

目次

2013~2020年天津市PM_{2.5}-O₃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O₃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O₃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O₃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O₃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, 蔡梓桐, 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, 朱丹尼, 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, 周殿竹, 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, 周宇斌, 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 朱奕, 叶建锋, 孙晓楠, 胡曙煜, 陈勋, 唐建飞, 陈浩 (4353)

甾体激素在污水处理厂中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, 杨建锋, 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Fe₃O₄/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, 何玉玺, 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, 王莹燕, 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, 张万锋, 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, 郭娜, 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, 刘铮, 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, 户新冉, 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)

降水改变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, 桑奕, 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, 王允圃, 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分析 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)

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^{1,2}, 卢江³, 孟璇¹, 刘铮², 宋鹏¹, 李季¹, 田光明^{1*}

(1. 中国农业大学有机循环研究院(苏州), 苏州 215100; 2. 辽宁省农业科学院农村经济研究所, 沈阳 110161; 3. 安徽农业大学马克思主义学院, 合肥 230036)

摘要: 收集整理 1992 年 1 月至 2022 年 5 月长江经济带地区长期定位施肥试验文献, 提取并整合了其中农田土壤有机碳的资料. 采用归一化处理和分析方法, 研究长期不同施肥措施下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的总体变化, 并比较 3 种耕作模式及不同土壤类型下土壤有机碳含量的变化差异, 判断分析试验持续年限长短对土壤有机碳动态的影响. 结果表明, 在长期不同施肥措施下, 我国长江经济带地区农田土壤有机碳含量整体呈上升趋势, 无机氮肥磷肥配施(NP)、无机氮磷钾肥配施(NPK)、单独施用有机肥(O)和有机无机肥配施(NPKO)处理均能增加农田土壤的有机碳含量, 其中以 NPKO 处理为最大, 而单独施用无机氮肥(N)则会降低土壤有机碳含量. 旱田、水田和水旱轮作农田土壤有机碳含量变化速率分别为 0.22、0.24 和 0.16 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 3 种耕作模式在土壤固碳效果方面并无显著性差异. O 和 NPKO 处理下所带来的有机碳相对快速增加效应在旱田土壤中的持续年限最高不超过 28 a, 而在水田及水旱轮作土壤中依然可以持续到 28 a 以上. 在不同的土壤类型下, 土壤有机碳含量的变化速率存在着一定的差异, 平均有机碳变化速率: 红壤为 0.25 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 棕壤为 0.14 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 潮土为 0.19 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 水稻土为 0.15 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$. 土壤有机碳含量变化速率基本保持 NPKO > O > NPK > NP > N 的趋势, 其中 NPKO 施肥处理均显著高于单施化肥(N、NP 和 NPK)处理. 单施氮肥(N)处理对于红壤及水稻土有机碳含量均表现出降低作用. 从农田土壤固碳角度考虑, 有机无机肥配施为该地区较为适宜的施肥方式.

关键词: 长江经济带; 施肥措施; 农田土壤; 有机碳; 长期定位

中图分类号: X144 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2023)08-4647-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.202204315

Analysis on Change in Soil Organic Carbon Content of Farmland in Yangtze River Economic Belt Under Different Fertilizing Measures

LIU Xin-yu^{1,2}, LU Jiang³, MENG Xuan¹, LIU Zheng², SONG Peng¹, LI Ji¹, TIAN Guang-ming^{1*}

(1. Organic Recycling Research Institute (Suzhou) of China Agricultural University, Suzhou 215100, China; 2. Institute of Rural Economy, Liaoning Academy of Agricultural Sciences, Shenyang 110161, China; 3. College of Marxism, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

Abstract: The literature from a long-term fertilization experiment in the Yangtze River Economic Belt from January 1992 to May 2022 was collected, and the data of farmland soil organic carbon were extracted and integrated. Using the normalization treatment and the analysis method of relative annual variation, the overall change in soil organic carbon content in farmland in the Yangtze River Economic Belt under different long-term fertilization measures was studied, and the change differences of soil organic carbon content under three tillage modes were compared so as to judge and analyze the influence of the duration of the experiment on soil organic carbon dynamics. The results showed that under different long-term fertilization measures, the organic carbon content of farmland soil in the Yangtze River Economic Belt in China showed an overall upward trend. The NP, NPK, O, and NPKO treatments all increased the organic carbon content of agricultural soils, with that of the NPKO treatment being the largest. The sole application of inorganic nitrogen fertilizer reduced the organic carbon content of the soil. The rates of change in soil organic carbon content were 0.22 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, 0.24 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$, and 0.16 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ for dryland, paddy, and water-dry rotation farmland, respectively. Additionally, the relatively rapid increase effect of organic carbon brought by the O and NPKO treatments could last for no more than 28 years in dryland soil but could still last for more than 28 years in paddy field and paddy-upland rotation soil. There was some variation in the rate of change of soil organic carbon content between soil types. The average rate of change of organic carbon was 0.25 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ for red soils, 0.14 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ for brown soils, 0.19 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ for tidal soils, and 0.15 $\text{g}\cdot(\text{kg}\cdot\text{a})^{-1}$ for rice soils. The trend of NPKO > O > NPK > NP > N was basically maintained for the rate of change in soil organic carbon content. The NPKO treatments were all significantly higher than the chemical fertilizer (N, NP, and NPK) treatments alone. The N treatment showed a reduction in organic carbon content in both red soil and rice soils. Considering the carbon fixation of farmland soil, the combined application of organic and inorganic fertilizers is a more suitable fertilization method in this area.

