

# 目次

|                                                              |                                                                 |
|--------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|
| 基于机器学习的珠三角秋季臭氧浓度预测 .....                                     | 陈镇, 刘润, 罗征, 薛鑫, 汪瑶, 赵志军 ( 1 )                                   |
| 粤港澳大湾区大气PM <sub>2.5</sub> 浓度的遥感估算模型 .....                    | 代园园, 龚绍琦, 张存杰, 闵爱莲, 王海君 ( 8 )                                   |
| 典型输送通道城市冬季PM <sub>2.5</sub> 污染与传输变化特征 .....                  | 代武俊, 周颖, 王晓琦, 齐鹏 ( 23 )                                         |
| 郑州市夏季PM <sub>2.5</sub> 中二次无机组分污染特征及其影响因素 .....               | 和兵, 杨洁茹, 徐艺斐, 袁明浩, 翟诗婷, 赵长民, 王申博, 张瑞芹 ( 36 )                    |
| 重庆典型城区冬季碳质气溶胶的污染特征及来源解析 .....                                | 彭超, 李振亮, 向英, 王晓宸, 汪凌韬, 张晟, 翟崇治, 陈阳, 杨复沐, 翟天宇 ( 48 )             |
| 2022年8月成渝两地臭氧污染差异影响因素分析 .....                                | 陈木兰, 李振亮, 彭超, 邓也, 宋丹林, 谭钦文 ( 61 )                               |
| 2020年“三连击”台风对我国东部地区O <sub>3</sub> 污染的影响分析 .....              | 花丛, 尤媛, 王峰, 张碧辉 ( 71 )                                          |
| 北京城区夏季VOCs初始体积分数特征及来源解析 .....                                | 张博韬, 景宽, 王琴, 安欣欣, 鹿海峰, 王陈婧, 王友峰, 刘保献 ( 81 )                     |
| 机动车减排降碳综合评价体系综述 .....                                        | 范朝阳, 佟惠, 梁晓宇, 彭剑飞 ( 93 )                                        |
| 基于LEAP模型的长三角某市碳达峰情景 .....                                    | 杨峰, 张贵驰, 孙佑, 谢放尖, 揣小伟, 孙瑞玲 ( 104 )                              |
| 广东省船舶二氧化碳排放驱动因素与减排潜力 .....                                   | 翁淑娟, 刘颖颖, 唐凤, 沙青娥, 彭勃, 王辉嘉, 陈诚, 张雪驰, 李京洁, 陈豪琪, 郑君瑜, 宋献中 ( 115 ) |
| 给水厂典型工艺碳排放特征与影响因素 .....                                      | 张翔宇, 胡建坤, 马凯, 高欣慰, 魏月华, 韩宏大, 李克勋 ( 123 )                        |
| 中国饮用水中砷的分布特征及基于伤残调整寿命年的健康风险评价 .....                          | 窦殿程, 齐媛, 肖淑敏, 苏高新, 郭宇新 ( 131 )                                  |
| 太湖水体和沉积物中有机磷酸酯的时空分布和风险评价 .....                               | 张成诺, 钟琴, 栾博文, 周涛, 顾帆, 李伟飞, 邹华 ( 140 )                           |
| 水产养殖环境中农兽药物的污染暴露水平及其风险影响评价 .....                             | 张楷文, 张海燕, 孔聪, 顾润润, 田良良, 杨光昕, 王媛, 陈凤, 沈晓盛 ( 151 )                |
| 长江朱沱断面磷浓度与通量变化及来源解析 .....                                    | 姜保峰, 谢卫民, 黄波, 刘旻璇 ( 159 )                                       |
| 珠江河口地表水锰氧化物对磷的“载-卸”作用 .....                                  | 李睿, 梁作兵, 伍祺瑞, 杨晨晨, 田帝, 高磊, 陈建耀 ( 173 )                          |
| 富春江水库浮游植物功能群变化的成因 .....                                      | 张萍, 王炜, 朱梦圆, 国超旋, 邹伟, 许海, 朱广伟 ( 181 )                           |
| 合浦盆地西部地区地下水水化学特征及形成机制 .....                                  | 陈雯, 吴亚, 张宏鑫, 刘怀庆 ( 194 )                                        |
| 新疆车尔臣河流域绿洲带地下水咸化与污染主控因素 .....                                | 李军, 欧阳宏涛, 周金龙 ( 207 )                                           |
| 京津冀地区生态系统健康时空演变及其影响因素 .....                                  | 李魁明, 王婉燕, 姚罗兰 ( 218 )                                           |
| 近30年辽河三角洲生态系统服务价值时空演变及影响因素分析 .....                           | 王耕, 张芙蓉 ( 228 )                                                 |
| 光伏电站建设对陆地生态环境的影响:研究进展与展望 .....                               | 田政卿, 张勇, 刘向, 陈生云, 柳本立, 吴纪华 ( 239 )                              |
| 大兴安岭林草交错带植被NDVI时空演变及定量归因 .....                               | 石淞, 李文, 曲琛, 杨子仪 ( 248 )                                         |
| 西南地区不同类型植被NPP时空演变及影响因素探究 .....                               | 徐勇, 郑志威, 孟禹弛, 盘钰春, 郭振东, 张炎 ( 262 )                              |
| 不同海拔梯度下极端气候事件对松花江流域植被NPP的影响 .....                            | 崔嵩, 贾朝阳, 郭亮, 付强, 刘东 ( 275 )                                     |
| 基于InVEST与CA-Markov模型的昆明市碳储量时空演变与预测 .....                     | 帕茹克·吾斯曼江, 艾东, 方一舒, 张益宾, 李牧, 郝晋琨 ( 287 )                         |
| 基于PLUS-InVEST模型的酒泉市生态系统碳储量时空演变与预测 .....                      | 石晶, 石培基, 王梓洋, 程番苑 ( 300 )                                       |
| 长江下游沿江平原土壤发育过程中碳库分配动态 .....                                  | 胡丹阳, 张欢, 宿宝巍, 张娅璐, 王永宏, 纪佳辰, 杨洁, 高超 ( 314 )                     |
| 漓江流域喀斯特森林土壤有机碳空间分布格局及其驱动因子 .....                             | 申楷慧, 魏识广, 李林, 储小雪, 钟建军, 周景钢, 赵毅 ( 323 )                         |
| 不同土地利用方式对岩溶区土壤有机碳组分稳定性的影响 .....                              | 陈坚淇, 贾亚男, 贺秋芳, 江可, 陈畅, 叶凯 ( 335 )                               |
| 紫色土丘陵区坡地柑橘园土壤碳氮的空间分布特征 .....                                 | 李子阳, 陈露, 赵鹏, 周明华, 郑静, 朱波 ( 343 )                                |
| 氮添加与凋落物处理对橡胶林砖红壤有机碳组分及酶活性的影响 .....                           | 薛欣欣, 任常琦, 罗雪华, 王文斌, 赵春梅, 张永发 ( 354 )                            |
| 重庆化肥投入驱动因素、减量潜力及环境效应分析 .....                                 | 梁涛, 赵敬坤, 李红梅, 王妍, 曹中华, 张务帅, 王孝忠, 郭超仪, 石孝均, 陈新平 ( 364 )          |
| 中国土壤中全氟和多氟烷基物质的分布、迁移及管控研究进展 .....                            | 刘浩然, 邢静怡, 任文杰 ( 376 )                                           |
| 基于多源辅助变量和随机森林模型的耕地土壤重金属含量空间分布预测 .....                        | 解雪峰, 郭炜炜, 濮励杰, 缪源卿, 蒋国俊, 张建珍, 徐飞, 吴涛 ( 386 )                    |
| 基于源导向的农用地土壤重金属健康风险评估及优先控制因子分析 .....                          | 马杰, 葛森, 王胜蓝, 邓力, 孙静, 蒋月, 周林 ( 396 )                             |
| 铜陵某废弃硫铁矿矿区土壤重金属污染特征及来源解析 .....                               | 李如忠, 刘宇昊, 黄言欢, 吴鸿飞 ( 407 )                                      |
| 天水市主城区公交站地表灰尘重金属来源解析及污染评价 .....                              | 李春艳, 王新民, 王海, 吕晓斌 ( 417 )                                       |
| 基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应 .....                                 | 唐乐斌, 刘新彩, 宋波, 马丽钧, 黄凤艳 ( 429 )                                  |
| 腐殖质活性组分对土壤镉有效性的调控效应与水稻安全临界阈值 .....                           | 胡秀芝, 宋毅, 王天雨, 蒋珍芬, 魏世强 ( 439 )                                  |
| 生物炭与铁钙材料对镉砷复合污染农田土壤的修复 .....                                 | 吴秋产, 吴骥子, 赵科理, 连斌, 袁峰, 孙洪, 田欣 ( 450 )                           |
| 人体微塑料污染特征及健康风险研究进展 .....                                     | 马敏东, 赵洋尘, 朱龙, 王伟平, 康玉麟, 安立会 ( 459 )                             |
| 聚苯乙烯微塑料联合镉污染对土壤理化性质和生菜( <i>Lactuca sativa</i> )生理生态的影响 ..... | 牛佳瑞, 邹勇军, 简敏菲, 黄楚红, 李金燕, 穆霞, 刘淑丽 ( 470 )                        |
| 转录组分析植物促生细菌缓解高粱微塑料和重金属复合污染胁迫机制 .....                         | 刘泳岐, 赵超禹, 任学敏, 李玉英, 张英君, 张浩, 韩辉, 陈兆进 ( 480 )                    |
| 微塑料对土壤中养分和镉淋失的影响 .....                                       | 赵群芳, 褚龙威, 丁原红, 王发园 ( 489 )                                      |
| 微塑料和非对土壤化学性质、酶活性及微生物群落的影响 .....                              | 刘沙沙, 秦建桥, 吴贤格 ( 496 )                                           |
| 民勤荒漠绿洲过渡带人工梭梭林土壤细菌群落结构及功能预测 .....                            | 王安林, 马瑞, 马彦军, 吕彦勋 ( 508 )                                       |
| 不同灌溉水盐度下土壤真菌群落对生物炭施用的响应 .....                                | 郑志玉, 郭晓雯, 闵伟 ( 520 )                                            |
| 厨余垃圾有机肥对土壤微生物活性及功能的影响 .....                                  | 刘美灵, 汪益民, 金文豪, 王永冉, 王嘉和, 柴一博, 彭丽媛, 秦华 ( 530 )                   |
| 土壤真菌群落结构对辣椒长期连作的响应特征 .....                                   | 陈芬, 余高, 王谢丰, 李廷亮, 孙约兵 ( 543 )                                   |
| 叶面喷施硅肥对再生水灌溉水稻叶际细菌群落结构及功能基因的影响 .....                         | 梁胜贤, 刘春成, 胡超, 崔二苹, 李中阳, 樊向阳, 崔丙健 ( 555 )                        |
| 昌黎县海域细菌群落和抗生素抗性基因分析 .....                                    | 王秋水, 程波, 刘悦, 邓婕, 徐岩, 孙朝徽, 袁立艳, 左嘉, 司飞, 高丽娟 ( 567 )              |
| 基于高通量定量PCR与高通量测序技术研究城市湿地公园抗生素抗性基因污染特征 .....                  | 黄福义, 周曙仡, 潘婷, 周昕原, 苏建强, 张炯 ( 576 )                              |
| 城区第四系沉积柱中抗生素的垂向分布特征及环境影响因素 .....                             | 刘可, 童蕾, 甘翠, 王逸文, 张嘉越, 何军 ( 584 )                                |
| 氢氧化钾改性玉米秸秆生物炭对水中土霉素的吸附特性及机制 .....                            | 刘总堂, 孙玉凤, 费正皓, 沙新龙, 温小菊, 钱彬彬, 陈建, 谷成刚 ( 594 )                   |
| CO <sub>2</sub> 气氛热解与硝酸改性的生物炭Pb <sup>2+</sup> 吸附性能对比 .....   | 江豪, 陈瑞芝, 朱自洋, 王琳, 段文斌, 陈芳媛 ( 606 )                              |

