



请通过网上投稿系统投稿 网址:http://www.aes.org.cn

## 基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价

李义纯, 王艳红, 陈勇, 唐明灯, 李奇, 李林峰, 林晓扬, 尹贻龙, 艾绍英

引用本文:

李义纯, 王艳红, 陈勇, 等. 基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1219-1228.

在线阅读 View online: https://doi.org/10.11654/jaes.2020-1397

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

Cd污染农田的炭基修复方案设计和效果评价

魏岚,黄连喜,刘晓文,李翔,张建文,涂新红,黄庆,吴颖欣,刘忠珍 农业环境科学学报. 2020, 39(10): 2277-2287 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0739

## 稻秆炭与巨菌草联合对铜镉污染土壤的修复

王玺洋,辛在军,李晓晖,李亮,孙小艳,闵芳芳 农业环境科学学报.2021,40(1):74-82 https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0878

混合无机改良剂对酸性多重金属污染土壤的改良效应

郭荣荣, 黄凡, 易晓媚, 龙新宪 农业环境科学学报. 2015(4): 686-694 https://doi.org/10.11654/jaes.2015.04.012

土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究

何赢, 杜平, 石静, 秦晓鹏, 徐刚, 吴明红 农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1734-1740 https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1423

羟基磷灰石+沸石对稻田土壤中铅镉有效性及糙米中铅镉累积的影响 邹紫今,周航,吴玉俊,周歆,朱维,曾敏,彭佩钦,廖柏寒 农业环境科学学报.2016,35(1):45-52 https://doi.org/10.11654/jaes.2016.01.006



关注微信公众号,获得更多资讯信息

#### 农业环境科学学报 Journal of Agro-Environment Science

李义纯, 王艳红, 陈勇, 等. 基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价[J]. 农业环境科学学报, 2021, 40(6): 1219-1228.

LI Yi-chun, WANG Yan-hong, CHEN Yong, et al. A comprehensive evaluation of remediation effects on cadmium contamination in paddy fields based on soil quality[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2021, 40(6): 1219–1228.



## 基于土壤质量的改良剂修复镉污染稻田综合效果评价

李义纯<sup>1,2,3</sup>, 王艳红<sup>1,2,3</sup>, 陈勇<sup>1,2,3</sup>, 唐明灯<sup>1,2,3</sup>, 李奇<sup>1,2,3</sup>, 李林峰<sup>1,2,3</sup>, 林晓扬<sup>1</sup>, 尹贻龙<sup>1</sup>, 艾绍英<sup>1,2,3\*</sup>

(1.广东省农业科学院农业资源与环境研究所,广州 510640; 2.农业部南方植物营养与肥料重点实验室,广州 510640; 3.广东 省养分资源循环利用与耕地保育重点实验室,广州 510640)

摘 要:受污染农田修复技术应用效果的综合评价,在当前我国土壤污染管控与修复工作中尤为重要和紧迫。本文针对自主研发的改良剂,在我国华南地区受镉(Cd)污染的水稻种植区开展野外大田试验,重点围绕土壤环境、肥力和健康质量的变化,探索改良剂施用对土壤质量的影响;选择DTPA浸提态Cd、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、阳离子交换量(CEC)、糙米Cd和稻谷产量构建指标体系,利用动态加权综合评价模型评判改良剂的修复效果。结果表明,当改良剂施用量为6000kg·hm<sup>-2</sup>和7500kg·hm<sup>-2</sup>时,DTPA浸提态Cd含量分别减少10.5%和8.8%。当改良剂用量为6000kg·hm<sup>-2</sup>时,有机质含量减小6.3%;改良剂没有显著影响碱解氮、有效磷和CEC含量,但是显著提高了速效钾含量。当改良剂用量为1500kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米Cd含量增加23.9%;当改良剂用量≥4500kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米Cd含量显著低于国家标准,且修复效率(RE)均超过40%。当改良剂用量为4500kg·hm<sup>-2</sup>时,稻谷产量增加18.7%。采用动态加权综合评价模型研究发现,当用量为6000kg·hm<sup>-2</sup>时,改良剂修复Cd污染稻田的综合效果最佳。