Key words: Yangtze River Economic Belt; fertilizing measure; farmland soil; organic carbon; long-term positioning

土壤有机碳对于大气中的 CO_2 浓度具有显著的影响, 而农田土壤固碳向来被认为是降低 CO_2 排放的重要途径之一^[1~5]. 根据联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)的统计, 科学良好的农业措施可贡献(以 CO_2 当量计)至少 $5.50 \times 10^{15} \text{t}$ 的减排潜力, 其中高达 89% 的减排潜力可通过土壤固碳进行

收稿日期: 2022-04-27; 修订日期: 2022-10-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFD1100601-03); 江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BM2022006); 辽宁省社会科学规划基金项目(L21CJY016); 辽宁省科学事业公益研究基金(软科学研究)计划项目(2022JH4/10100050); 苏州市农业科技创新项目(SNG2021012)

作者简介: 刘欣宇(1995~), 男, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为植物营养与土壤固碳, E-mail: liuxinyu@oricau.cn

* 通信作者, E-mail: gmtian@zju.edu.cn

实现^[6]. 自 2015 年我国开始推行化肥减施政策以来,各地开始大力推广有机肥的施用并优化农业管理措施,使得农田土壤呈现明显的碳增汇趋势. 有学者就农业管理措施对农田土壤有机碳含量的影响开展了大量的研究^[7-13],而研究结果最终认为科学合理地施用化肥及有机肥均对农田土壤有机碳含量的提升起到明显的促进作用^[14].

长江经济带是我国农业发展的战略性区域,从耕地资源方面来看,2019 年长江经济带主要农作物种植面积为 $6.54 \times 10^7 \text{ hm}^2$,占全国总量的 39.89%. 可见长江经济带地区广大的农田面积蕴藏着巨大的固碳减排潜力,但是当前关于农业管理措施对这一战略区域的农田土壤有机碳动态总体影响的研究尚不完善,无法评估影响该地区农田有机碳含量的最大施肥因子和最大影响幅度,因而还未能充分地评估在不同农业管理措施下的土壤固碳潜力. 然而,通过对长江经济带地区部分省市的相关研究结果,仍能简单地了解到一些不同种植模式及施肥措施对该地区农田土壤有机碳含量的影响. 例如在江苏地区,已有学者证明长期施用有机肥可以提高土壤的有机碳矿化速率并提升土壤总有机碳含量^[15]. 在浙江地区,水稻土条件下的双季稻种植模式能够带来更佳的土壤固碳效果^[16]. 但关于长江经济带地区总体上的相关研究仍然缺乏可靠的相关资料.

为评价不同施肥措施对长江经济带地区农田土壤有机碳动态分布的总体影响,本研究收集了分布于长江经济带地区不同省(市)的 73 个代表性长期定位施肥试验点的资料. 采用归一化处理 and 变化速率的分析方法,研究长期不同施肥下长江经济带地区农田土壤有机碳含量的总体变化,并比较旱田、水田和水旱轮作等 3 种耕作模式下土壤有机碳含量的变化差异,判断分析试验持续年限长短对土壤有机碳动态的影响,以期对长江经济带地区农田固碳减排及可持续发展提供施肥管理依据.

1 材料与方法

1.1 研究区域

研究区域为长江经济带,包括上海、江苏、浙江、安徽、江西、湖北、湖南、重庆、四川、云南和贵州等 11 个省(市),面积约 $2.05 \times 10^6 \text{ km}^2$,占全国的 21.4%,人口和生产总值均超过全国的 40%,耕地总面积约为 $1.72 \times 10^8 \text{ hm}^2$,是生态文明建设的先行示范带.

1.2 数据来源

本研究收集整理了 1992 年 1 月~2022 年 5 月

间有关我国长江经济带地区长期定位施肥试验的研究论文共 135 篇,提取其中试验地点、土壤类型、耕作模式、监测时间、施肥处理以及有机碳(质)含量数据. 采集数据的筛选标准为:①施肥措施为单独施用无机氮肥(N)、无机氮肥磷肥配施(NP)、无机氮磷钾肥配施(NPK)、单独施用有机肥(O)和有机无机肥配施(NPKO);②试验为周期超过 3 a 的长期定位试验,文中包含试验起止年份;③测试土样取自耕层表面(0~20 cm);④土壤试验始末有机质或有机碳含量确定;⑤试验以不施为对照. 经筛选,最终获得符合标准的文献 54 篇,共涉及 73 个试验地点,包括旱田 21 个,水田 20 个,水旱轮作 32 个,涵盖 4 种土壤类型,共计处理样本总数 270 个. 数据来自文献中的正文、图和表,图中数据采用 Get Data 软件进行提取. 其中,土壤有机质含量和有机碳含量之间的转换系数为 0.58. 将收集到的 5 种类型施肥处理中涉及的肥料施用量按照有关标准折算为 N、 P_2O_5 和 K_2O 的年养分施用量.

1.3 不同施肥措施下农田土壤有机碳含量的变化

1.3.1 不同处理下农田土壤有机碳平均年含量的变化

分别计算试验周期内不施肥处理和各施肥处理的有机碳平均年变化量:

$$AC = (\text{SOC}_t - \text{SOC}_0) / t$$

式中,AC 为农田土壤有机碳含量的年变化量; t 为试验观测时间的始末差值; SOC_0 和 SOC_t 分别为试验点的始末有机碳含量($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$).

1.3.2 不同施肥措施下农田土壤有机碳变化速率

为研究各施肥处理对农田土壤有机碳含量变化的实际影响,应将各施肥处理引起的有机碳含量的变化扣除不施肥处理下土壤有机碳含量的变化,进而获得农田土壤有机碳的变化速率:

$$\text{RAC} = \frac{(\text{SOC}_t - \text{SOC}_0)_{\text{TR}} - (\text{SOC}_t - \text{SOC}_0)_{\text{CK}}}{t}$$

式中,RAC 为农田土壤有机碳含量的变化速率;TR 为施肥处理,CK 为不施肥处理.

1.4 数据处理

考虑到不同耕作方式下农田土壤固碳效果可能有所不同,本研究按旱田、水田和水旱轮作这 3 种耕作方式对其数据进行分别统计并比较分析,利用 DPS 18.1 软件进行数据处理并进行差异显著性检验($P < 0.05$).

