因子进行分段统计,可以清晰地揭示沿这些因子变化梯度上水稻土 SOC 含量的变化差异,从而保证本文研究结果的可靠性。本研究得到的水稻土 Δ SOC 与年均气温增长率间的抛物线关系,为长期以来广泛关注的土壤碳-气候变化间的正反馈关系提供直接支持。同时,不同农田利用方式下水稻土 Δ SOC 与年均气温增长率间的不同关系表明,气候变暖引起的 SOC 变化受到多种因素的共同影响,地球系统模型中仅建立 SOC 变化与温度变化间的关系将在预测未来土壤碳变化时带来很大的不

确定性,产生对农田土壤碳封存潜力不可靠的估计。

4 结论

(1) 近 40 年,四川盆地水稻土 ω (SOC) 从 $13.66 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升至 $15.96 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,增加了 $2.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,表现为“碳汇”效应;但不同地貌区和不同二级流域水稻土 Δ SOC 不同。

(2) 四川盆地水稻土 Δ SOC 与年均气温呈正相关关系,与年均降雨量呈负相关关系;与年均施肥量及其增长速率、年均粮食产量及增长率则均呈先增加后降低的抛物线关系;相对干燥环境(年均降雨量 $< 1050 \text{ mm}$,水旱轮作)更利于研究区水稻土 SOC 积累。

(3) 四川盆地水稻土 Δ SOC 与年均气温增长率在水旱轮作方式下具有显著的相关性,呈先升后降的抛物线变化趋势,在水田下不显著相关;即气候变暖对研究区水稻土 SOC 含量变化的影响受农田利用方式控制。这说明适当的农田管理措施,尤其是水分管理对实现农田土壤碳固存以缓解气候变暖至关重要。

参考文献:

- [1] Li Q Q, Zhang H, Jiang X Y, *et al.* Spatially distributed modeling of soil organic carbon across China with improved accuracy[J]. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 2017, **9**(2): 1167-1185.
- [2] Li Q Q, Li A W, Dai T F, *et al.* Depth-dependent soil organic carbon dynamics of croplands across the Chengdu Plain of China from the 1980s to the 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(7): 4134-4146.
- [3] 赵永存,徐胜祥,王美艳,等. 中国农田土壤固碳潜力与速率:认识、挑战与研究建议[J]. *中国科学院院刊*, 2018, **33**(2): 191-197.
Zhao Y C, Xu S X, Wang M Y, *et al.* Carbon sequestration potential in Chinese cropland soils: Review, challenge, and research suggestions [J]. *Bulletin of Chinese Academy of Sciences*, 2018, **33**(2): 191-197.
- [4] 李珊,李启权,王昌全,等. 成都平原区水稻土有机碳剖面分布特征及影响因素[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3365-3372.
Li S, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Profile distribution of paddy soil organic carbon and its influencing factors in Chengdu Plain[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3365-3372.
- [5] Batjes N H. Harmonized soil property values for broad-scale modelling (WISE30sec) with estimates of global soil carbon stocks[J]. *Geoderma*, 2016, **269**: 61-68.
- [6] Zhang K R, Dang H S, Zhang Q F, *et al.* Soil carbon dynamics following land-use change varied with temperature and precipitation gradients: evidence from stable isotopes[J]. *Global Change Biology*, 2015, **21**(7): 2762-2772.
- [7] Han D R, Wiesmeier M, Conant R T, *et al.* Large soil organic carbon increase due to improved agronomic management in the North China Plain from 1980s to 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2018, **24**(3): 987-1000.
- [8] Liao Q L, Zhang X H, Li Z P, *et al.* Increase in soil organic