# 基于大田试验的土壤-水稻镉对不同调理剂的响应

唐乐斌<sup>1</sup>, 刘新彩<sup>2</sup>, 宋波<sup>1,3\*</sup>, 马丽钧<sup>1</sup>, 黄凤艳<sup>1</sup>

(1. 桂林理工大学环境科学与工程学院, 桂林 541004; 2. 桂林市农业生态与资源保护站, 桂林 541213; 3. 桂林理工大学岩溶地区水污染控制与用水安全保障协同创新中心, 桂林 541004)

**摘要:** 为探究土壤调理剂对酸性镉(Cd)污染土壤中Cd的迁移特征的影响,基于大田试验,研究施加天象1号(TX1)、石灰(Li)、硅肥(Si)、诺地康(NDK)和钙镁磷肥(CaMg-P)5种土壤调理剂对土壤-水稻系统中Cd累积与转运和水稻产量的影响。结果表明:①与对照处理相比,各处理土壤pH值提升0.41~0.68个单位,土壤有效态Cd(DTPA-Cd)含量降幅为11.2%~39.7%,其中Li和NDK处理DTPA-Cd差异达显著水平( $P < 0.05$ )。②与空白对照相比,施用土壤调理剂可以显著降低水稻体内Cd总量,根系、其他叶、穗轴、颖壳和糙米中Cd含量均显著低于CK处理( $P < 0.05$ ),各部位间Cd转运系数表现为 $TF_{\text{根-其他节}} > TF_{\text{根-第一节}} > TF_{\text{根-其他叶}} > TF_{\text{根-穗轴}} > TF_{\text{根-颖壳}} \approx TF_{\text{根-剑叶}} > TF_{\text{根-糙米}}$ ,且糙米Cd含量均符合《食品安全国家标准》(GB 2762-2017)中限量标准( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ),其中TX1、Li和CaMg-P处理降Cd效果显著, $\omega(\text{Cd})$ 分别为0.097、0.094和 $0.134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。③施加土壤调理剂可增产9.9%~35.8%,CaMg-P和TX1处理产量显著高于其他处理( $P < 0.05$ )。④相关性分析结果表明:糙米Cd含量与DTPA-Cd含量、土壤有效态Fe(DTPA-Fe)含量和有效磷(OP)呈显著正相关,而与土壤pH值呈显著负相关。综上所述,推荐TX1和CaMg-P在重金属Cd轻度污染农田应用以保障农产品安全。

**关键词:** 镉(Cd); 土壤调理剂; 水稻; 大田; 安全生产

中图分类号: X171.5 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2024)01-0429-10 DOI: 10.13227/j.hj.kx.202302210

## Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials

TANG Le-bin<sup>1</sup>, LIU Xin-cai<sup>2</sup>, SONG Bo<sup>1,3\*</sup>, MA Li-jun<sup>1</sup>, HUANG Feng-yan<sup>1</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China; 2. Guilin Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Guilin 541213, China; 3. Collaborative Innovation Center for Water Pollution Control and Water Safety in Karst Area, Guilin University of Technology, Guilin 541004, China)

**Abstract:** A plot experiment was carried out to assess the applicability of soil conditioners on Cd-polluted acidic paddy fields. The effects of five soil conditioners [Tianxiang 1 Hao (TX1), limestone (Li), silicon fertilizer, Nuodikang (NDK), and calcium magnesium phosphate fertilizer (CaMg-P)] on Cd accumulation and transport between contaminated soil and rice plants and rice yield on the land were analyzed. The results showed that compared with that under the control, other tested methods increased soil pH by 0.41-0.68 units and decreased available Cd content in the soil by 11.2%-39.7%. The difference between Li- and NDK-treated soil available Cd reached a significant level ( $P < 0.05$ ). ② Compared with that in the blank control, the application of soil conditioner could significantly reduce the total amount of Cd in rice, and the Cd content in roots, other leaves, rachises, chaffs, and brown rice were significantly lower than those in the CK treatment ( $P < 0.05$ ). The Cd translation factor between various sites was shown as  $TF_{\text{roots-other nodes}} > TF_{\text{roots-first nodes}} > TF_{\text{roots-rachises}} > TF_{\text{roots-chaffs}} \approx TF_{\text{roots-flag leaves}} > TF_{\text{roots-brown rice}}$ . The Cd content of brown rice met the national safety standard ( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ), in which the TX1, Li, and CaMg-P treatments showed significant Cd reduction effects, and  $\omega(\text{Cd})$  was 0.097, 0.094, and  $0.134 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , respectively. ③ The application of soil conditioner could increase the yield by 9.9%-35.8%, and the yield of the CaMg-P and TX1 treatments was significantly higher than that of other treatments ( $P < 0.05$ ). ④ Correlation analysis showed that the Cd content in brown rice was significantly positively correlated with available Cd content in soil, available Fe content in soil, and available phosphorus but negatively correlated with soil pH. In summary, TX1 and CaMg-P are recommended to be applied in farmland lightly polluted by the heavy metal Cd to ensure the safety of agricultural products.

**Key words:** cadmium(Cd); soil conditioner; rice; field; safe production

随着中国经济增长迅速,“三化”快速发展所带来的冶炼、采矿<sup>[1]</sup>及化肥的不合理使用,造成耕地土壤重金属问题日益严重。目前我国土壤环境状况总体不容乐观,《全国土壤污染状况调查公报》指出,土壤点位超标率高达19.4%,其中无机污染物Cd的点位超标率为7%<sup>[2]</sup>。在中国约有 $2.786 \times 10^9 \text{ m}^2$ 的农业土壤受到Cd污染<sup>[2]</sup>,且主要分布在南方水稻主产区,严重危害国家农产品质量安全和威胁人民身体健康。基于我国的人口压力与粮食安全现状,现阶段不可能停止所有Cd污染土地尤其是轻、中度污染农田的生产活动。因此,如何有效降低土壤中Cd的生物有效性,阻控其从土壤向水稻籽粒的运移,减少糙米的Cd累积是维持稻田正常生产能力、保证粮食安全的

重大科学问题。

水稻(*Oryza sativa* L.)是中国种植面积和产量仅次于玉米的第二大粮食作物<sup>[3]</sup>,稻米是我国的主要口粮,在全国居民口粮消费结构中约占65%的比例<sup>[4]</sup>。然而水稻具有累积Cd的习性,很容易从土壤中吸收Cd并将其储存在稻谷中,成为食用大米的人群摄入Cd的主要来源。近年来随着中国农田土壤重金属污染加剧,“镉米”问题逐渐凸显<sup>[5]</sup>。在Cd污染地区生产

收稿日期: 2023-02-25; 修订日期: 2023-04-04

基金项目: 国家自然科学基金项目(52230006); 农用地安全利用联合攻关区建设项目(KWCD5C2022028)

作者简介: 唐乐斌(1996~),男,硕士研究生,主要研究方向为土壤重金属污染修复及其评价, E-mail: tanglb1210@163.com

\* 通信作者, E-mail: songbo@glut.edu.cn

安全稻米,通过各种修复技术以及农艺调控措施控制稻米中Cd的积累,已进行了较多研究<sup>[6,7]</sup>,不过这些技术均存在各自的局限性,即技术复杂、可行性差和效率低等.原位钝化技术是国内外普遍使用的土壤重金属污染治理方法之一<sup>[8,9]</sup>,施用土壤调理剂(钝化剂)可以改变土壤组分的化学行为进而降低重金属Cd在土壤环境中的生物有效性,适合于大面积农田Cd污染修复.

有研究表明,施用土壤调理剂能一定程度降低土壤有效态Cd含量和稻米Cd含量<sup>[10]</sup>,但水稻产量增幅并不显著<sup>[11]</sup>.目前,大多数研究集中在土壤调理剂或钝化剂对Cd生物有效性的影响<sup>[12,13]</sup>,而针对性地利用调控措施系统分析Cd在土壤-水稻系统迁移、转化和积累的内在机制及Cd在器官间运输分配的研究较少,且报道主要以盆栽试验或室内机制研究为多<sup>[14,15]</sup>,少有进行田间验证性试验.然而,大田环境下由于土壤类型和理化性质具有一定的空间异质性,作物生长环境条件不均一<sup>[16]</sup>,因此常会有与盆栽

试验不同的研究结果.针对广西桂林市临桂区出现的稻田土壤和糙米Cd含量超标,通过田间试验,选择5种土壤调理剂探讨Cd在水稻各部位中的累积与转运特征,在不降低稻米产量的前提下,筛选能更高效地降低土壤Cd可迁移性和稻米Cd含量的土壤调理剂,以期为Cd污染稻田的改良修复提供理论支撑,达到污染农田安全利用的目的.

## 1 材料与方法

### 1.1 供试材料

大田试验区位于广西桂林市临桂区四塘镇大湾村附近,属亚热带季风气候,光热充足,雨量充沛,无霜期长,年平均气温约19.1℃,年平均降雨量约1 887 mm,土壤类型为第四纪红土,供试土壤主要理化性质见表1.试验土壤总Cd含量高于生态环境部规定的风险筛选值约0.50倍,参照《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》(GB 15618-2018),试验田为安全利用类耕地.

表1 供试土壤基本理化性质<sup>1)</sup>

Table 1 Basic physical and chemical properties of the tested soil

| 指标 | pH   | $\omega/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ |         |         |         |     |      |      | $\omega(\text{SOM})$ | CEC                              |
|----|------|---------------------------------------|---------|---------|---------|-----|------|------|----------------------|----------------------------------|
|    |      | Cd                                    | DTPA-Cd | DTPA-Fe | DTPA-Mn | AN  | OP   | AK   | %                    | $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$ |
| 数值 | 5.35 | 0.451                                 | 0.183   | 151     | 4.11    | 171 | 15.4 | 20.2 | 5.85                 | 1.86                             |

1) DTPA-Cd、DTPA-Fe和DTPA-Mn分别表示用DTPA浸提的有效态Cd、Fe和Mn含量;AN表示碱解氮;OP表示有效磷;AK表示速效钾;CEC表示阳离子交换量;SOM表示有机质

供试水稻品种:德优108,广西智友生物科技股份有限公司选育的感温籼型三系杂交稻,在桂北地区种植广泛.

本试验选用的土壤调理剂为:天象1号、石灰、硅肥、诺地康和钙镁磷肥,各调理剂的基本性质见表2.