2 结果与分析

2.1 长江经济带地区农田土壤有机碳变化总体分布

在本研究共统计的 197 组试验处理样本中(未

包含不施肥处理), 有 139 组样本的有机碳含量随着试验的持续而呈现出增加的现象, 占比约为 70.56%, 其余 60 组样本呈现降低态势, 占比约为 29.44%。总体来看, 长江经济带地区农田土壤有机碳的变化速率(未包含不施肥处理)介于 $-0.36 \sim 0.38 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 平均变化速率为 $0.25 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 。其中旱田土壤有机碳的变化速率介于 $-0.10 \sim 0.27 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 平均变化速率为 0.22

$\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$; 水田土壤有机碳的变化速率介于 $-0.15 \sim 0.41 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 平均变化速率为 $0.24 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$; 水旱轮作农田土壤有机碳变化速率介于 $-0.67 \sim 0.48 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 平均变化速率为 $0.16 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ (表 1)。可以看出, 总体而言 3 种耕作模式下的农田土壤有机碳含量均处于上升态势, 水田土壤有机碳的变化速率高于其余两种耕作模式, 但三者之间并未达到显著性差异。

表 1 不同耕作模式土壤有机碳含量变化速率动态分布¹⁾

Table 1 Dynamic distribution of soil organic carbon under different tillage patterns

耕作模式	有机碳动态	样本数	相对变化 / $\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$	总体变化 / $\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$	试验持续年限/a	平均年限/a
旱田	增加	59	0.27 ± 0.12	$0.22 \pm 0.08\text{a}$	21.31 ± 12.76	21.57 ± 12.19
	减少	9	-0.10 ± 0.06		22.23 ± 10.87	
水田	增加	40	0.41 ± 0.11	$0.24 \pm 0.07\text{a}$	16.52 ± 0.29	15.41 ± 8.84
	减少	10	-0.15 ± 0.08		13.62 ± 9.20	
水旱轮作	增加	64	0.48 ± 0.19	$0.16 \pm 0.09\text{a}$	10.62 ± 6.12	10.79 ± 6.36
	减少	15	-0.67 ± 0.12		11.50 ± 7.55	
合计	增加	163	0.38 ± 0.16	0.25 ± 0.11	16.27 ± 10.96	16.50 ± 10.88
	减少	34	-0.36 ± 0.09		17.11 ± 10.76	

1) 同一列相同小写字母表示无显著性差异 ($P > 0.05$)

2.2 不同施肥措施下农田土壤有机碳含量变化

表 2 显示了不同施肥措施下农田土壤有机碳含量的变化特征, 不同施肥措施均对农田土壤有机碳含量产生提升作用。对于施用有机肥的农田(O 和 NPKO 处理), 旱田土壤平均有机碳变化速率达到了 $0.36 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.37 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 水田达到了 $0.31 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.45 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 水旱轮作土壤达到了 $0.40 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 和 $0.62 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 。对于施用无机肥料的农田, 旱田土壤有机碳的变化速率介于 $0.01 \sim 0.13 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 水田介于 $-0.03 \sim 0.16 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 水旱轮作介于 $-0.29 \sim 0.19 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$ 。3 种耕作模式下田间土壤不同施肥措施下有机碳的变化速率的变化特征均为: NPKO > O > NPK > NP > N, 综合 3 种耕作模式下的农田土壤

有机碳总量变化速率同样表现为: NPKO > O > NPK > NP > N。由此可见, 有机施肥和有机无机配施处理对于农田土壤有机碳含量的提高幅度明显高于单独施用无机肥。分析其原因在于, 有机肥处理可以直接增加对农田土壤有机物质的输入, 而 NPK 处理则通过相对于 N 及 NP 处理更加均衡的养分输入使作物的生长量达到更好的状态, 进而间接使土壤中的有机物质含量增加。通过将各试验样本中涉及的肥料施用量按照有关标准折算为 N、 P_2O_5 和 K_2O 的年养分施用量, 可以看出 3 种耕作模式在不同施肥措施情况下的年养分施用量均呈现出 NPKO > O > NPK > NP > N 的特点, 这与 3 种耕作模式在不同施肥措施情况下的农田土壤有机碳含量变化速率相一致。

表 2 不同施肥措施下土壤有机碳含量变化速率及年养分施用量¹⁾

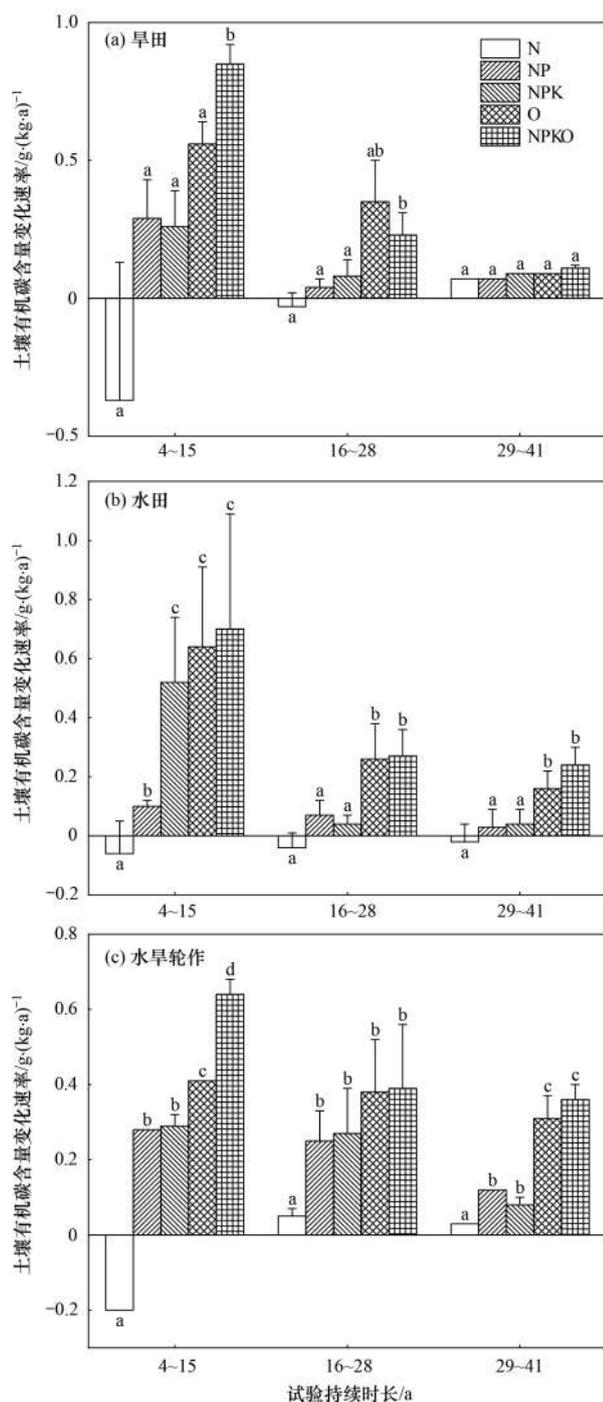
Table 2 RAC and annual nutrient application under different fertilization practices