关键词:改良剂;镉(Cd)污染稻田;修复效果评估;土壤质量;动态加权综合评价模型

中图分类号:X53;X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2021)06-1219-10 doi:10.11654/jaes.2020-1397

# A comprehensive evaluation of remediation effects on cadmium contamination in paddy fields based on soil quality

LI Yi-chun<sup>1,2,3</sup>, WANG Yan-hong<sup>1,2,3</sup>, CHEN Yong<sup>1,2,3</sup>, TANG Ming-deng<sup>1,2,3</sup>, LI Qi<sup>1,2,3</sup>, LI Lin-feng<sup>1,2,3</sup>, LIN Xiao-yang<sup>1</sup>, YIN Yi-long<sup>1</sup>, AI Shao-ying<sup>1,2,3\*</sup>

(1.Institute of Agricultural Resources and Environment, Guangdong Academy of Agricultural Sciences, Guangzhou 510640, China; 2.Key Laboratory of Plant Nutrition and Fertilizer in South Region, Ministry of Agriculture, Guangzhou 510640, China; 3. Guangdong Key Laboratory of Nutrient Cycling and Farmland Conservation, Guangzhou 510640, China)

**Abstract:** At present, it is overly important and urgent to carry out a comprehensive evaluation of the effects of some current remediation technologies against cadmium (Cd) contamination in paddy fields in China, which play a key role in promoting the control and remediation of soil pollution. In this study, a self-developed amendment was selected, and a field experiment was carried out in a rice-growing region in South China to investigate the effects of the amendment application on the soil environment, fertility, and health. Additionally, DTPA extractable Cd, organic matter, alkaline hydrolytic nitrogen, available phosphorus and potassium, cation exchange capacity (CEC), brown

收稿日期:2020-12-03 录用日期:2021-02-09

\*通信作者:艾绍英 E-mail:ycli724@hotmail.com,aishaoying@gdaas.cn

作者简介:李义纯(1979—),男,湖北汉川人,博士,副研究员,主要从事农田重金属污染与修复研究。E-mail:yichunli@gdaas.cn

基金项目:国家自然科学基金项目(41403104);广东省自然科学基金项目(2014A030313768);广东省重点领域研发计划项目(2019B020218002); 广东省农业科技创新及推广项目(2019KJ118);广东农业科技创新及推广项目(2019KJ118);广东省农业科学院农业优势产业学科团队 建设项目(202120TD)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (41403104); The Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (2014A030313768); The Research and Development Foundation for Key Research of Guangdong Province, China (2019B020218002); The Agricultural Science and Technology Innovation and Popularization Foundation of Guangdong Province, China (2019KJ118); Agricultural Competitive Industry Discipline Team Building Project of Guangdong Academy of Agricultural Sciences (202120TD)

rice Cd, and rice yield were selected to construct a comprehensive evaluation index system, which was used to comprehensively evaluate the remediation effect of the amendment application in Cd-contaminated paddy fields according to a dynamic weighted comprehensive evaluation method. The results showed that the concentrations of DTPA extractable Cd in treatments of 6 000 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> and 7 500 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> were reduced by 10.5% and 8.8% from the control treatment, respectively. The soil organic matter content in the 6 000 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> treatment decreased by 6.3% compared with the control. Amendment application did not significantly affect alkaline hydrolytic nitrogen and available phosphorus contents and CEC but significantly increased available potassium content. Application at a rate of 1 500 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> significantly increased brown rice Cd content by 23.9%. When the application rate was  $\geq$ 4 500 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup>, brown rice Cd content was significantly lower than the *National Food Safety Standard*. Moreover, the remediation efficiency (RE) was more than 40%. The 4 500 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> treatment significantly elevated the rice yield, representing an 18.7% increase from the control treatment. The dynamic weighted comprehensive evaluation method's results showed that the comprehensive remediation effect of amendment application at a rate of 6 000 kg  $\cdot$  hm<sup>-2</sup> on Cdcontaminated paddy fields was optimal.