表2 供试土壤调理剂基本性质<sup>1)</sup>

Table 2 Basic properties of the tested soil conditioners

| 土壤调理剂 | 缩写     | pH   | $\omega/\%$ |      |                | $\omega(\text{Cd})$<br>$/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ | 生产厂家          |
|-------|--------|------|-------------|------|----------------|--------------------------------------------------------|---------------|
|       |        |      | MgO         | CaO  | $\text{SiO}_2$ |                                                        |               |
| 天象1号  | TX1    | 12.2 | 5.3         | 36.8 | 15.1           | 0.04                                                   | 江苏天象生物科技有限公司  |
| 石灰    | Li     | 12.4 | —           | 70.3 | —              | 0.24                                                   | 河南兴泰水处理材料有限公司 |
| 硅肥    | Si     | 10.8 | —           | —    | 28.4           | 0.06                                                   | 南宁市宜华贸易有限公司   |
| 诺地康   | NDK    | 10.2 | 8.9         | 25.8 | 21.9           | —                                                      | 河南诺赛德生物科技有限公司 |
| 钙镁磷肥  | CaMg-P | 7.4  | 10.0        | 15.2 | 19.8           | 0.13                                                   | 云南昆阳磷肥厂有限公司   |

1)“—”表示未检出,具体数值来自厂家产品检验报告

### 1.2 试验设计

选取水稻种植相对集中且Cd为主要污染物的农田开展大田试验,在试验前采用灌水结合旋耕(2~3次)的方式,尽可能消除田块内部土壤条件的差异.为防止各处理间相互影响,采用泥巴覆膜的形式制成田埂.本试验共设计6个处理:对照(CK)、TX1、Li、Si、NDK和CaMg-P,对应分别添加土壤调理剂为0、2 250、2 250、2 250、2 250和2 250  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,每个处理设4个重复,采用随机区组设计,共计24个小

区,各小区面积约30  $\text{m}^2$ .在淹水耙田之前均匀撒施,耙田时使产品与土壤充分混匀,3~5 d后插秧.各小区设置隔断,防止串水串肥.水稻于2021年7月4日播种,采用湿润育秧,7月13日施基肥,所有处理施用复合肥( $\text{N}:\text{P}_2\text{O}_5:\text{K}_2\text{O}=15:15:15$ )为375  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,7月17日同规格插秧,插秧后10 d追施尿素100  $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,10月10日采集稻谷及相对应的土壤样品.田间施肥、病虫害管理和种植密度按当地农业生产实际情况进行.

### 1.3 样品采集与测定

水稻成熟期各小区内采用“S”布点法采样,记录株高和剑叶长度等数据后,采集整株稻株和水稻根际土样,并做好相关标记。带回实验室后,将籽粒剥离,先用自来水洗净根系杂物,再用超纯水将整个植株润洗3~5次,将水稻植株分为根系、其它节、第一节、其他叶、剑叶、穗轴、颖壳和糙米共8个部分<sup>[17,18]</sup>(如图1),籽粒风干后按《米质测定方法》(NY/T 83-2017)出糙,分离出糙米和颖壳,其他样品在105℃杀青20 min,70℃烘至恒重,样品经不锈钢打磨机粉碎过60目筛后装入聚乙烯瓶内备用。根系土自然风干后,用玛瑙研钵研磨过0.841 mm和0.149 mm尼龙筛,保存备用。施加土壤调理剂后10、40、70和101 d于各小区内原位监测土壤pH变化,所用仪器为雷磁公司生产的PHS-3C型pH计,搭配E-201-Z锥形复合电极。

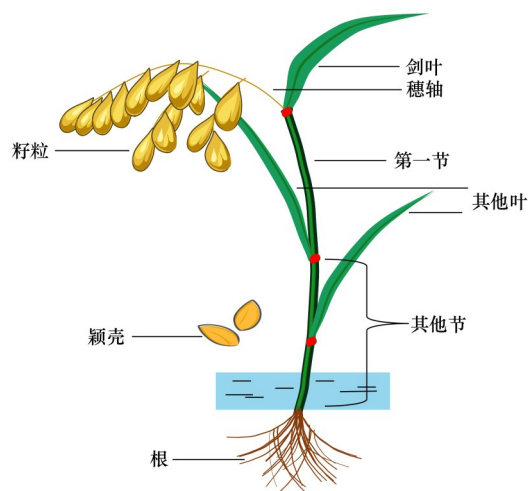


图1 水稻各器官示意

Fig. 1 Structure of different organs of rice

土壤全量Cd采用美国环保署推荐的 $\text{HNO}_3\text{-H}_2\text{O}_2$ 法消解,定容后由ELANDRC-e型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定;土壤重金属有效态采用DTPA浸提法提取,由Optima 8000型电感耦合等离子体光谱仪(ICP-OES)测定;土壤基本理化性质参考《土壤农业化学分析方法》<sup>[19]</sup>;植物样品中Cd的测定参照《食品安全标准 食品中多元素的测定》(GB 5009.268-2016),采用微波消解法,称取固体样品0.5 g(精确至0.000 1 g),加入10 mL硝酸,加盖过夜,按照微波消解仪标准操作步骤进行消解,冷却后赶酸,用超纯水定容至25 mL,测样前过0.22  $\mu\text{m}$ 滤膜,用Agilent 7500cx型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定。

现场测量各小区4 m<sup>2</sup>面积的稻米鲜粒重,通过60℃烘箱干燥48 h,测试稻米的含水量,然后根据含

水量和实际面积计算各小区的稻米产量。使用公式(1)计算实测产量。

$$\text{实测产量}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) = \frac{\text{鲜稻谷重}(\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}) \times (1 - \text{杂质率}) \times (1 - \text{空瘪率}) \times (1 - \text{含水率})}{1 - \text{籼稻标准干重含水率}} \quad (1)$$

分析过程中加入标准物质和空白样品进行质量控制,分析样品重复数为10%~15%。标准物质GBW 07404(GSS-4)、GBW 07460(ASA-9)、GBW 10045a(GSB-23a)和GBW 10020(GSB-11)中Cd的回收率分别为99.9%~103.1%、99.2%~105.2%、104.9%~106.7%和85.8%~104.9%。分析过程中所用化学试剂均为优级纯,所用水均为超纯水(Milli-Q超纯水系统)。

### 1.4 数据统计与分析

$$\text{富集系数(BCF)} = \frac{\text{水稻根系Cd含量}}{\text{土壤中Cd含量}}$$

$$\text{转运系数(TF)} = \frac{\text{水稻地上部(节、叶、穗轴等)Cd含量}}{\text{根系Cd含量}}$$

所得数据采用Microsoft Excel进行计算、统计与处理,采用SPSS 23.0进行相关统计分析,新复极差法(Duncan's)作多重比较、差异显著性检验,并用Origin 2021b绘图。

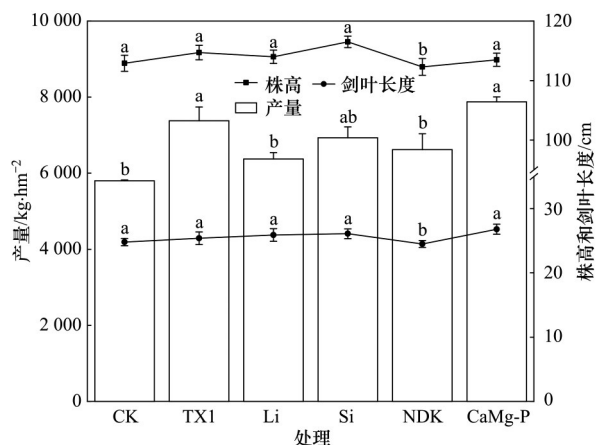
## 2 结果与分析

### 2.1 不同土壤调理剂对水稻产量及株高与剑叶长度的影响

从图2可知,施用土壤调理剂能有效增加稻谷产量。与CK处理对比,施用调理剂的各处理使稻谷产量增加9.9%~35.8%,且CaMg-P和TX1处理与CK之间的差异均达显著水平( $P < 0.05$ )。有研究表明,施用钙镁磷肥对偏酸性农田Cd污染土壤是良好的原位修复措施,其缓解Cd毒性的同时提供了作物生长所需的Ca、P和Mg等必需营养元素<sup>[20,21]</sup>。水稻株高和剑叶长度是反映水稻产量的重要指标。植株较矮会导致通风不良、茎叶拥挤,从而影响光合效率<sup>[22]</sup>。一般认为,剑叶对水稻的产量贡献率在52%左右<sup>[23]</sup>。与CK处理相比,除NDK处理外,其余处理后水稻株高和剑叶长度均得到不同程度地提高,水稻株高和剑叶增长幅度分别为0.5%~3.2%和0.4%~8.1%。

### 2.2 不同土壤调理剂对水稻各部位Cd含量的影响

如图3可见,与空白对照相比,施用土壤调理剂能够显著降低水稻体内Cd总量,各处理体内Cd总量降幅分别为63.9%、64.2%、31.0%、60.5%和46.4%。CK处理水稻根系、其他叶、穗轴、颖壳和糙米中Cd含量均显著高于其它处理( $P < 0.05$ ),且其水



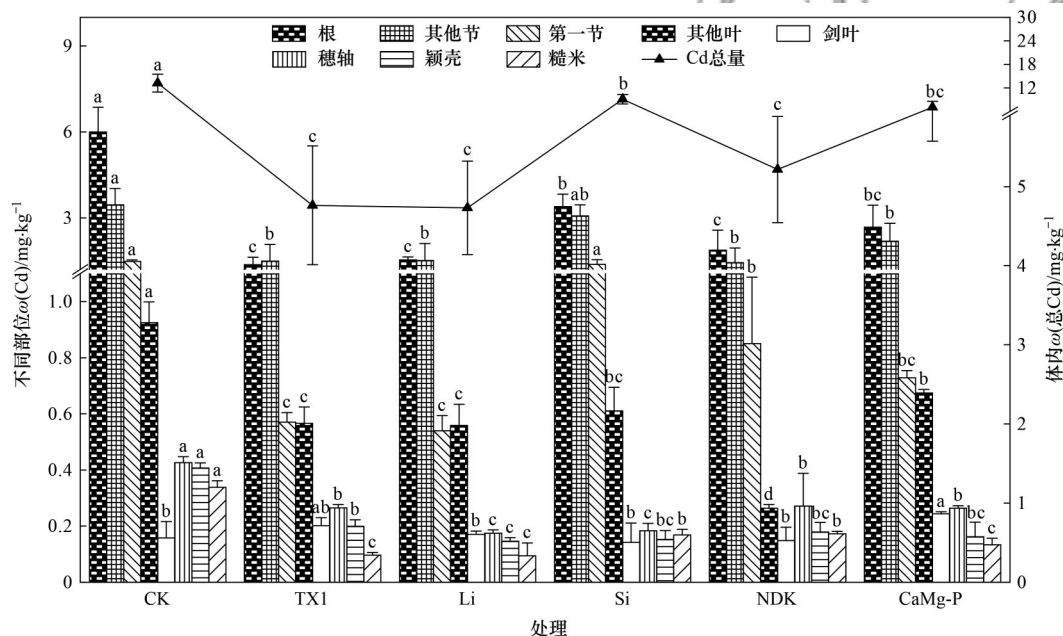
不同小写字母表示各处理间在  $P = 0.05$  水平下存在显著性差异

图2 不同处理对水稻产量、株高和剑叶长度的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on rice yield, plant height, and flag leaf length