耕作模式		施肥措施				
		N	NP	NPK	O	NPKO
旱田	样本数	10	8	16	18	16
	变化速率	$0.01 \pm 0.05\text{a}$	$0.02 \pm 0.03\text{a}$	$0.13 \pm 0.02\text{b}$	$0.36 \pm 0.04\text{b}$	$0.37 \pm 0.07\text{b}$
	年养分施用量	219.18 ± 104.20	349.56 ± 131.89	458.87 ± 242.71	692.59 ± 101.40	463.57 ± 235.14
水田	样本数	3	4	17	9	19
	变化速率	$-0.03 \pm 0.05\text{c}$	$0.06 \pm 0.05\text{c}$	$0.16 \pm 0.04\text{bc}$	$0.31 \pm 0.08\text{ab}$	$0.45 \pm 0.10\text{a}$
	年养分施用量	189.00 ± 81.88	242.67 ± 98.16	285.10 ± 101.78	468.51 ± 187.78	715.94 ± 273.31
水旱轮作	样本数	13	6	24	11	23
	变化速率	$-0.29 \pm 0.14\text{d}$	$0.13 \pm 0.02\text{c}$	$0.19 \pm 0.07\text{bc}$	$0.40 \pm 0.12\text{ab}$	$0.62 \pm 0.20\text{a}$
	年养分施用量	216.60 ± 123.76	337.10 ± 176.04	372.89 ± 154.77	369.32 ± 381.22	458.66 ± 117.97
合计	样本数	27	18	57	38	56
	变化速率	$-0.15 \pm 0.08\text{c}$	$0.07 \pm 0.06\text{b}$	$0.16 \pm 0.05\text{b}$	$0.36 \pm 0.06\text{a}$	$0.49 \pm 0.06\text{a}$
	年养分施用量	211.38 ± 99.99	335.15 ± 137.69	359.71 ± 186.32	559.93 ± 267.30	568.88 ± 320.09

1) 变化速率的单位为 $\text{g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 年养分施用量的单位为 $\text{kg} \cdot (\text{hm}^2 \cdot \text{a})^{-1}$; 同一行不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$)

2.3 农田土壤有机碳含量动态随试验持续时间的变化

本研究中涉及的试验周期为 4~41 a, 将其分为 3 个不同的持续时间的组合, 分别计算 3 种耕作模式在相应试验周期下的农田土壤有机碳含量变化速率(图 1). 可见随着试验的持续, 3 种耕作模式下的农田土壤有机碳含量均表现出上升的趋势, 而变化



不同小写字母表示显著性差异 ($P < 0.05$), 下同
图 1 不同施肥措施下土壤有机碳含量变化速率随试验周期的变化

Fig. 1 Variation in RAC with experimental period under different fertilization measures

速率呈现逐步减小的特点. 综合来看, 相对于旱田 [图 1(a)] 和水旱轮作 [图 1(c)], 水田 [图 1(b)] 更能增加土壤中的有机碳含量. 随着试验时间的持续, 不同施肥措施下农田土壤有机碳含量变化速率(绝对值)均呈现降低的趋势, 各施肥措施之间变化速率的差异则明显变小. 在试验周期为 28 a 内, 旱田不同施肥措施之间的有机碳含量变化速率(绝对值)的差异幅度较为明显. 对于水田和水旱轮作土壤, 不同施肥措施的土壤固碳效果在试验持续 28 a 以上依然存在较为显著的差异.

2.4 不同施肥措施下农田土壤类型对有机碳含量变化的影响

将试验信息中涉及的土壤类型进行分类, 共分为红壤、棕壤、潮土和水稻土这 4 种类型, 并根据不同施肥措施下土壤有机碳含量变化速率进行分别统计, 共获得红壤数据 46 组, 棕壤数据 9 组, 潮土数据 40 组和水稻土数据 104 组, 处理结果见图 2. 可见在不同的土壤类型下, 土壤有机碳含量的变化速率存在着一定的差异, 红壤平均有机碳变化速率为 $0.25 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 棕壤为 $0.14 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 潮土为 $0.19 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$, 水稻土为 $0.15 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$. 除棕壤数据样本不足之外, 其余 3 种土壤有机碳含量变化速率仍基本保持为 $\text{NPKO} > \text{O} > \text{NPK} > \text{NP} > \text{N}$ 的趋势, 其中 NPKO 施肥处理均显著高于单施化肥 (N、NP 和 NPK) 处理. 单施氮肥 (N) 处理对于红壤和水稻土有机碳含量均表现出降低作用.