- carbon stock over the last two decades in China's Jiangsu Province [J]. *Global Change Biology*, 2009, **15**(4): 861-875.
- [9] Luo Y L, Li Q Q, Shen J, *et al.* Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area [J]. *Land Degradation & Development*, 2019, **30**(15): 1875-1885.
- [10] Luo Z K, Feng W T, Luo Y Q, *et al.* Soil organic carbon dynamics jointly controlled by climate, carbon inputs, soil properties and soil carbon fractions[J]. *Global Change Biology*, 2017, **23**(10): 4430-4439.
- [11] Liu Z H, Ballantyne A P, Poulter B, *et al.* Precipitation thresholds regulate net carbon exchange at the continental scale [J]. *Nature Communications*, 2018, **9**, doi: 10.1038/s41467-018-05948-1.
- [12] Huang W J, Hall S J. Elevated moisture stimulates carbon loss from mineral soils by releasing protected organic matter [J]. *Nature Communications*, 2017, **8**(1), doi: 10.1038/s41467-017-01998-z.
- [13] Humphrey V, Berg A, Ciais P, *et al.* Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability [J]. *Nature*, 2021, **592**: 65-69.
- [14] Ding J Z, Chen L Y, Ji C J, *et al.* Decadal soil carbon accumulation across Tibetan permafrost regions [J]. *Nature Geoscience*, 2017, **10**(6): 420-424.
- [15] Nottingham A T, Meir P, Velasquez E, *et al.* Soil carbon loss by experimental warming in a tropical forest[J]. *Nature*, 2020, **584**(7820): 234-237.
- [16] 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.
- [17] Quan Q, Tian D S, Luo Y Q, *et al.* Water scaling of ecosystem carbon cycle feedback to climate warming [J]. *Science Advances*, 2019, **5**(8), doi: 10.1126/sciadv. aav1131.
- [18] Bai T S, Wang P, Hall S J, *et al.* Interactive global change factors mitigate soil aggregation and carbon change in a semi-arid grassland [J]. *Global Change Biology*, 2020, **26**(9): 5320-5332.
- [19] Chen S T, Wang J, Zhang T T, *et al.* Warming and straw application increased soil respiration during the different growing seasons by changing crop biomass and leaf area index in a winter wheat-soybean rotation cropland [J]. *Geoderma*, 2021, **391**, doi: 10.1016/j.geoderma.2021.114985.
- [20] Hamdi S, Moyano F, Sall S, *et al.* Synthesis analysis of the temperature sensitivity of soil respiration from laboratory studies in relation to incubation methods and soil conditions [J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, **58**: 115-126.
- [21] 程琨, 潘根兴. 农业与碳中和[J]. *科学*, 2021, **73**(6): 8-12.
- Cheng K, Pan G X. Agriculture and carbon neutrality [J]. *Science*, 2021, **73**(6): 8-12.
- [22] Luo Y L, Wang K, Li H X, *et al.* Application of a combinatorial approach for soil organic carbon mapping in hills [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, **300**, doi: 10.1016/j.jenvman.2021.113718.
- [23] 胡嗣佳, 邓欧平, 张世熔, 等. 四川盆地水稻土有机碳与全氮的时空变异及影响因素研究[J]. *土壤*, 2016, **48**(2): 401-408.
- Hu S J, Deng O P, Zhang S R, *et al.* Spatial-temporal variability of soil organic carbon and total nitrogen in paddy soils in Sichuan Basin [J]. *Soils*, 2016, **48**(2): 401-408.
- [24] 李婷, 张世熔, 刘浔, 等. 沱江流域中游土壤有机质的空间变异特点及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2011, **48**(4): 863-868.
- Li T, Zhang S R, Liu X, *et al.* Spatial variation of soil organic matter and its influence factors in the middle reaches of Tuojiang river basin [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, **48**(4): 863-868.
- [25] 罗由林, 李启权, 王昌全, 等. 近 30 年来川中紫色丘陵区土壤碳氮时空演变格局及其驱动因素[J]. *土壤学报*, 2016, **53**(3): 582-593.
- Luo Y L, Li Q Q, Wang C Q, *et al.* Spatio-temporal variations of soil organic carbon and total nitrogen and driving factors in purple soil hilly area of mid-Sichuan Basin in the past 30 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2016, **53**(3): 582-593.
- [26] 陈超, 庞艳梅, 张玉芳. 近 50 年来四川盆地气候变化特征研究[J]. *西南大学学报(自然科学版)*, 2010, **32**(9): 115-120.
- Chen C, Pang Y M, Zhang Y F, *et al.* On the characteristics of climate change in Sichuan Basin in the recent 50 years [J]. *Journal of Southwest University (Natural Science Edition)*, 2010, **32**(9): 115-120.
- [27] 周长艳, 岑思弦, 李跃清, 等. 四川省近 50 年降水的变化特征及影响[J]. *地理学报*, 2011, **66**(5): 619-630.
- Zhou C Y, Cen S X, Li Y Q, *et al.* Precipitation variation and its impacts in Sichuan in the last 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, **66**(5): 619-630.
- [28] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [29] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤全氮的空间模拟分析[J]. *地理研究*, 2010, **29**(11): 1981-1992.
- Li Q Q, Yue T X, Fan Z M, *et al.* Spatial simulation of topsoil TN at the national scale in China [J]. *Geographical Research*, 2010, **29**(11): 1981-1992.
- [30] 李启权, 岳天祥, 范泽孟, 等. 中国表层土壤有机质空间分布模拟分析方法研究[J]. *自然资源学报*, 2010, **25**(8): 1385-1399.
- Li Q Q, Yue T X, Fan Z M, *et al.* Study on method for spatial simulation of topsoil SOM at national scale in China [J]. *Journal of Natural Resources*, 2010, **25**(8): 1385-1399.
- [31] 杨帆, 徐洋, 崔勇, 等. 近 30 年中国农田耕层土壤有机质含量变化[J]. *土壤学报*, 2017, **54**(5): 1047-1056.
- Yang F, Xu Y, Cui Y, *et al.* Variation of soil organic matter content in croplands of China over the last three decades [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, **54**(5): 1047-1056.
- [32] 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.
- [33] 李委涛, 刘明, 李朋发, 等. 近 40 年余江县高产水稻土有机碳及养分含量的演变特征[J]. *土壤学报*, 2020, **57**(4): 937-942.
- Li W T, Liu M, Li P F, *et al.* Temporal variation of soil organic C and nutrients in high yield paddy soils of Yujiang County in the past 40 years [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, **57**(4): 937-942.
- [34] Wang G C, Zhang W, Sun W J, *et al.* Modeling soil organic carbon dynamics and their driving factors in the main global cereal cropping systems [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2017, **17**(19): 11849-11859.
- [35] Zhang J, Wang H B, Liu J, *et al.* Influence of water potential and soil type on conventional japonica super rice yield and soil