Keywords: amendment; Cd-contaminated paddy fields; remediation effect evaluation; soil quality; dynamic weighted comprehensive evaluation method

我国农田土壤污染目前已成为威胁生态系统稳 定、农产品质量安全和人体健康的重大环境问题之 一<sup>[1-3]</sup>。其中,重金属污染问题较为突出:镉(Cd)、汞 (Hg)、砷(As)、铅(Pb)4种污染物的含量分布呈现从 西北到东南、从东北到西南方向逐渐升高的态势;耕 地Cd污染点位超标率高达7.0%,在8种被调查的重 金属[Cd、Hg、As、铜(Cu)、Pb、铬(Cr)、锌(Zn)和镍 (Ni)]中排第一<sup>[4]</sup>。对此,我国科学家在修复技术与产 品研发方面开展了许多研究,尽管与发达国家相比 起步较晚,但进展迅速,有的已处于国际领先地位<sup>151</sup>。 值得关注的是,这些修复技术在有效降低作物可食 用部位重金属含量的同时,也可能对农田土壤质量 产生正面或者负面的影响。最近的研究报道,改良 剂施用不仅会提高稻田土壤 pH、容重和阳离子交换 量(CEC)<sup>[7]</sup>、有机质<sup>[8]</sup>、有效磷和碱解氮含量<sup>[9]</sup>以及细 菌和放线菌数量109,而且还会破坏土壤团粒结构101、 降低土壤中铁(Fe)、锰(Mn)的生物有效性<sup>[12]</sup>以及水 稻糙米中微量元素[Fe、镁(Mg)、Mn和Cul<sup>113]</sup>和直链淀 粉<sup>[8]</sup>的含量。因此,在目前修复技术层出不穷的背景 下,选择合适的指标体系构建修复效果评价模型,科 学评判这些技术的修复效果,对推进我国土壤污染 管控与修复工作有着重要的时代意义。

在以往关于修复技术的可行性和适宜性的评价 中,研究人员所关注的指标大多集中在重金属生物 有效性和农产品重金属含量<sup>[14-19]</sup>,而对土壤质量的变 化关注尚少<sup>[20-22]</sup>。刘佳炜等<sup>[17]</sup>依据土壤中有效态Cd、 水稻各部位Cd和糙米Cd含量的下降程度,研究发现 组配改良剂(石灰石+海泡石)(4 500 kg·hm<sup>-2</sup>)、基施 硅肥(90 kg·hm<sup>-2</sup>)及叶面喷施硅肥(0.4 g·L<sup>-1</sup>)的组合 技术的修复效果最佳,可以实现中重度Cd污染稻田 水稻安全生产。Deng 等[18]在研究氮磷钾不同配比肥 料单施及其与分蘖期锰肥追施联合修复Cd污染稻田 的过程中,结合土壤中有效态Cd和糙米Cd含量,以 及水稻不同组织器官中Cd的分布特征,评价了不同 施肥模式的修复效果。周利军等四在4种调理剂修复 效果的评价过程中,除考虑了土壤有效态Cd和糙米 Cd含量变化以外,还考虑了调理剂对土壤 pH、容重、 有机质、速效养分、质地和微团聚体等理化性质的影 响,但没有利用合适的评价模型对不同调理剂的修 复效果进行综合评价。何赢等<sup>[22]</sup>以土壤有效态Cd、 糙米Cd、修复成本和产量为指标,构建了动态加权综 合评价模型,综合评价了7种钝化剂的修复效果及适 用性,但尚未考虑各种钝化剂对土壤理化性质的影 响。在土壤学领域,土壤质量是土壤环境、肥力及健 康质量三方面的综合量度[23],是土壤维持生态系统的 生产力、保障环境质量、促进动物和人类健康的能力 基础[24]。土壤质量的改变,会直接或者间接地影响作 物的正常生产和生态系统的持续稳定[5,24]。因此,基 于土壤环境、肥力和健康质量三方面的变化构建综 合评价体系,势必能更加科学有效地评价各种修复 技术的应用效果。