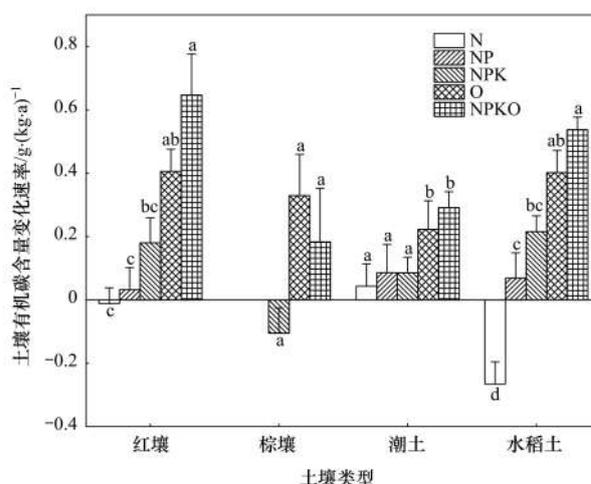


图 2 不同施肥措施下农田土壤类型对有机碳含量变化的影响
Fig. 2 Influence of farmland soil type on changes in organic carbon content under different fertilization practices

3 讨论

3.1 不同耕作模式对土壤有机碳含量变化的影响

耕作模式的不同导致了农田土壤在农业生产过程中的自然环境与作物种类均会产生差异, 而这些差异也将直接或间接地影响土壤有机碳含量. 本研

究结果表明,在长江经济带地区 3 种耕作模式下的农田土壤有机碳含量均处于上升态势,其中水田土壤有机碳的变化速率高于旱田和水旱轮作耕作模式,三者之间并未达到显著性差异,这可能是由于本研究中 3 种耕作模式的试验持续时间差异较大,其中旱田平均试验持续时间为 21.57 a,水田为 15.41 a,水旱轮作为 10.79 a. 而韩冰等^[17]的早期研究结果也同样认为水田相对于旱田具有更大的固碳能力.

3.2 不同施肥措施对土壤有机碳含量变化的影响

本研究结果表明,长江经济带地区不同施肥措施下(N、NP、NPK、O 和 NPKO)农田土壤有机碳含量变化速率平均为 $0.25 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$,说明相对于不施肥,施肥有助于农田土壤有机碳的积累. 这项结果接近于朱利群等^[7]对长江下游稻麦轮作农田的研究结果,高于王成己等^[18]关于我国农田表土有机碳含量的研究结果. 对于二者之间的差异,其原因可能在于前者研究范围为全国地区,而本文则针对整个长江经济带地区的旱田、水田及水旱轮作农田进行了研究. 本研究中,NPKO 施肥处理下,长江经济带农田土壤有机碳含量的变化速率为 $0.49 \text{ g} \cdot (\text{kg} \cdot \text{a})^{-1}$,这与朱利群等^[7]对我国南方地区红壤有机碳含量的研究结果接近. 当农田长期采取无机肥料(N、NP 和 NPK)的施肥措施下,NPK 施肥处理下的农田土壤有机碳含量变化速率通常高于 N 和 NP 处理,这一点在本研究中的旱田土壤中表现得尤为明显. 发生这种现象的原因可能在于 NPK 处理下的农作物获得了相对于 N 和 NP 处理更加充足的养分,并因此而具备了更加发达的根系,增加了残茬量与根系对土壤的输入^[19~25],同时不可忽视的是,单一施用氮肥有可能刺激土壤呼吸进而减少土壤中的有机碳含量^[26~31]. O 和 NPKO 处理均能够显著增加土壤中有有机碳的积累,在旱田、水田和水旱轮作农田中,NPKO 处理下的土壤有机碳含量变化速率均高于 O 处理,分析其原因在于单独施用有机肥虽然能够对农田土壤产生直接有机物料投入的效果,但其肥效释放较为缓慢,并且无机肥与有机肥配施更有利于土壤团聚体活性有机碳含量的提升^[32~38]. 而正如前文所述,有机肥的施用(O 和 NPKO)可以将有机物料直接投入至土壤,这也使得本研究中 O 和 NPKO 处理下的农田土壤有机碳含量变化速率高于单独施用无机肥料(N、NP 和 NPK).

3.3 不同试验持续时间对土壤有机碳含量变化的影响

农田土壤对于有机碳的固碳能力是有限的,当土壤中的有机碳达到一定含量时会形成一种平衡状

态,在达到平衡状态的过程中,土壤有机碳含量会出现先迅速上升后缓慢增加的情况^[39~45]. 本研究中旱田和水旱轮作农田土壤有机碳含量变化速率随试验持续时间变化的结果印证了这一理论,水田土壤有机碳含量变化速率则在 3~41 a 的试验持续时间内呈现不断快速上升的反常情况,经过笔者对水田相关数据的核实,发现在本研究所选取的 3 个研究时间区间中,29~41 a 中的水田数据样本明显低于前两个时间区间,这可能是导致水田土壤有机碳含量变化速率随试验持续时间增加而不断上升的原因. 同时,随着试验周期的不断增长,旱田各施肥措施之间的土壤有机碳含量变化速率的差异明显变小,而对于水田和水旱轮作土壤,不同施肥措施的土壤固碳效果在试验持续 28 a 以上依然存在较为显著的差异. 这说明 O 和 NPKO 处理下所带来的有机碳相对快速增加效应在旱田土壤中的持续年限最高不超过 28 a,而在水田和水旱轮作土壤中依然可以持续到 28 a 以上.

3.4 不同施肥措施下农田土壤类型对有机碳含量变化的影响

不同的土壤类型意味着不同的理化性质,其对于作物的选择与生长均具有重要的影响,进而影响土壤的固碳效果. 本研究结果表明,红壤的固碳效果最佳. 在施肥措施方面,各个类型的土壤固碳效果基本保持为:NPKO > O > NPK > NP > N,有机肥与化肥的配合施用对于红壤、潮土和水稻土的固碳效果均显著高于单独施用化肥.