稻根系、茎、叶和糙米中Cd含量分别占水稻体内Cd总量的45.5%、37.4%、8.20%和2.56%，说明重金属Cd在植株中的积累主要集中在根部，其次是茎、叶，在糙米中最少。这可能是水稻的根茎等器官在一定程度上起到了阻控作用的结果<sup>[24]</sup>。在水稻根系中，

其它处理Cd含量与CK之间的差异均达到显著水平，其中 $\omega(\text{Cd})$ 最大的是Si处理，为 $3.40 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。而除Si处理外，其他节和第一节中的Cd含量显著低于CK处理。相较于施加调理剂的处理，Si处理的第一节中Cd含量显著高于其他处理，其他节Cd含量出现高于其他处理的趋势，但未达显著水平，糙米Cd含量却显著低于CK处理，这可能是因为单硅酸( $\text{H}_4\text{SiO}_4$ )等成分在水稻体内形成有序的 $\text{SiO}_2$ 胶体，其可与Cd等金属离子形成Cd-Si复合物，降低植株中Cd移动性<sup>[25, 26]</sup>，进而抑制水稻茎节中Cd向糙米中迁移和再分配。此外，各处理剑叶中Cd含量均低于其他叶，这可能与剑叶生长周期较短有关。穗轴是穗节和穗颈中各种离子向籽粒输送的末端出口<sup>[27]</sup>。与空白对照相比，不同处理可显著降低穗轴中Cd含量，降幅在36.4%~58.9%。与CK处理糙米 $\omega(\text{Cd})$ 为 $0.338 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 相比，施用不同土壤调理剂后糙米Cd含量均显著降低，降幅分别为71.3%、72.2%、50.1%、48.8%和60.5%，均符合《食品安全国家标准》(GB 2762-2017)中糙米Cd限量标准( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。



不同小写字母表示各处理间在  $P = 0.05$  水平下存在显著性差异

图3 不同处理对水稻各部位Cd的影响

Fig. 3 Effects of different treatments on Cd content in various parts of rice

Cd进入水稻体内最重要的途径是通过根系吸收，由表3可知，与CK相比，其他处理根对土壤的Cd富集系数分别降低了79.6%、79.0%、38.8%、64.4%和46.4%，说明土壤调理剂从源头降低水稻植株地上部Cd的累积，最终降低糙米Cd含量。此外，施加土壤调理剂的处理水稻各部位间Cd转运系数均表现为： $\text{TF}_{\text{根-其他节}} > \text{TF}_{\text{根-第一节}} > \text{TF}_{\text{根-其他叶}} > \text{TF}_{\text{根-穗轴}} > \text{TF}_{\text{根-颖壳}} \approx \text{TF}_{\text{根-剑叶}} > \text{TF}_{\text{根-糙米}}$ ，且BCF<sub>土-根</sub>明显高于各部位间Cd转

运系数，进一步说明水稻植株吸收Cd主要集中于根部，通过茎秆和穗轴等器官拦截Cd转运，空间上地上部位距离污染源越远，其Cd转运系数越低。与施加土壤调理剂的处理相比，NDK处理 $\text{TF}_{\text{根-其他节}}$ 显著低于其他处理( $P < 0.05$ )，而 $\text{TF}_{\text{根-第一节}}$ 和 $\text{TF}_{\text{根-糙米}}$ 的转运系数高于其他处理，但未达显著水平，表明该处理可以促进Cd从其他节向第一节的转运，进而增加Cd在糙米中的分配，使得糙米Cd含量升高。此外，与施加产

表3 不同处理下水稻Cd富集系数和转运系数<sup>1)</sup>

Table 3 Bioaccumulation factors and translation factors of Cd under different treatments

| 处理     | BCF <sub>土-根</sub> | TF <sub>根-其它节</sub> | TF <sub>根-第一节</sub> | TF <sub>根-其他叶</sub> | TF <sub>根-剑叶</sub> | TF <sub>根-穗轴</sub> | TF <sub>根-颖壳</sub> | TF <sub>根-糙米</sub> |
|--------|--------------------|---------------------|---------------------|---------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| CK     | 34.5±4.08a         | 0.869±0.049a        | 0.356±0.118ab       | 0.271±0.142a        | 0.090±0.038a       | 0.128±0.049a       | 0.101±0.041a       | 0.145±0.030a       |
| TX1    | 7.06±1.71c         | 0.877±0.054a        | 0.273±0.089b        | 0.210±0.130a        | 0.057±0.041a       | 0.071±0.023a       | 0.061±0.025b       | 0.052±0.012b       |
| Li     | 7.25±0.58c         | 1.185±0.586a        | 0.344±0.106ab       | 0.230±0.116a        | 0.076±0.044a       | 0.126±0.047a       | 0.086±0.029a       | 0.038±0.021b       |
| Si     | 21.1±1.64b         | 0.827±0.163a        | 0.398±0.122ab       | 0.286±0.164a        | 0.082±0.084a       | 0.116±0.081a       | 0.088±0.051a       | 0.082±0.054b       |
| NDK    | 12.3±8.05c         | 0.753±0.243b        | 0.522±0.212a        | 0.259±0.073a        | 0.097±0.014a       | 0.123±0.022a       | 0.106±0.033a       | 0.093±0.041ab      |
| CaMg-P | 18.5±5.36bc        | 0.838±0.170a        | 0.419±0.122ab       | 0.299±0.120a        | 0.075±0.059a       | 0.123±0.075a       | 0.084±0.056a       | 0.072±0.041b       |

1)同列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )

品的处理相比, TX1处理 $TF_{根-穗轴}$ 显著高于其他处理( $P < 0.05$ ), 且 $BCF_{土-根}$ 相对较低, 说明该处理可有效缓解根系对Cd的吸收, 同时提高穗轴组织阻控Cd的潜力, 进而减少其进入籽粒的机会.

2.3 不同土壤调理剂对土壤pH的影响

从施加不同土壤调理剂101 d后土壤pH值变化结果(图4)可以看出, 土壤pH值均比CK处理有不同程度地提高, 提升效果存在一定差异, 而随着时间的延长, 提升土壤pH值的效果也随之延续. 与CK处理相比, TX1、Li、Si、NDK和CaMg-P处理土壤pH分别提高了0.64、0.53、0.68、0.62和0.41个单位, 且以Li处理中期效果最为明显, pH值可由5.33升至6.54左右, 表明石灰对偏酸性土壤具有明显的改良效果. 文炯等<sup>[28]</sup>的研究发现, 添加钙镁磷肥、生石灰与有机肥处理的土壤pH均有不同程度升高, 其中添加生石灰的处理pH上升明显, 钙镁磷肥与有机肥次之. 总体来看, 施加不同土壤调理剂后, 土壤pH值并不是单一的增或减趋势, 大多呈现先升高至最大值而后降低的趋势, 不过达到平衡的时间不同. 值得注意的

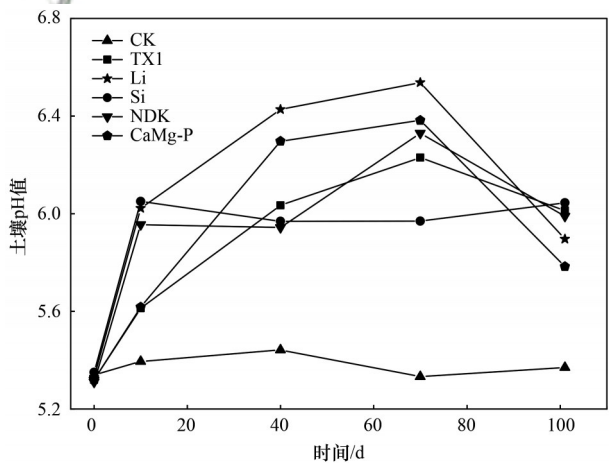


图4 不同处理对土壤pH值的动态变化影响

Fig. 4 Effects of different treatments on dynamic changes in soil pH

是Si处理在10 d前后提升土壤pH值的效果保持稳定, 原因可能是因为其本身为强碱性(pH 10.8), 此外其主要成分 $SiO_2$ 可在土壤中发生水解作用产生羟基使土壤和植物根际pH值上升<sup>[29]</sup>.

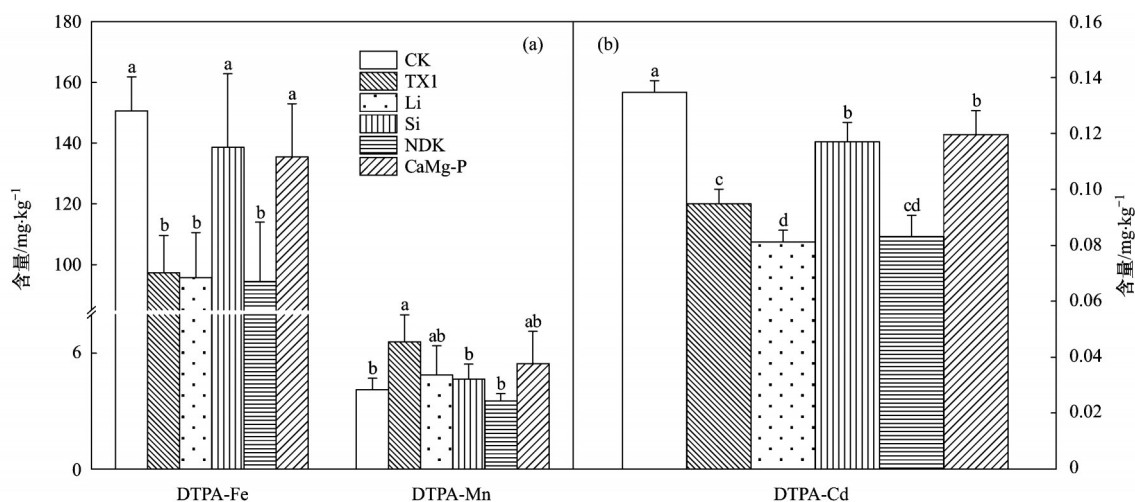
2.4 不同土壤调理剂对土壤有效态铁、锰和镉的影响

从图5可以看出, 5种土壤调理剂均降低了土壤DTPA-Fe和DTPA-Cd, 其中TX1、Li和NDK处理效果明显, 土壤DTPA-Fe分别降低了35.4%、36.5%和37.3%, 土壤DTPA-Cd分别降低了29.6%、39.7%和38.3%. 根表铁膜是维系水稻生长的营养库, 是抵御Cd、砷(As)等金属、类金属污染和水污染的屏障<sup>[30]</sup>, 而铁膜形成的必要条件之一是土壤中游离的 $Fe(II)$ 含量<sup>[31, 32]</sup>. 土壤中DTPA-Fe减少可能是水稻利用土壤中本身存在的Fe, 从而形成了大量铁膜<sup>[33]</sup>. 另外, 生长介质中Si或P的供应状况显著影响水稻根表铁膜的形成. 营养液中缺P的水稻根系铁膜比正常供磷高出57.5%~84.5%, 加硅处理明显降低了水稻根表铁膜的数量<sup>[34]</sup>. 潘杨等<sup>[35]</sup>的研究结果表明, 有效态Cd与稻米Cd的决定系数均比稻米Cd与土壤全Cd决定系数大, 说明土壤Cd生物有效态含量对稻米吸收Cd有显著影响.