- enzyme activities[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2017, **16**(5): 1044-1052.
- [36] Li Q Q, Li S, Xiao Y, *et al.* Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. *Catena*, 2019, **175**: 278-285.
- [37] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, *et al.* Significant acidification in major Chinese croplands [J]. *Science*, 2010, **327**: 1008-1010.
- [38] Six J, Frey S D, Thiet R K, *et al.* Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, **70**(2): 555-569.
- [39] Doetterl S, Stevens A, Six J, *et al.* Soil carbon storage controlled by interactions between geochemistry and climate [J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(10): 780-783.
- [40] Haaf D, Six J, Doetterl S. Global patterns of geo-ecological controls on the response of soil respiration to warming[J]. *Nature Climate Change*, 2021, **11**(7): 623-627.
- [41] Challinor A J, Watson J, Lobell D B, *et al.* A meta-analysis of crop yield under climate change and adaptation [J]. *Nature Climate Change*, 2014, **4**(4): 287-291.
- [42] Green J K, Seneviratne S I, Berg A M, *et al.* Large influence of soil moisture on long-term terrestrial carbon uptake[J]. *Nature*, 2019, **565**(7740): 476-479.
- [43] Wieder W R, Cleveland C C, Smith W K, *et al.* Future productivity and carbon storage limited by terrestrial nutrient availability[J]. *Nature Geoscience*, 2015, **8**(6): 441-444.
- [44] Kim J, Shon J, Lee C K, *et al.* Relationship between grain filling duration and leaf senescence of temperate rice under high temperature[J]. *Field Crops Research*, 2011, **122**(3): 207-213.
- [45] Giorno F, Wolters-Arts M, Mariani C, *et al.* Ensuring reproduction at high temperatures; the heat stress response during anther and pollen development[J]. *Plants*, 2013, **2**(3): 489-506.
- [46] Carvalhais N, Forkel M, Khomik M, *et al.* Global covariation of carbon turnover times with climate in terrestrial ecosystems[J]. *Nature*, 2014, **514**(7521): 213-217.
- [47] Chen L Y, Fang K, Wei B, *et al.* Soil carbon persistence governed by plant input and mineral protection at regional and global scales[J]. *Ecology Letters*, 2021, **24**(5): 1018-1028.
- [48] Jia Y F, Kuzyakov Y, Wang G A, *et al.* Temperature sensitivity of decomposition of soil organic matter fractions increases with their turnover time [J]. *Land Degradation & Development*, 2020, **31**(5): 632-645.
- [49] Yu S Y, He H L, Cheng P, *et al.* Depth heterogeneity of soil organic carbon dynamics in a heavily grazed alpine meadow on the northeastern Tibetan Plateau: a radiocarbon-based approach[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2017, **122**(7): 1775-1788.
- [50] Lellei-Kovács E, Kovács-Láng E, Botta-Dukát Z, *et al.* Thresholds and interactive effects of soil moisture on the temperature response of soil respiration[J]. *European Journal of Soil Biology*, 2011, **47**(4): 247-255.
- [51] Wang X H, Piao S L, Ciais P, *et al.* A two-fold increase of carbon cycle sensitivity to tropical temperature variations [J]. *Nature*, 2014, **506**(7487): 212-215.