4 结论

综上所述,在长期不同施肥措施下,我国长江经济带地区农田土壤有机碳含量整体呈上升趋势. 与 N 处理相比,NP、NPK、O 和 NPKO 处理均能实现农田土壤有机碳含量的提升,其中尤以 NPKO 处理的效果最为明显. 旱田、水田和水旱轮作这 3 种耕作模式对农田土壤有机碳含量的变化影响并不显著. O 和 NPKO 处理下所带来的有机碳相对快速增加效应在旱田土壤中的持续年限最高不超过 28 a,而在水田和水旱轮作土壤中依然可以持续到 28 a 以上. 对长江经济带地区来说,良好的施肥管理有助于充分挖掘农田土壤的固碳潜力. 从农田土壤固碳角度考虑,有机无机肥配施为该地区较为适宜的施肥方式. 在长期不同施肥措施下,我国长江经济带地区农田土壤有机碳含量整体呈上升趋势,无机氮肥磷肥配施(NP)、无机氮磷钾肥配施(NPK)、单独施用有机肥(O)和有机无机肥配施(NPKO)处理均能增加农田土壤的有机碳含量,其中以 NPKO 处理为最大,

而单独施用无机氮肥(N)则会降低土壤有机碳含量.在不同的土壤类型下,土壤有机碳含量的变化速率存在着一定的差异,表现为:红壤>潮土>水稻土>棕壤.从农田土壤固碳角度考虑,有机无机肥配施为该地区较为适宜的施肥方式.

参考文献:

- [1] 王宇飞, 王语宽. 重视农业土壤固碳, 助力“双碳”目标实现——积极应对农业土壤“千分之四”计划[J]. 环境保护, 2021, **49**(S2): 61-64.
Wang Y F, Wang Y K. Attention to agricultural soil carbon sequestration and help to achieve the targets of carbon peak and carbon neutrality——positively respond to the “the 4 per 1000 initiative for agricultural soils”[J]. Environmental Protection, 2021, **49**(S2): 61-64.
- [2] Huang X L, Jia Z X, Jiao X Y, *et al.* Long-term manure applications to increase carbon sequestration and macroaggregate-stabilized carbon[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2022, **174**, doi: 10.1016/j.soilbio.2022.108827.
- [3] Liu M, Han G L, Zhang Q. Soil organic carbon sequestration following a secondary succession of agricultural abandonment in the karst region of southwest China[J]. Environmental Earth Sciences, 2022, **81**(19), doi: 10.1007/s12665-022-10606-3.
- [4] 韩明会, 李保国, 张丹, 等. 再生农业——基于土地保护性利用的可持续农业[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(5): 1003-1016.
Han M H, Li B G, Zhang D, *et al.* Regenerative agriculture-sustainable agriculture based on the conservational land use[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(5): 1003-1016.
- [5] 万小楠, 赵珂悦, 吴雄伟, 等. 秸秆还田对冬小麦-夏玉米农田土壤固碳、氧化亚氮排放和全球增温潜势的影响[J]. 环境科学, 2022, **43**(1): 569-576.
Wan X N, Zhao K Y, Wu X W, *et al.* Effects of stalk incorporation on soil carbon sequestration, nitrous oxide emissions, and global warming potential of a winter wheat-summer maize field in Guanzhong plain[J]. Environmental Science, 2022, **43**(1): 569-576.
- [6] 任凤玲. 不同施肥下我国典型农田土壤有机碳固定特征及驱动因素[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
Ren F L. Soil carbon sequestration and its driving factors under different fertilization in arable land of China[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [7] 朱利群, 王春杰, 陈利根, 等. 长江下游稻麦轮作农田不同施肥措施的固碳潜力分析[J]. 浙江农业学报, 2016, **28**(7): 1249-1261.
Zhu L Q, Wang C J, Chen L G, *et al.* Analysis into soil organic carbon sequestration potential of different fertilization modes under rice-wheat rotation in lower Yangtze River[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2016, **28**(7): 1249-1261.
- [8] 董林林, 查金芳, 沈明星, 等. 长期秸秆还田对稻麦轮作区土壤有机碳组分构成的影响[J]. 中国农业科技导报, 2022, **24**(3): 166-175.
Dong L L, Zha J F, Shen M X, *et al.* Effect of long-term straw returning on soil organic carbon fractions composition in rice-wheat rotation ecosystem[J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2022, **24**(3): 166-175.
- [9] 吴海梅, 周彦莉, 郑浩飞, 等. 秸秆带状覆盖对土壤有机碳及其活性组分的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2022, **40**(1): 61-69.
Wu H M, Zhou Y L, Zheng H F, *et al.* Effects of straw strip mulching on soil organic carbon and active carbon fractions[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2022, **40**(1): 61-69.
- [10] 董丽, 史学正, 徐胜祥, 等. 基于 Meta 分析研究不同管理措施对中国农田土壤剖面有机碳的影响[J]. 土壤, 2021, **53**(6): 1290-1298.
Dong L, Shi X Z, Xu S X, *et al.* Effects of different management measures on the organic carbon of farmland soil profile in China based on Meta-analysis[J]. Soils, 2021, **53**(6): 1290-1298.
- [11] 邢力, 张玉铭, 胡春胜, 等. 长期不同养分循环再利用途径对农田土壤养分演替规律与培肥效果的影响研究[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2022, **30**(6): 937-951.
Xing L, Zhang Y M, Hu C S, *et al.* Effects of long-term nutrient recycling pathways on soil nutrient dynamics and fertility in farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, **30**(6): 937-951.
- [12] 李桂花, 周吉祥, 张建峰, 等. 有机肥和缓控肥替代部分化肥降低双季稻田综合净温室效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, **26**(6): 1017-1024.
Li G H, Zhou J X, Zhang J F, *et al.* Decreasing net global warming potential through partial substitution of urea with manure and slow-release fertilizer in a double-rice system[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, **26**(6): 1017-1024.
- [13] 邓华, 高明, 龙翼, 等. 生物炭和秸秆还田对紫色土旱坡地土壤团聚体与有机碳的影响[J]. 环境科学, 2021, **42**(11): 5481-5490.
Deng H, Gao M, Long Y, *et al.* Effects of biochar and straw return on soil aggregate and organic carbon on purple soil dry slope land[J]. Environmental Science, 2021, **42**(11): 5481-5490.
- [14] 刘红梅, 海香, 阿克锐, 等. 不同施肥措施对华北潮土区玉米田土壤固碳细菌群落结构多样性的影响[J]. 生态环境学报, 2022, **31**(4): 715-722.
Liu H M, Hai X, An K R, *et al.* Effects of different fertilization regimes on community structure diversity of CO₂-assimilating bacteria in maize field of fluvo-aquic soil in north China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2022, **31**(4): 715-722.
- [15] 冷雪梅, 钱九盛, 张旭辉, 等. 添加外源有机物对长期不同施肥处理水稻土有机碳矿化的影响[J]. 南京农业大学学报, 2022, **45**(1): 103-112.
Leng X M, Qian J S, Zhang X H, *et al.* Effects of external organic matter input on the mineralization of organic carbon in paddy soils with long-term fertilizations[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2022, **45**(1): 103-112.
- [16] 邓勋飞, 陈晓佳, 麻万诸, 等. 杭州湾南岸滨海围垦区耕层土壤有机碳的变异特征及影响因素分析[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2015, **41**(3): 349-357.
Deng X F, Chen X J, Ma W Z, *et al.* Variability of soil organic carbon in plough layers and its impact factors in a coastal reclamation area on south coast of Hangzhou Bay[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2015, **41**(3): 349-357.
- [17] 韩冰, 王效科, 逯非, 等. 中国农田土壤生态系统固碳现状和潜力[J]. 生态学报, 2008, **28**(2): 612-619.
Han B, Wang X K, Lu F, *et al.* Soil carbon sequestration and its potential by cropland ecosystems in China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, **28**(2): 612-619.
- [18] 王成己, 潘根兴, 田有国, 等. 不同施肥下农田表土有机碳含量变化分析: 基于中国农业生态系统长期试验资料[J]. 中国科学: 生命科学, 2010, **40**(7): 650-657.
Wang C J, Pan G X, Tian Y G, *et al.* Characteristics of cropland topsoil organic carbon dynamics under different