$Mn^{2+}$ 与 $Cd^{2+}$ 对相关离子通道和载体蛋白的结合存在竞争关系,  $Mn^{2+}$ 能优先结合细胞膜上的载体蛋白和通道蛋白, 与 $Cd^{2+}$ 产生拮抗作用<sup>[36, 37]</sup>. 与CK处理对比发现, 除NDK处理外, 其他处理均可在一定程度上提升DTPA-Mn含量, 增幅在13.4%~60.3%. 有研究表明, 石灰性土壤上施用磷肥可在提高小麦产量的同时提高土壤有效Fe、Mn和锌(Zn)含量<sup>[38]</sup>. 可见, 土壤调理剂/钝化剂对作物土壤微量元素含量的影响结果不一致, 这可能与不同地区种植不同作物品种施用土壤调理剂引起的土壤微量元素有效性变化及作物富集、转运不同有关.

2.5 糙米Cd含量与土壤属性间的相关性分析

对糙米Cd含量与土壤属性间的相关性分析发现(图6), 糙米Cd含量与土壤DTPA-Cd含量、OP和DTPA-Fe含量均呈显著正相关, 其 $r$ 分别为0.72( $P < 0.01$ )、0.82( $P < 0.01$ )和0.59( $P < 0.05$ ). 糙米Cd含量与土壤pH值呈显著负相关( $P < 0.05$ ), 而廖启林等<sup>[39]</sup>的结果表明, 通常情况下土壤pH与稻米Cd含量



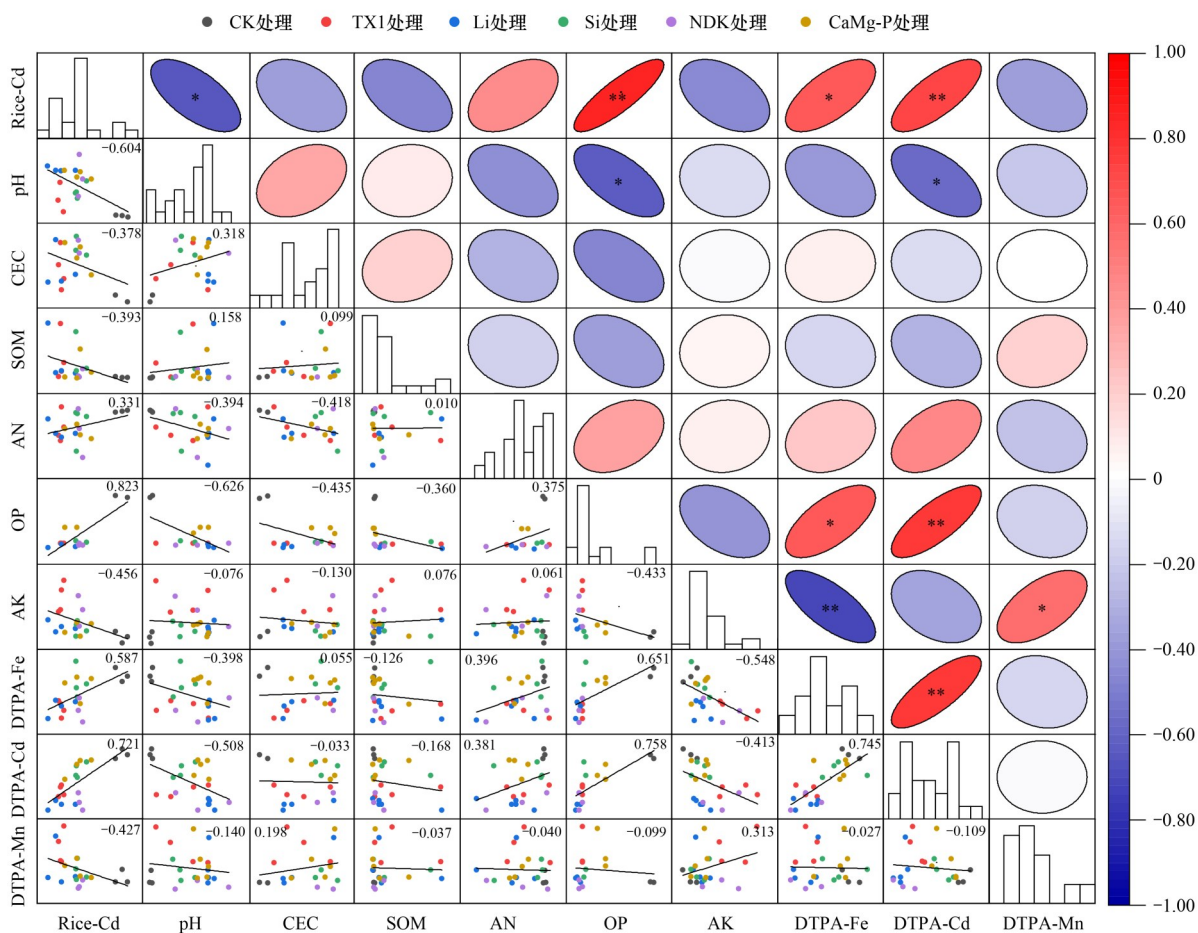
不同小写字母表示各处理间在  $P = 0.05$  水平下存在显著性差异

图5 不同处理对土壤有效态铁、锰和镉的影响

Fig. 5 Effects of different treatments on soil available iron, manganese, and cadmium

不存在显著相关性,当土壤  $\omega(\text{Cd})$  超过  $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 且土壤  $\omega(\text{SOM})$  介于  $2.5\% \sim 6.5\%$  时, 稻米 Cd 含量与土壤 pH 呈显著负相关. 土壤有效态 Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关 ( $r = -0.51, P < 0.05$ ), 与土壤 OP

和土壤 DTPA-Fe 含量呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ). 值得注意的是, 土壤 DTPA-Fe 与土壤 AK 呈显著负相关 ( $P < 0.01$ ), 这可能是由于土壤中 DTPA-Fe 含量在短期内受外源添加物的影响较大.



对角线为变量直方分布, 散点图为变量矩阵散点拟合和拟合度, 椭圆图为相关性系数(形状表示 95% 置信椭圆, 椭圆方向表示相关性正负, 色柱颜色表示相关性大小)和显著性水平(\*表示  $P < 0.05$ , \*\*表示  $P < 0.01$ )

图6 糙米 Cd 含量与土壤属性间的相关性分析

Fig. 6 Correlation analysis between Cd content in brown rice and soil properties

### 3 讨论

#### 3.1 不同土壤调理剂对土壤 DTPA-Cd 的影响

水稻糙米中重金属的累积是土壤-水稻互作的结果,土壤重金属有效态含量和水稻自身的生理活动共同决定糙米中重金属含量的高低<sup>[40]</sup>.与全 Cd 相比,土壤 DTPA-Cd 更容易被水稻吸收,其与糙米 Cd 含量之间显著相关,能间接反映土壤中 Cd 的移动特性和水稻 Cd 的累积风险<sup>[41, 42]</sup>.在本试验条件下施用土壤调理剂后,土壤 DTPA-Cd 和糙米 Cd 含量均有不同程度地降低,且二者呈显著正相关关系( $P < 0.01$ ),其他学者也有类似的研究结果<sup>[43, 44]</sup>.施用土壤调理剂可促进土壤中 Cd 的溶解态向不溶态转换,降低土壤 Cd 有效性<sup>[20]</sup>,而有效态 Cd 含量又受到土壤环境中 pH、SOM、CEC 和 OP 等理化性质及所使用调理剂的有效成分的影响.土壤 DTPA-Cd 与 pH 和 OP 相关性分析表明,它们之间具有显著的相关性.闫家普等<sup>[45]</sup>的研究表明,pH 是降低有效态 Cd 含量的主要影响因子,pH 升高使土壤中还原态 Cd 显著降低,非可利用态 Cd 含量显著增加,有效降低有效态 Cd 含量.此外,施加土壤调理剂增加土壤胶体表面负电荷,促进土壤胶体对 Cd 的吸附,使土壤中  $\text{Cd}^{2+}$  生成  $\text{Cd}(\text{OH})_2$  和  $\text{CdCO}_3$  沉淀,从而降低土壤中 Cd 的有效性<sup>[46, 47]</sup>.另有研究表明,土壤有机质通过提高土壤有机碳含量等方式降低外源镉在土壤中的可迁移性和生物有效性<sup>[48]</sup>.一般来说,随着土壤 CEC 的增多,土壤中负电荷量越高,从而提供更多的吸附点位来固定重金属离子<sup>[49]</sup>.试验中的土壤调理剂本身 pH 大多很高,且含有  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  和  $\text{K}^+$  等离子,能与土壤环境中  $\text{H}^+$  和  $\text{Al}^{3+}$  离子发生置换和沉淀作用,从而达到改良土壤酸性的效果.除此以外,土壤调理剂中  $\text{Ca}^{2+}$  迁移到黏土颗粒表面,取代土壤中的  $\text{K}^+$  和  $\text{Na}^+$  等阳离子,进行阳离子交换,从而使土壤中 CEC 增加.但也有研究表明,土壤 Cd 含量偏低时 CEC 的增加基本不对糙米吸收 Cd 产生影响<sup>[39]</sup>.

#### 3.2 不同土壤调理剂对水稻转运 Cd 的影响

水稻籽粒中 Cd 含量与植株中 Cd 积累量、Cd 向地上部分的分配比以及从地上部分到籽粒 Cd 分配比呈正相关关系<sup>[50]</sup>.根系是水稻吸收并积累 Cd 的主要器官,因而水稻根系的 Cd 吸收能力直接影响到地上部的迁移能力<sup>[51, 52]</sup>.有研究发现,进入植物体内的 Cd 富集于根部约,占 49% ~ 79%,潜在移动的 Cd 离子约为 24%<sup>[53]</sup>.与 CK 处理相比, TX1 处理根系 Cd 占比为 29%,根系 Cd 富集系数最低,这可能与材料释放出的  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Mg}^{2+}$  等阳离子会与  $\text{Cd}^{2+}$  竞争作物根系的吸收通道,从而减少作物对 Cd 的吸收有关.从表 3 可以看

到, Si 处理  $\text{BCF}_{\text{土-根}}$  显著高于其他施加产品的处理,且  $\text{TF}_{\text{根-其他叶}}$  和  $\text{TF}_{\text{根-剑叶}}$  均大于其他处理,说明该处理促使根系将更多的土壤中 Cd 富集体内,同时提高叶片等营养器官对 Cd 的固定作用,减弱叶片中的 Cd 被重新活化,并抑制 Cd 从叶片通过韧皮部再转运至籽粒,进而降低糙米中 Cd 的含量.有研究表明,叶片 Cd 输出量与籽粒中的 Cd 含量高度正相关,相关系数达 0.769,叶片和根系对籽粒 Cd 积累起主要作用<sup>[54]</sup>.总的来说,土壤调理剂能够显著降低水稻体内 Cd 总量( $P < 0.05$ ),其中水稻其他叶、穗轴和颖壳中 Cd 含量均显著下降,其有效成分随着养分循环系统运移至根部,与根系中的 Cd 发生共沉淀反应而显著降低根系对 Cd 的富集,使得更少的 Cd 转运累积到水稻地上部位,通过茎秆和穗轴等器官拦截 Cd 转运,最终显著降低糙米中 Cd 含量.