CONTENTS

Analysis of Change Trend and Influencing Factors of PM _{2.5} -O ₃ Pollution in Tianjin from 2013 to 2020	XIAO Zhi-mei, LI Ya-fei, GAO Jing-yun, <i>et al.</i> (4211)
Changes in Ozone Pollution Trend Characteristics and Sensitivity in Jinan from 2015 to 2020	SUN Xiao-yan, SUN Jun, GUO Meng-meng, <i>et al.</i> (4220)
Analysis of O ₃ Pollution Characteristics, Formation Sensitivity, and Transport Impact in Southern Nanjing	ZHENG Xin-mei, HU Kun, WANG Ming, <i>et al.</i> (4231)
Characteristics and Driving Factors of O ₃ Pollution During 13 th Five-Year Period in Tianjin	LI Yuan, XIAO Zhi-mei, BI Xiao-hui, <i>et al.</i> (4241)
Response of PM _{2.5} and O ₃ to Emission Reductions in Nanjing Based on Random Forest Algorithm	SHANG Yong-jie, MAO Yu-hao, LIAO Hong, <i>et al.</i> (4250)
Quantification of Ozone Pollution Transport Based on Four-dimensional Flux Method in Foshan, China	WU Li-ping, MO Hai-hua, YANG Li-ting, <i>et al.</i> (4262)
Effects of Source Depletion on Vapor Intrusion Risk Assessment	ZHONG Mao-sheng, WANG Yang, JIANG Lin, <i>et al.</i> (4271)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Main Pollutant Fluxes in the Yangtze River Basin from 2017 to 2020	GUO Chao-chen, LEI Kun, LI Xiao-guang, <i>et al.</i> (4279)
Spatial Variation Characteristics, Influencing Factors, and Sources of Hydrogeochemical of Surface Water and Groundwater in Mountainous Area of Hutuo River	KONG Xiao-le, CHANG Yu-ru, LIU Xia, <i>et al.</i> (4292)
Spatial Distribution, Source Analysis, and Health Risk Assessment of Metal Elements in Karst Water in Southeastern Chongqing	XIE Hao, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (4304)
Mechanism of Salinization of Shallow Groundwater in Taocheng District, Hengshui City	HE Jin, ZHANG Huai-sheng, CAI Wu-tian, <i>et al.</i> (4314)
Assessment of Groundwater Contamination Risk in the Plain Area of Southern Turpan Basin	BAI Fan, ZHOU Jin-long, ZHOU Yin-zhu, <i>et al.</i> (4325)
Microbial Community Composition and Diversity in Metal Sulfide Mine Water Systems	DING Cong-cong, ZHU Xu-yan, ZHAO Xing-qing, <i>et al.</i> (4334)
Occurrence Characteristics of Microplastics in Baiyangdian Lake Water and Sediments	CHENG Xin-yu, YANG Li-hu, SONG Xian-fang (4344)
Analyzing the Pollution Sources and Mechanisms of Urban Rivers Based on Identifying the Molecular Signature of Dissolved Organic Matter	ZHU Yi, YE Jian-feng, SUN Xiao-nan, <i>et al.</i> (4353)
Occurrence and Fate of Steroid Hormones in Sewage Treatment Plants	LIU Yuan-yuan, FENG Hui, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (4364)
Distribution, Source, and Ecological Risk Assessment of Persistent Organic Pollutants in Surface Sediments of Boao Coastal Waters	HAO Run-bo, FU Guo-wei, SONG Yan-wei, <i>et al.</i> (4374)
Content, Distribution, Source Analysis, and Risk Assessment of PAHs in Arable Soils of Taiyuan	WU Zhang-wei, DUAN Yong-hong, LIU Li-wen, <i>et al.</i> (4387)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	GUO Zhi-juan, LIU Fei, ZHOU Ya-long, <i>et al.</i> (4397)