- conservation tillage treatments based on long-term agro-ecosystem Experiments Across China's mainland [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **40**(7): 650-657.
- [19] 邵晓辉, 汤水荣, 孟磊, 等. 不同施肥措施对热带地区稻菜轮作体系土壤 CH_4 和 N_2O 排放的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(11): 5149-5158.
Shao X H, Tang S R, Meng L, *et al.* Effect of different fertilization on methane and nitrous oxide emissions from rice-vegetable rotation in tropical region, China [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(11): 5149-5158.
- [20] 石丽红, 李超, 唐海明, 等. 长期不同施肥措施对双季稻田土壤活性有机碳组分和水解酶活性的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, **32**(3): 921-930.
Shi L H, Li C, Tang H M, *et al.* Effects of long-term fertilizer management on soil labile organic carbon fractions and hydrolytic enzyme activity under a double-cropping rice system of southern China [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, **32**(3): 921-930.
- [21] 段文学, 张海燕, 解备涛, 等. 化肥和生物有机肥配施对鲜食型甘薯块根产量、品质及土壤肥力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(11): 1971-1980.
Duan W X, Zhang H Y, Xie B T, *et al.* Effects of chemical and bio-organic fertilizers on tuber yield, quality, and soil fertility of edible sweetpotato [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(11): 1971-1980.
- [22] 李燕青, 温延臣, 林治安, 等. 不同有机肥与化肥配施对作物产量及农田氮肥气态损失的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2019, **25**(11): 1835-1846.
Li Y Q, Wen Y C, Lin Z A, *et al.* Effect of different manures combined with chemical fertilizer on yields of crops and gaseous N loss in farmland [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2019, **25**(11): 1835-1846.
- [23] 刘欣宇, 田培聪, 卢江, 等. 餐厨废弃物作堆肥在水稻生产中的应用及对土壤环境的影响[J]. *中国稻米*, 2022, **28**(3): 58-61, 65.
Liu X Y, Tian P C, Lu J, *et al.* Application of kitchen waste as compost in rice production and its effects on paddy soil [J]. *China Rice*, 2022, **28**(3): 58-61, 65.
- [24] 刘峰, 王云秋, 张响, 等. 长期秸秆还田对水稻根系碳矿化与激发效应的的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(8): 4372-4378.
Liu F, Wang Y Q, Zhang Y, *et al.* Effect of long-term straw returning on the mineralization and priming effect of rice root-carbon [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(8): 4372-4378.
- [25] 杨文娜, 余添, 罗东海, 等. 化肥和有机肥配施生物炭对土壤磷酸酶活性和微生物群落的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 540-549.
Yang W N, Yu L, Luo D H, *et al.* Effect of combined application of biochar with chemical fertilizer and organic fertilizer on soil phosphatase activity and microbial community [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 540-549.
- [26] 宋凯悦, 尹云锋, 马亚培, 等. 氮沉降背景下生物炭施用对土壤有机碳组分的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, **36**(2): 247-254.
Song K Y, Yin Y F, Ma Y P, *et al.* Effects of biochar amendment on soil organic carbon fractions under simulated nitrogen deposition [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, **36**(2): 247-254.
- [27] 胡文沛, 张闯, 胡春胜, 等. 长期增温和施氮对华北平原农田土壤呼吸及其温度敏感性的影响[J]. *中国生态农业学报* (中英文), 2022, **30**(5): 761-768.
Hu W P, Zhang C, Hu C S, *et al.* Effects of long-term warming and nitrogen fertilization on soil respiration and temperature sensitivity in the North China Plain [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, **30**(5): 761-768.
- [28] 胡洋, 丛孟菲, 马雯琪, 等. 化肥减施对冬小麦土壤呼吸的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (2): 1-8.
Hu Y, Cong M F, Ma W Q, *et al.* Effect of fertilizer reduction on soil respiration of winter wheat [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, (2): 1-8.
- [29] 周永杰, 谢军红, 李玲玲, 等. 长期少免耕与氮肥减量对全膜双垄沟播玉米产量及碳排放的调控作用[J]. *中国农业科学*, 2021, **54**(23): 5054-5067.
Zhou Y J, Xie J H, Li L L, *et al.* Effects of long-term reduce/zero tillage and nitrogen fertilizer reducing on maize yield and soil carbon emission under fully plastic mulched ridge-furrow planting system [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, **54**(23): 5054-5067.
- [30] 商雨晴, 解梦怡, 王俊, 等. 不同覆盖措施下旱作玉米田土壤呼吸对氮添加的响应[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2020, **50**(5): 711-719.
Shang Y Q, Xie M Y, Wang J, *et al.* Response of soil respiration to nitrogen addition under different mulching measures in a dryland corn field [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2020, **50**(5): 711-719.
- [31] 苏梓锐, 曾发旭, 郑成洋. 氮添加对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳及土壤呼吸的影响[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2022, **58**(3): 517-525.
Su Z R, Zeng F X, Zheng C Y. Effects of nitrogen addition on soil organic carbon and soil respiration in subtropical evergreen broad-leaved forest [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2022, **58**(3): 517-525.
- [32] 王树会, 陶雯, 梁硕, 等. 长期施用有机肥情景下华北平原旱地土壤固碳及 N_2O 排放的空间格局[J]. *中国农业科学*, 2022, **55**(6): 1159-1171.
Wang S H, Tao W, Liang S, *et al.* The spatial characteristics of soil organic carbon sequestration and N_2O emission with long-term manure fertilization scenarios from dry land in north China plain [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, **55**(6): 1159-1171.
- [33] 林仕芳, 王小利, 段建军, 等. 有机肥替代化肥对旱地黄壤有机碳矿化及活性有机碳的影响[J]. *环境科学*, 2022, **43**(4): 2219-2225.
Lin S F, Wang X L, Duan J J, *et al.* Effects of organic fertilizer replacing chemical fertilizer on organic carbon mineralization and active organic carbon in dryland yellow soil [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(4): 2219-2225.
- [34] Ju J, Gu Q, Zhou H W, *et al.* Effects of organic fertilizer combined with chemical fertilizer on nutrients, enzyme activities, and rice yield in reclaimed soil [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2022, **53**(22): 3060-3071.
- [35] 万连杰, 何满, 李俊杰, 等. 有机肥替代部分化肥对柑桔生长、品质及土壤特性的影响[J]. *中国农业科学*, 2022, **55**(15): 2988-3001.
Wan L J, He M, Li J J, *et al.* Effects of partial substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on ponkan growth and quality as well as soil properties [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2022, **55**(15): 2988-3001.
- [36] 刘寒双, 崔纪菡, 刘猛, 等. 有机肥替代部分化肥对谷子产量、土壤养分及酶活性的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (7): 71-81.
Liu H S, Cui J H, Liu M, *et al.* Effects of replacing part of