#### 3.3 可行性与效果对比

本研究结果表明,施用 5 种土壤调理剂均显著降低 DTPA-Cd 含量,降幅为 11.2% ~ 39.7%,其中 Li 处理效果最好,同时各处理均能将糙米 Cd 含量降至限量标准( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )以下,其中 TX1、Li 和 CaMg-P 处理效果显著, $\omega(\text{Cd})$  分别为 0.097、0.094 和 0.134  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ .此外, TX1 和 CaMg-P 处理可显著增产 27.3% 和 35.8%.本研究土壤调理剂施加量相同( $2250 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ),考虑到人工成本和产品运输成本大致相同的情况下,材料采购价格为: TX1( $2000 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ )、石灰( $800 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ )、硅肥( $6500 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ )、NDK( $3200 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ )和钙镁磷肥( $1600 \text{ 元} \cdot \text{t}^{-1}$ ).有学者认为 pH 5.5 左右的酸性土壤,第 1 年生石灰施用量  $1125 \sim 1275 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,以后逐年递减<sup>[55]</sup>.石灰持续性较短,大量或长期施用容易破坏土壤团体结构,形成石灰性板结田,肥力下降而导致作物减产.综上所述,从降 Cd 效果、水稻产量、经济成本和潜在环境风险来说, TX1 和 CaMg-P 是研究区 Cd 污染农田修复效果最佳的土壤调理剂.

### 4 结论

(1) 施用土壤调理剂可以降低土壤 DTPA-Cd 和 DTPA-Fe 含量,降幅分别为 11.2% ~ 39.7% 和 8.0% ~ 37.3%,其中 Li 和 NDK 处理土壤 DTPA-Cd 显著低于其他处理( $P < 0.05$ ).除 NDK 处理外,各处理 DTPA-Mn 含量增幅为 13.4% ~ 60.3%.

(2) 相关性表明:土壤 DTPA-Cd 含量与土壤 pH 值呈显著负相关,糙米 Cd 含量与土壤 DTPA-Cd 含量、OP 和 DTPA-Fe 含量均呈显著正相关.

(3) 施用土壤调理剂能显著降低水稻体内 Cd 总量,根系、其他叶、穗轴、颖壳和糙米中 Cd 含量均显

著低于CK处理( $P < 0.05$ ),其中各处理糙米Cd含量均降至限量标准( $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )以下。

(4)施加土壤调理剂可使水稻增产  $9.9\% \sim 35.8\%$ ,以CaMg-P产量最高,为  $7\,874.1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

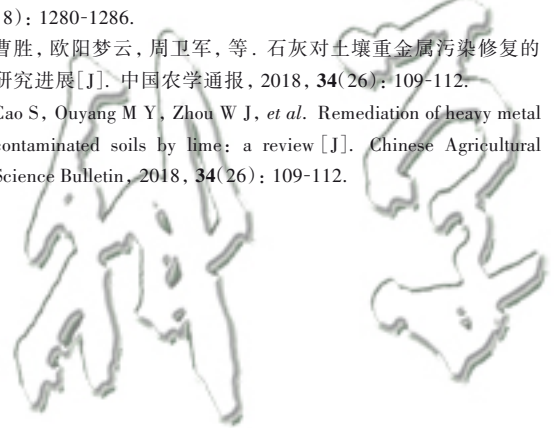
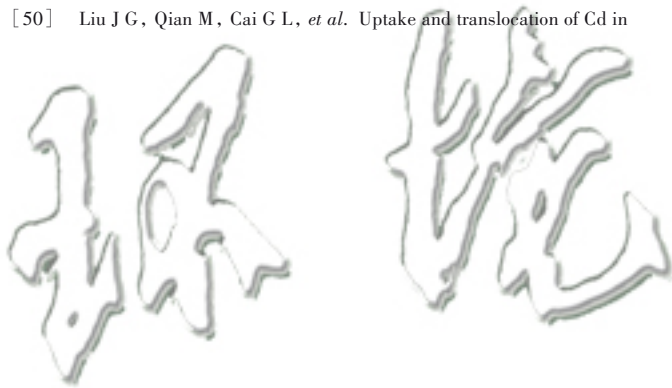
(5)推荐TX1和CaMg-P作为成本低、增产且钝化效果良好的土壤调理剂在重金属Cd污染农田施用。

#### 参考文献:

- [1] Xue S G, Shi L Z, Wu C, *et al.* Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines [J]. *Environmental Research*, 2017, **156**: 23-30.
- [2] 环境保护部,国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[R]. 北京: 环境保护部,国土资源部, 2014.
- [3] 周静,杨洋,孟桂元,等. 不同镉污染土壤下水稻镉富集与转运效率[J]. *生态学杂志*, 2018, **37**(1): 89-94.  
Zhou J, Yang Y, Meng G Y, *et al.* Cadmium accumulation and translocation efficiency of rice under different cadmium-polluted soils[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, **37**(1): 89-94.
- [4] 罗琼,王昆,许靖波,等. 我国稻田镉污染现状·危害·来源及其生产措施[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(30): 10540-10542.  
Luo Q, Wang K, Xu J B, *et al.* Cadmium pollution situation, harm, source and production measures in paddy field of China[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(30): 10540-10542.
- [5] Zhu H H, Chen C, Xu C, *et al.* Effects of soil acidification and liming on the phytoavailability of cadmium in paddy soils of central subtropical China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **219**: 99-106.
- [6] 崔俊义,马友华,王陈丝丝,等. 农田土壤镉污染原位钝化修复技术的研究进展[J]. *中国农学通报*, 2017, **33**(30): 79-83.  
Cui J Y, Ma Y H, Wang C S S, *et al.* Farmland soil cadmium pollution of in situ passivation remediation technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, **33**(30): 79-83.
- [7] 黄道友,朱奇宏,朱捍华,等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, **39**(6): 1030-1043.  
Huang D Y, Zhu Q H, Zhu H H, *et al.* Advances and prospects of safety agro-utilization of heavy metal contaminated farmland soil [J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2018, **39**(6): 1030-1043.
- [8] 林欣颖,谭祎,历红波. 稻米镉积累的影响因素与阻控措施[J]. *环境化学*, 2020, **39**(6): 1530-1543.  
Lin X Y, Tan Y, Li H B. A review on drivers and mitigation strategies for elevated cadmium concentration in rice [J]. *Environmental Chemistry*, 2020, **39**(6): 1530-1543.
- [9] 孙丽娟,秦秦,宋科,等. 镉污染农田土壤修复技术及安全利用方法研究进展[J]. *生态环境学报*, 2018, **27**(7): 1377-1386.  
Sun L J, Qin Q, Song K, *et al.* The remediation and safety utilization techniques for Cd contaminated farmland soil: a review [J]. *Ecology and Environment Sciences*, 2018, **27**(7): 1377-1386.
- [10] 周利军,武琳,林小兵,等. 土壤调理剂对镉污染稻田修复效果[J]. *环境科学*, 2019, **40**(11): 5098-5106.  
Zhou L J, Wu L, Lin X B, *et al.* Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners [J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(11): 5098-5106.
- [11] 李林峰,王艳红,李义纯,等. 调理剂耦合水分管理对双季水稻和铅累积的阻控效应[J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 472-480.  
Li L F, Wang Y H, Li Y C, *et al.* Inhibitory effects of soil amendment coupled with water management on the accumulation of Cd and Pb in double-cropping rice [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 472-480.
- [12] 任静华,廖启林,范健,等. 凹凸棒粘土对镉污染农田的原位钝化修复效果研究[J]. *生态环境学报*, 2017, **26**(12): 2161-2168.  
Ren J H, Liao Q L, Fan J, *et al.* Effect of in-situ stabilizing remediation of Cd-polluted soil by Attapulgitic [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2017, **26**(12): 2161-2168.
- [13] 梁学峰,韩君,徐应明,等. 海泡石及其复配原位修复镉污染稻田[J]. *环境工程学报*, 2015, **9**(9): 4571-4577.  
Liang X F, Han J, Xu Y M, *et al.* In-situ remediation of Cd polluted paddy soil using sepiolite and combined amendments [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2015, **9**(9): 4571-4577.
- [14] 李平,王兴祥,郎漫,等. 改良剂对Cu、Cd污染土壤重金属形态转化的影响[J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(7): 1241-1249.  
Li P, Wang X X, Lang M, *et al.* Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(7): 1241-1249.
- [15] 张雨婷,田应兵,黄道友,等. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(5): 2512-2521.  
Zhang Y T, Tian Y B, Huang D Y, *et al.* Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(5): 2512-2521.
- [16] 王梦梦,何梦媛,苏德纯. 稻田土壤性质与稻米镉含量的定量关系[J]. *环境科学*, 2018, **39**(4): 1918-1925.  
Wang M M, He M Y, Su D C. Quantitative relationship between paddy soil properties and cadmium content in rice grains [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(4): 1918-1925.
- [17] 张雅荃,王常荣,刘月敏,等. 叶施L-半胱氨酸对水稻镉和矿质元素含量的影响[J]. *环境科学*, 2021, **42**(8): 4045-4052.  
Zhang Y H, Wang C R, Liu Y M, *et al.* Foliar application of L-Cysteine: effects on the concentration of Cd and mineral elements in rice [J]. *Environmental Science*, 2021, **42**(8): 4045-4052.
- [18] 吕光辉. 长沙县典型镉污染农田水稻叶面喷锌降镉效应[D]. 长沙: 湖南师范大学, 2019.
- [19] 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, 1999.
- [20] 罗远恒,顾雪元,吴永贵,等. 钝化剂对农田土壤镉污染的原位钝化修复效应研究[J]. *农业环境科学学报*, 2014, **33**(5): 890-897.  
Luo Y H, Gu X Y, Wu Y G, *et al.* In-situ remediation of cadmium-polluted agriculture land using stabilizing amendments [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, **33**(5): 890-897.
- [21] 鄢德梅,郭朝晖,黄凤莲,等. 钙镁磷肥对石灰、海泡石组配修复镉污染稻田土壤的影响[J]. *环境科学*, 2020, **41**(3): 1491-1497.  
Yan D M, Guo Z H, Huang F L, *et al.* Effect of calcium magnesium phosphate on remediation paddy soil contaminated with cadmium using lime and sepiolite [J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(3): 1491-1497.