Pollution Characteristics and Source Analysis of Heavy Metals in Soils in Yellow River Cultural Park Based on APCS-MLR and PMF Receptor Model	DUAN Hai-jing, MA Jia-yu, PENG Chao-yue, <i>et al.</i> (4406)
Pollution Characteristics, Source Analysis, and Risk Assessment of Heavy Metals in the Surrounding Farmlands of Manganese Mining Area	YU Gao, CHEN Fen, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (4416)
Translocation, Accumulation, and Comprehensive Risk Assessment of Heavy Metals in Soil-Crop Systems in an Old Industrial City, Shizuishan, Ningxia, Northwest China	WANG Ying, DONG Ai-jun, YANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4429)
Distribution Characteristics and Risk Assessment of Tetracycline Antibiotics (TCs) in Soil-Vegetable System with Soil Fertilized with Animal Manure	DING Dan, HUANG Xiao-yi, GU Jing-yi, <i>et al.</i> (4440)
Accumulation Pathway of Cd, Pb, and Zn in Chinese Cabbage under the Condition of Exogenous Pollution Superposition in High Geological Background Area	JIAN Huai-liang, LIU Hong-yan, MEI Xue, <i>et al.</i> (4448)
Effects of Combined Pollution of Microplastics and Lead on Maize Seed Germination and Growth	MA Gui, LIAO Cai-yun, ZHOU Yue, <i>et al.</i> (4458)
Application of Fe ₃ O ₄ /Mulberry Stem Biochar Effects on Soil Arsenic Species and Rice Arsenic Content	RUAN Lin-qiao, LIANG Mei-na, DING Yan-mei, <i>et al.</i> (4468)
Remediation Effect and Mechanism of Biochar in Combination with Nitrogen Fertilizer on Cd-contaminated Paddy Soil	ZHANG Li, LI Ru-xia, HE Yu-lei, <i>et al.</i> (4479)
Effects of Combined Application of Different Nitrogen Fertilizers and Biochar on Cadmium Uptake by Pakchoi (<i>Brassica chinensis</i> L.) in Cadmium Contaminated Soil	LI Ping, NIE Hao, LANG Man, <i>et al.</i> (4489)
Effect of Coconut Fiber Biochar and Its Nitrate Modification on Pb Passivation in Paddy Soils	HOU Zheng-wei, LI Jian-hong, LI Cai-sheng, <i>et al.</i> (4497)
Effects of Biochar Application on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Microplastic-contaminated Calcareous Soil	RAN Tai-shan, LONG Jian, LIAO Hong-kai, <i>et al.</i> (4507)
Effects of Modified Biochar-Supported Zero-Valent Iron on the Removal of Trichloroethylene and Responses of Microbial Community in Soil	LU Hai-nan, LI Peng, GUO Lin, <i>et al.</i> (4519)
Effects of Modified Distiller's Lees Biochar on Nutrients and Enzyme Activities in Purple Soil	YOU Le-lin, XIE Yong-hong, WANG Zi-fang, <i>et al.</i> (4530)
Biochar or Straw Substituting Chemical Fertilizer Increase the Risk of Phosphorus Loss in Subsurface Runoff in Sloping Farmland	LAI Jia-xin, DENG Hua, ZHU Hao-yu, <i>et al.</i> (4541)
Carbon Loss During Preparation and Aging of Sludge Livestock Manure Biochars	ZHANG Ying, ZHANG Chang-hao, ZHANG Xiu-fang, <i>et al.</i> (4554)
Effect of Chemical Fertilizer and Manure Combined with Biochar on Denitrification Potential and Denitrifying Bacterial Community in Rhizosphere Soil	XIE Jun, WANG Zi-fang, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (4565)