- chemical fertilizer with organic fertilizer on Foxtail Millet yield, soil nutrients and enzyme activities [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (7): 71-81.
- [37] 谢丽华, 李玲玲, 谢军红, 等. 有机肥替代化肥对陇中旱区玉米生长及农田碳排放的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, **28**(6): 1029-1038.
- Xie L H, Li L L, Xie J H, *et al.* Effects of substitution of chemical fertilizer by organic fertilizer on maize growth and field carbon emission in dry farming area of Longzhong, Gansu Province[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, **28**(6): 1029-1038.
- [38] 息伟峰, 徐新朋, 赵士诚, 等. 长期施肥下三种旱作土壤有机碳含量及其矿化势比较研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(12): 2094-2104.
- Xi W F, Xu X P, Zhao S C, *et al.* Comparison of organic carbon content and its mineralization potential in three dryland soils under long-term fertilization[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(12): 2094-2104.
- [39] 沈吉成, 赵彩霞, 刘瑞娟, 等. 耕作措施对旱农区农田土壤质量与碳排放的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2022, (1): 122-130.
- Shen J C, Zhao C X, Liu R J, *et al.* Effect of tillage practices on soil quality and soil carbon emission in dryland agriculture area [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2022, (1): 122-130.
- [40] 李健铭, 李志宏, 王鹏, 等. 不同碳源对植烟土壤碳平衡的影响[J]. *中国土壤与肥料*, 2021, (1): 124-130.
- Li J M, Li Z H, Wang P, *et al.* Effects of different carbon sources on carbon balance in tobacco soil[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021, (1): 124-130.
- [41] 朱依凡, 孙兆林, 王清奎. 生物炭和氮添加对亚热带常绿阔叶林土壤有机碳分解与平衡的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, **39**(9): 2851-2859.
- Zhu Y F, Sun Z L, Wang Q K. Effects of biochar and nitrogen additions on soil organic carbon decomposition and balance in a subtropical forest [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, **39**(9): 2851-2859.
- [42] 张玉龙, 蔡旭, 张风华. 干旱区盐渍化弃耕地复垦后农田土壤呼吸及碳平衡[J]. *江苏农业科学*, 2019, **47**(9): 284-288.
- Zhang Y L, Cai X, Zhang F H. Soil respiration and carbon balance after reclamation of salinized abandoned farmland in arid areas[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, **47**(9): 284-288.
- [43] 潘红卫, 童文彬, 雷宏军, 等. 施加有机肥对农田有机质和氮素演化影响的光谱学分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2022, **42**(10): 3116-3123.
- Pan H W, Tong W B, Lei H J, *et al.* Spectral analysis of the effect of organic fertilizer application on the evolution of organic matter and nitrogen in farmland[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2022, **42**(10): 3116-3123.
- [44] 曹寒冰, 谢钧宇, 强久次仁, 等. 施肥措施对复垦土壤团聚体碳氮含量和作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, **36**(18): 135-143.
- Cao H B, Xie J Y, Qiangjiu C R, *et al.* Effects of fertilization regimes on carbon and nitrogen contents of aggregates and maize yield in reclaimed soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, **36**(18): 135-143.
- [45] 孙昭安, 张轩, 胡正江, 等. 秸秆与氮肥配比对农田土壤内外源碳释放的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(1): 459-466.
- Sun Z A, Zhang X, Hu Z J, *et al.* How different ratios of straw incorporation to nitrogen fertilization influence endogenous and exogenous carbon release from agricultural soils [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(1): 459-466.

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 Hui, <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 Fluvo-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 Weibei 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-yang, <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)