- [22] Setter T L, Laureles E V, Mazaredo A M. Lodging reduces yield of rice by self-shading and reductions in canopy photosynthesis [J]. *Field Crops Research*, 1997, **49**(2-3): 95-106.
- [23] 柳开楼, 李亚贞, 胡惠文. 长期施肥下水稻剑叶的 SPAD 值变化及其与产量的关系 [A]. 见: 2014 年全国青年作物栽培与生理学术研讨会论文集 [C]. 扬州: 中国作物学会, 2014. 12.
- [24] 刘仲齐, 张长波, 黄永春. 水稻各器官镉阻控功能的研究进展 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(4): 721-727.
- Liu Z Q, Zhang C B, Huang Y C. Research advance on the functions of rice organs in cadmium inhibition: a review [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(4): 721-727.
- [25] 宁东峰, 梁永超. 硅调节植物抗病性的机理: 进展与展望 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2014, **20**(5): 1280-1287.
- Ning D F, Liang Y C. Silicon-mediated plant disease resistance: advance and perspectives [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, **20**(5): 1280-1287.
- [26] 彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 等. 施硅对镉胁迫下水稻镉吸收和转运的调控效应 [J]. *生态学杂志*, 2019, **38**(4): 1049-1056.
- Peng O, Liu Y L, Tie B Q, *et al.* Effects of silicon application on cadmium uptake and translocation of rice under cadmium stress [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2019, **38**(4): 1049-1056.
- [27] 张昕, 张长波, 黄永春, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2022, **41**(4): 707-715.
- Zhang X, Zhang C B, Huang Y C, *et al.* Effects of characteristics of cadmium accumulation in vegetative organs on cadmium content in rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, **41**(4): 707-715.
- [28] 文炯, 李祖胜, 许望龙, 等. 生石灰和钙镁磷肥对晚稻生长及稻米镉含量的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(11): 2496-2502.
- Wen J, Li Z S, Xu W L, *et al.* Effects of quicklime and calcium magnesium phosphate application on late-season rice growth and grain cadmium uptake [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(11): 2496-2502.
- [29] 武成辉, 李亮, 晏波, 等. 新型硅酸盐钝化剂对镉污染土壤的钝化修复效应研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, **36**(10): 2007-2013.
- Wu C H, Li L, Yan B, *et al.* Remediation effects of a new type of silicate passivator on cadmium-contaminated soil [J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2017, **36**(10): 2007-2013.
- [30] Jiang F Y, Chen X, Luo A C. Iron plaque formation on wetland plants and its influence on phosphorus, calcium and metal uptake [J]. *Aquatic Ecology*, 2009, **43**(4): 879-890.
- [31] 刘春英, 陈春丽, 弓晓峰, 等. 湿地植物根表铁膜研究进展 [J]. *生态学报*, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- Liu C Y, Chen C L, Gong X F, *et al.* Progress in research of iron plaque on root surface of wetland plants [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2014, **34**(10): 2470-2480.
- [32] Fu Y Q, Yang X J, Shen H. Root iron plaque alleviates cadmium toxicity to rice (*Oryza sativa*) seedlings [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **161**: 534-541.
- [33] 刘侯俊, 李雪平, 韩晓日, 等. 镉处理根表铁膜对水稻吸收镉、锰、铜、锌的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, **19**(6): 1356-1365.
- Liu H J, Li X P, Han X R, *et al.* Influence of iron plaque on Cd, Mn, Cu and Zn uptakes of rice seedlings under different Cd treatments [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2013, **19**(6): 1356-1365.
- [34] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- Fu Y Q, Yu Z W, Cai K Z, *et al.* Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review [J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2010, **16**(6): 1527-1534.
- [35] 潘杨, 赵玉杰, 周其文, 等. 南方稻区土壤 pH 变化对稻米吸收镉的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2015, **43**(16): 235-238.
- Pan Y, Zhao Y J, Zhou Q W, *et al.* Influence of soil pH on cadmium absorption by rice in main rice production region of South China [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2015, **43**(16): 235-238.
- [36] 徐薇, 杨益新, 李文华, 等. 锰离子浓度及其转运通道对水稻幼苗镉吸收转运特性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2016, **35**(8): 1429-1435.
- Xu Y, Yang Y X, Li W H, *et al.* Effects of manganese concentrations and transporters on uptake and translocation of cadmium in rice seedlings [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2016, **35**(8): 1429-1435.
- [37] Sasaki A, Yamaji N, Ma J F. Overexpression of *OsHMA3* enhances Cd tolerance and expression of Zn transporter genes in rice [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014, **65**(20): 6013-6021.
- [38] 罗一诺, 张慕欣, 高玉, 等. 旱地石灰性土壤上长期施磷对小麦籽粒铁锰铜锌含量的影响 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2021, **27**(11): 1894-1904.
- Luo Y N, Zhang M X, Gao Y, *et al.* Wheat grain Fe, Mn, Cu and Zn contents as affected by long-term P application in dryland calcareous soil [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2021, **27**(11): 1894-1904.
- [39] 廖启林, 刘聪, 王轶, 等. 水稻吸收 Cd 的地球化学控制因素研究——以苏锡常典型区为例 [J]. *中国地质*, 2015, **42**(5): 1621-1632.
- Liao Q L, Liu C, Wang Y, *et al.* Geochemical characteristics of rice uptake of cadmium and its main controlling factors: a case study of the Suxichang (Suzhou-Wuxi-Changzhou) typical area [J]. *Geology in China*, 2015, **42**(5): 1621-1632.
- [40] Arai Y, Kawasaki A, Baba K, *et al.* Effects of water management on cadmium and arsenic accumulation and dimethylarsinic acid concentrations in Japanese rice [J]. *Environmental Science and Technology*, 2009, **43**(24): 9361-9367.
- [41] 熊婕, 朱奇宏, 黄道友, 等. 南方典型稻区稻米镉累积量的预测模型研究 [J]. *农业环境科学学报*, 2019, **38**(1): 22-28.
- Xiong J, Zhu Q H, Huang D Y, *et al.* Prediction model for the accumulation of cadmium in rice in typical paddy fields of South China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, **38**(1): 22-28.
- [42] Qiu G Y, Zhu M, Meng J, *et al.* Changes in soil microbial biomass C, ATP and microbial ATP concentrations due to increasing soil Cd levels in Chinese paddy soils growing rice (*Oryza sativa*) [J]. *Plant and Soil*, 2019, **436**(1-2): 1-12.
- [43] 杨定清, 李霞, 周娅, 等. 影响水稻吸收镉的环境因子分析 [J]. *西南农业学报*, 2016, **29**(10): 2496-2500.
- Yang D Q, Li X, Zhou Y, *et al.* Analysis of environmental factors affecting cadmium uptake in rice [J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2016, **29**(10): 2496-2500.
- [44] 宋波, 肖乃川, 马丽钧, 等. 基于 DGT 技术的广西碳酸盐岩区稻米镉含量主控因素 [J]. *环境科学*, 2022, **43**(1): 463-471.
- Song B, Xiao N C, Ma L J, *et al.* Main control factors of cadmium content in rice in carbonate rock region of Guangxi based on the DGT technique [J]. *Environmental Science*, 2022, **43**(1): 463-471.

- 463-471.
- [45] 闫家普, 丁效东, 崔良, 等. 不同改良剂及其组合对土壤镉形态和理化性质的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- Yan J P, Ding X D, Cui L, *et al.* Effects of several modifiers and their combined application on cadmium forms and physicochemical properties of soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, **37**(9): 1842-1849.
- [46] Li X W, Zhang Q W, Yang B. Co-precipitation with  $\text{CaCO}_3$  to remove heavy metals and significantly reduce the moisture content of filter residue[J]. *Chemosphere*, 2020, **239**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2019.124660.
- [47] Xie X J, Yan L, Li J X, *et al.* Cadmium isotope fractionation during Cd-calcite coprecipitation: insight from batch experiment[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, **760**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2020.143330.
- [48] 宋波, 曾伟铨. 土壤有机质对镉污染土壤修复的影响[J]. 土壤通报, 2015, **46**(4): 1018-1024.
- Song B, Zeng W Q. Effects of organic matter on the remediation of cadmium-contaminated soil-a review[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2015, **46**(4): 1018-1024.
- [49] 张磊, 宋凤斌. 土壤吸附重金属的影响因素研究现状及展望[J]. 土壤通报, 2005, **36**(4): 628-631.
- Zhang L, Song F B. Adsorption of heavy metals by soils and its affecting factors[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2005, **36**(4): 628-631.
- [50] Liu J G, Qian M, Cai G L, *et al.* Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **143** (1-2): 443-447.
- [51] Liu B, Chen L, Chen S B, *et al.* Subcellular Cd accumulation characteristic in root cell wall of rice cultivars with different sensitivities to Cd stress in soil[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2016, **15**(9): 2114-2122.
- [52] Li Y, Pang H D, He L Y, *et al.* Cd immobilization and reduced tissue Cd accumulation of rice (*Oryza sativa* wuyun-23) in the presence of heavy metal-resistant bacteria[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, **138**: 56-63.
- [53] Nocito F F, Lancilli C, Dendena B, *et al.* Cadmium retention in rice roots is influenced by cadmium availability, chelation and translocation[J]. *Plant, Cell and Environment*, 2011, **34** (6): 994-1008.
- [54] 文志琦, 赵艳玲, 崔冠男, 等. 水稻营养器官镉积累特性对稻米镉含量的影响[J]. 植物生理学报, 2015, **51**(8): 1280-1286.
- Wen Z Q, Zhao Y L, Cui G N, *et al.* Effects of cadmium accumulation characteristics in vegetative organs on cadmium content in grains of rice[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, **51** (8): 1280-1286.
- [55] 曹胜, 欧阳梦云, 周卫军, 等. 石灰对土壤重金属污染修复的研究进展[J]. 中国农学通报, 2018, **34**(26): 109-112.
- Cao S, Ouyang M Y, Zhou W J, *et al.* Remediation of heavy metal contaminated soils by lime: a review[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2018, **34**(26): 109-112.