Soil Bacterial Community Structure and Function Prediction of Millet/Peanut Intercropping Farmland in the Lower Yellow River	LIU Zhu, NAN Zhen-wu, LIN Song-ming, <i>et al.</i> (4575)
Effects of Microbial Fertilizer on Physicochemical Properties and Bacterial Communities of Saline Soil Under Brackish Water Irrigation	LIU Yue, YANG Shu-qing, ZHANG Wan-feng, <i>et al.</i> (4585)
Remediation of Petroleum-contaminated Soil by Highly Efficient Oil-degrading Bacteria and Analysis of Its Enhancement Mechanism	YAO Zhen-xian, WANG Li-ping, LI Dan, <i>et al.</i> (4599)
Impacts of Land Use Intensification Level on Fluvio-aquic Cropland Soil Microbial Community Abundance and Necromass Accumulation in North China	LI Sheng-jun, SHENG Mei-jun, LI Gang, <i>et al.</i> (4611)
Pathway and Policy for China's Provincial Carbon Emission Peak	MIAO An-kang, YUAN Yue, WU Han, <i>et al.</i> (4623)
Carbon Offsetting Mechanism of China Province Based on Carbon Reduction Cost	ZHONG Shi-yu, ZHANG Xiao-min, WU Jia, <i>et al.</i> (4637)
Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures	LIU Xin-yu, LU Jiang, MENG Xuan, <i>et al.</i> (4647)
Multi-scenario Land Use Optimization and Carbon Storage Assessment in Northwest China	CHEN Ning, XIN Cun-lin, TANG Dao-bin, <i>et al.</i> (4655)
Analysis and Simulation of the Spatiotemporal Evolution of Habitat Quality and Carbon Storage in the Weiwei Dry Plateau Region of Shaanxi	GU Zhen-wei, LIU Jing, CHEN Yi, <i>et al.</i> (4666)
Impact of Climate Warming on Paddy Soil Organic Carbon Change in the Sichuan Basin of China	LI Ai-wen, SONG Liang-ying, RAN Min, <i>et al.</i> (4679)
Stoichiometric Imbalance of Abandoned Grassland Under Precipitation Changes Regulate Soil Respiration	WANG Jia-yi, WANG Xing, WANG Yuan-zhuo, <i>et al.</i> (4689)
Effects of Water-salt Environment on Freshwater Wetland Soil C, N, and P Ecological Stoichiometric Characteristics in the Yellow River Estuary Wetland	QIN Ji-fa, ZHANG Jia-peng, SANG Luan, <i>et al.</i> (4698)
Spatial Distribution of Soil Heavy Metals and Regional Control Strategies in China at Province Level	SHI Hang-yuan, WANG Peng, ZHENG Jia-tong, <i>et al.</i> (4706)
Comprehensive Review on Environmental Biogeochemistry of Nonylphenol and Suggestions for the Management of Emerging Contaminants	HONG Ya-jun, FENG Cheng-lian, XU Da-yong, <i>et al.</i> (4717)
Research Progress on Distribution Characteristics and Formation Mechanisms of Microplastics in the Environment	ZHANG Long-fei, LIU Yu-huan, RUAN Rong-sheng, <i>et al.</i> (4728)
Review on the Long-term and Short-term Effects of Biochar Addition on Soil Greenhouse Gas Emissions	ZHOU Yong-chun, WU Liu-lin, LI Dan-ying, <i>et al.</i> (4742)
Iron-based Bimetallic Catalysts for Persulfate Activation to Remove Antibiotics in Water: A Review	WEI Jian, ZHANG Xin-yi, GUO Zhuang, <i>et al.</i> (4751)
Analysis of the Environmental Risk of Livestock Manure Pollution and Resource Treatment Technology	AN Jing, DING Zi-ming, GAO Cheng-cheng, <i>et al.</i> (4764)