## CONTENTS

|                                                                                                                                                                |                                                            |         |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|---------|
| Prediction of Autumn Ozone Concentration in the Pearl River Delta Based on Machine Learning                                                                    | CHEN Zhen, LIU Run, LUO Zheng, <i>et al.</i>               | ( 1 )   |
| Remote Sensing Model for Estimating Atmospheric PM <sub>2.5</sub> Concentration in the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area                              | DAI Yuan-yuan, GONG Shao-qi, ZHANG Cun-jie, <i>et al.</i>  | ( 8 )   |
| Variation Characteristics of PM <sub>2.5</sub> Pollution and Transport in Typical Transport Channel Cities in Winter                                           | DAI Wu-jun, ZHOU Ying, WANG Xiao-qi, <i>et al.</i>         | ( 23 )  |
| Characteristics of Secondary Inorganic Ions in PM <sub>2.5</sub> and Its Influencing Factors in Summer in Zhengzhou                                            | HE Bing, YANG Jie-ru, XU Yi-fei, <i>et al.</i>             | ( 36 )  |
| Characteristics and Source Apportionment of Carbonaceous Aerosols in the Typical Urban Areas in Chongqing During Winter                                        | PENG Chao, LI Zhen-liang, XIANG Ying, <i>et al.</i>        | ( 48 )  |
| Analysis of Influencing Factors of Ozone Pollution Difference Between Chengdu and Chongqing in August 2022                                                     | CHEN Mu-lan, LI Zhen-liang, PENG Chao, <i>et al.</i>       | ( 61 )  |
| Analysis of O <sub>3</sub> Pollution Affected by a Succession of Three Landfall Typhoons in 2020 in Eastern China                                              | HUA Cong, YOU Yuan, WANG Qian, <i>et al.</i>               | ( 71 )  |
| Characteristics and Source Apportionment of VOCs Initial Mixing Ratio in Beijing During Summer                                                                 | ZHANG Bo-tao, JING Kuan, WANG Qin, <i>et al.</i>           | ( 81 )  |
| Review of Comprehensive Evaluation System of Vehicle Pollution and Carbon Synergistic Reduction                                                                | FAN Zhao-yang, TONG Hui, LIANG Xiao-yu, <i>et al.</i>      | ( 93 )  |
| Study of Peak Carbon Emission of a City in Yangtze River Delta Based on LEAP Model                                                                             | YANG Feng, ZHANG Gui-chi, SUN Ji, <i>et al.</i>            | ( 104 ) |
| Driving Forces and Mitigation Potential of CO <sub>2</sub> Emissions for Ship Transportation in Guangdong Province, China                                      | WENG Shu-juan, LIU Ying-ying, TANG Feng, <i>et al.</i>     | ( 115 ) |
| Carbon Emission Characteristics and Influencing Factors of Typical Processes in Drinking Water Treatment Plant                                                 | ZHANG Xiang-yu, HU Jian-kun, MA Kai, <i>et al.</i>         | ( 123 ) |
| Distribution Characteristics of Arsenic in Drinking Water in China and Its Health Risk Based on Disability-adjusted Life Years                                 | DOU Dian-cheng, QI Rong, XIAO Shu-min, <i>et al.</i>       | ( 131 ) |
| Spatiotemporal Occurrence of Organophosphate Esters in the Surface Water and Sediment of Taihu Lake and Relevant Risk Assessment                               | ZHANG Cheng-nuo, ZHONG Qin, LUAN Bo-wen, <i>et al.</i>     | ( 140 ) |
| Exposure Level and Risk Impact Assessment of Pesticides and Veterinary Drugs in Aquaculture Environment                                                        | ZHANG Kai-wen, ZHANG Hai-yan, KONG Cong, <i>et al.</i>     | ( 151 ) |
| Variation in Phosphorus Concentration and Flux at Zhutuo Section in the Yangtze River and Source Apportionment                                                 | LOU Bao-feng, XIE Wei-min, HUANG Bo, <i>et al.</i>         | ( 159 ) |
| “Load-Unload” Effect of Manganese Oxides on Phosphorus in Surface Water of the Pearl River Estuary                                                             | LI Rui, LIANG Zuo-bing, WU Qi-rui, <i>et al.</i>           | ( 173 ) |
| Factors Influencing the Variation in Phytoplankton Functional Groups in Fuchunjiang Reservoir                                                                  | ZHANG Ping, WANG Wei, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i>         | ( 181 ) |
| Hydrochemical Characteristics and Formation Mechanism of Groundwater in the Western Region of Hepu Basin, Beihai City                                          | CHEN Wen, WU Ya, ZHANG Hong-xin, <i>et al.</i>             | ( 194 ) |
| Controlling Factors of Groundwater Salinization and Pollution in the Oasis Zone of the Cherchen River Basin of Xinjiang                                        | LI Jun, OUYANG Hong-tao, ZHOU Jin-long                     | ( 207 ) |
| Spatial-temporal Evolution of Ecosystem Health and Its Influencing Factors in Beijing-Tianjin-Hebei Region                                                     | LI Kui-ming, WANG Xiao-yan, YAO Luo-lan                    | ( 218 ) |
| Spatial and Temporal Evolution and Impact Factors Analysis of Ecosystem Service Value in the Liaohe River Delta over the Past 30 Years                         | WANG Geng, ZHANG Fu-rong                                   | ( 228 ) |
| Effects of Photovoltaic Power Station Construction on Terrestrial Environment: Retrospect and Prospect                                                         | TIAN Zheng-qing, ZHANG Yong, LIU Xiang, <i>et al.</i>      | ( 239 ) |
| Spatiotemporal Evolution and Quantitative Attribution Analysis of Vegetation NDVI in Greater Khingan Mountains Forest-Steppe Ecotone                           | SHI Song, LI Wen, QU Chen, <i>et al.</i>                   | ( 248 ) |
| Spatio-temporal Variation in Net Primary Productivity of Different Vegetation Types and Its Influencing Factors Exploration in Southwest China                 | XU Yong, ZHENG Zhi-wei, MENG Yu-chi, <i>et al.</i>         | ( 262 ) |
| Impacts of Extreme Climate Events at Different Altitudinal Gradients on Vegetation NPP in Songhua River Basin                                                  | CUI Song, JIA Zhao-yang, GUO Liang, <i>et al.</i>          | ( 275 ) |
| Spatial and Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Kunming City Based on InVEST and CA-Markov Model                                            | Paruke Wusimanjiang, AI Dong, FANG Yi-shu, <i>et al.</i>   | ( 287 ) |
| Spatial-Temporal Evolution and Prediction of Carbon Storage in Jiuquan City Ecosystem Based on PLUS-InVEST Model                                               | SHI Jing, SHI Pei-ji, WANG Zi-yang, <i>et al.</i>          | ( 300 ) |
| Soil Carbon Pool Allocation Dynamics During Soil Development in the Lower Yangtze River Alluvial Plain                                                         | HU Dan-yang, ZHANG Huan, SU Bao-wei, <i>et al.</i>         | ( 314 ) |
| Spatial Distribution Patterns of Soil Organic Carbon in Karst Forests of the Lijiang River Basin and Its Driving Factors                                       | SHEN Kai-hui, WEI Shi-guang, LI Lin, <i>et al.</i>         | ( 323 ) |
| Effect of Land Use on the Stability of Soil Organic Carbon in a Karst Region                                                                                   | CHEN Jian-qi, JIA Ya-nan, HE Qiu-fang, <i>et al.</i>       | ( 335 ) |
| Spatial Distribution Characteristics of Soil Carbon and Nitrogen in Citrus Orchards on the Slope of Purple Soil Hilly Area                                     | LI Zi-yang, CHEN Lu, ZHAO Peng, <i>et al.</i>              | ( 343 ) |
| Effects of Experimental Nitrogen Deposition and Litter Manipulation on Soil Organic Components and Enzyme Activity of Latosol in Tropical Rubber Plantations   | XUE Xin-xin, REN Chang-qi, LUO Xue-hua, <i>et al.</i>      | ( 354 ) |
| Analysis on Driving Factors, Reduction Potential, and Environmental Effect of Inorganic Fertilizer Input in Chongqing                                          | LIANG Tao, ZHAO Jing-kun, LI Hong-mei, <i>et al.</i>       | ( 364 ) |
| Research Progress on Distribution, Transportation, and Control of Per- and Polyfluoroalkyl Substances in Chinese Soils                                         | LIU Hao-ran, XING Jing-yi, REN Wen-jie                     | ( 376 ) |
| Prediction of Spatial Distribution of Heavy Metals in Cultivated Soil Based on Multi-source Auxiliary Variables and Random Forest Model                        | XIE Xue-feng, GUO Wei-wei, PU Li-jie, <i>et al.</i>        | ( 386 ) |
| Health Risk Assessment and Priority Control Factors Analysis of Heavy Metals in Agricultural Soils Based on Source-oriented                                    | MA Jie, GE Miao, WANG Sheng-lan, <i>et al.</i>             | ( 396 ) |
| Contamination Characteristics and Source Apportionment of Soil Heavy Metals in an Abandoned Pyrite Mining Area of Tongling City, China                         | LI Ru-zhong, LIU Yu-hao, HUANG Yan-huan, <i>et al.</i>     | ( 407 ) |
| Source Appointment and Assessment of Heavy Metal Pollution in Surface Dust in the Main District Bus Stops of Tianshui City                                     | LI Chun-yan, WANG Xin-min, WANG Hai, <i>et al.</i>         | ( 417 ) |
| Response of Cadmium in Soil-rice to Different Conditioners Based on Field Trials                                                                               | TANG Le-bin, LIU Xin-cai, SONG Bo, <i>et al.</i>           | ( 429 ) |
| Regulation Effects of Humus Active Components on Soil Cadmium Availability and Critical Threshold for Rice Safety                                              | HU Xiu-zhi, SONG Yi, WANG Tian-yu, <i>et al.</i>           | ( 439 ) |
| Using Biochar and Iron-calcium Material to Remediate Paddy Soil Contaminated by Cadmium and Arsenic                                                            | WU Qiu-chan, WU Ji-zi, ZHAO Ke-li, <i>et al.</i>           | ( 450 ) |
| Research Progress on Characteristics of Human Microplastic Pollution and Health Risks                                                                          | MA Min-dong, ZHAO Yang-chen, ZHU Long, <i>et al.</i>       | ( 459 ) |
| Effects of Polystyrene Microplastics Combined with Cadmium Contamination on Soil Physicochemical Properties and Physiological Ecology of <i>Lactuca sativa</i> | NIU Jia-rui, ZOU Yong-jun, JIAN Min-fei, <i>et al.</i>     | ( 470 ) |
| Transcriptome Analysis of Plant Growth-promoting Bacteria Alleviating Microplastic and Heavy Metal Combined Pollution Stress in Sorghum                        | LIU Yong-qi, ZHAO Si-yu, REN Xue-min, <i>et al.</i>        | ( 480 ) |
| Effects of Microplastics on the Leaching of Nutrients and Cadmium from Soil                                                                                    | ZHAO Qun-fang, CHU Long-wei, DING Yuan-hong, <i>et al.</i> | ( 489 ) |
| Effect of Microplastics and Phenanthrene on Soil Chemical Properties, Enzymatic Activities, and Microbial Communities                                          | LIU Sha-sha, QIN Jian-qiao, WU Xian-ge                     | ( 496 ) |
| Prediction of Soil Bacterial Community Structure and Function in Minqin Desert-oasis Ecotone Artificial <i>Haloxylon ammodendron</i> Forest                    | WANG An-lin, MA Rui, MA Yan-jun, <i>et al.</i>             | ( 508 ) |
| Response of Soil Fungal Community to Biochar Application Under Different Irrigation Water Salinity                                                             | ZHENG Zhi-yu, GUO Xiao-wen, MIN Wei                        | ( 520 ) |
| Effects of Organic Fertilizer of Kitchen Waste on Soil Microbial Activity and Function                                                                         | LIU Mei-ling, WANG Yi-min, JIN Wen-hao, <i>et al.</i>      | ( 530 ) |
| Response Characteristics of Soil Fungal Community Structure to Long-term Continuous Cropping of Pepper                                                         | CHEN Fen, YU Gao, WANG Xie-feng, <i>et al.</i>             | ( 543 ) |
| Effects of Foliar Application of Silicon Fertilizers on Phyllosphere Bacterial Community and Functional Genes of Paddy Irrigated with Reclaimed Water          | LIANG Sheng-xian, LIU Chun-cheng, HU Chao, <i>et al.</i>   | ( 555 ) |
| Analysis of Bacterial Communities and Antibiotic Resistance Genes in the Aquaculture Area of Changli County                                                    | WANG Qiu-shui, CHENG Bo, LIU Yue, <i>et al.</i>            | ( 567 ) |
| High-throughput qPCR and Amplicon Sequencing as Complementary Methods for Profiling Antibiotic Resistance Genes in Urban Wetland Parks                         | HUANG Fu-yi, ZHOU Shu-yi-dan, PAN Ting, <i>et al.</i>      | ( 576 ) |
| Characteristics of Vertical Distribution and Environmental Factors of Antibiotics in Quaternary Sedimentary Column in Urban Areas                              | LIU Ke, TONG Lei, GAN Cui, <i>et al.</i>                   | ( 584 ) |
| Adsorption Performance and Mechanism of Oxytetracycline in Water by KOH Modified Biochar Derived from Corn Straw                                               | LIU Zong-tang, SUN Yu-feng, FEI Zheng-hao, <i>et al.</i>   | ( 594 ) |
| Comparison of Pb <sup>2+</sup> Adsorption Properties of Biochars Modified Through CO <sub>2</sub> Atmosphere Pyrolysis and Nitric Acid                         | JIANG Hao, CHEN Rui-zhi, ZHU Zi-yang, <i>et al.</i>        | ( 606 ) |