本研究在我国华南地区受Cd污染的水稻种植区 开展野外大田试验,以自主研发的改良剂<sup>[25]</sup>为供试材 料,重点围绕土壤环境(采用DTPA浸提态Cd含量评 价)、肥力(采用有机质、碱解氮、有效磷、速效钾和 CEC含量评价)和健康质量(采用糙米Cd含量评价) 的变化,探索改良剂施用对土壤质量的影响;选择 DTPA浸提态Cd、有机质、碱解氮、有效磷、速效钾、 CEC、糙米Cd及稻谷产量构建综合指标体系,利用动 态加权综合评价模型<sup>[22,26]</sup>评判改良剂的修复效果。 本研究成果可为后期改良剂的大范围应用与推广提 供科学依据,并为当前我国受污染农田修复技术效 果评估体系的构建提供重要参考。

## 1 材料与方法

## 1.1 供试材料

改良剂是本团队自主研发产品,主要成分为硅 酸钙、熟石灰、硫酸钾、无水硫酸镁和九水合硝酸 铁[25]。这些成分都是我国常见的农用肥料,对土壤的 肥力和环境质量都会产生潜在的影响。一方面,改 良剂中所含的钙离子、钾离子和硝酸根,会分别影响 土壤中有效磷、速效钾和碱解氮的含量;另一方面, 钙(Ca)、钾(K)、Mg、Fe等盐基离子,会通过影响土壤 固相表面盐基离子的数量而影响 CEC; 另外, 土壤 有机质可作为电子供体参与氧化还原过程[27],其含 量也会因硫酸根、硝酸根和三价铁作为电子受体 参与氧化还原过程而受到影响。本团队以往的研 究也发现,这种改良剂会通过提高土壤pH、促进无定 形铁矿物对Cd吸附或与Cd共沉淀,以及铁硫化物与 Cd共沉淀来影响土壤中有效态Cd含量[25,28]。改良剂 的总Cd含量为0.1 mg·kg<sup>-1</sup>,低于《肥料中砷、镉、铅、 铬、汞生态指标》(GB/T 23349-2009)中Cd的限量值 (≤0.001%)

## 1.2 田间小区试验设计

于 2020年3月至2020年7月,在广东省兴宁市 寺岗村水稻田(24.34°N,115.69°E)开展田间试验。 试验前,土壤的理化性质为:pH 6.2,有机质54.3 g· kg<sup>-1</sup>,碱解氮181.6 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷20.5 mg·kg<sup>-1</sup>,速效 钾 139.4 mg·kg<sup>-1</sup>,CEC 14.7 cmol·kg<sup>-1</sup>。土壤中总Cd 含量为0.5 mg·kg<sup>-1</sup>,超过《土壤环境质量农用地土壤 污染风险管控标准(试行)》(GB 15618—2018)中Cd 的风险筛选值(水田,5.5<pH<6.5,0.4 mg·kg<sup>-1</sup>),但低 于污染风险管制值(水田,5.5<pH<6.5,2.0 mg·kg<sup>-1</sup>), 说明在该区域进行水稻种植,存在糙米Cd含量超过 《食品安全国家标准食品中污染物限量》(GB 2762— 2017)中Cd限量值(0.2 mg·kg<sup>-1</sup>)(以下简称国家标 准)的风险,原则上需要对其进行修复。

田间试验小区的布置过程及方法同本团队以往的报道<sup>[28]</sup>,主要为:试验前,对整个试验区域采用旋耕机进行第一次均匀耙田;改良剂撒施结束后,随即进行第二次人工耙田,确保改良剂与表层土壤(0~20 cm)混合均匀。每个试验小区的面积为20 m<sup>2</sup>(长5.0 m,宽4.0 m);小区之间用田基(宽0.3 m,高0.3 m)隔

离,并用黑色塑料薄膜将其覆盖至田面以下 0.3 m;每 个小区实行单排单灌,进、排水渠的宽度为 0.5 m;小 区以外区域设置保护行。参考本团队前期研究成 果<sup>[25]</sup>,按照改良剂的施用量设置 6 种处理,即:0(control)、1 500(T1500)、3 000(T3000)、4 500(T4500)、 6 000(T6000) kg·hm<sup>-2</sup>和 7 500(T7500)kg·hm<sup>-2</sup>,每种 处理 3 次重复。改良剂通过人工撒施完毕后,随即对 每个试验小区持续淹水(淹水层高出田面约 5.0 cm) 7 d,最后再进行秧苗移栽(25 株·m<sup>-2</sup>,秧苗 3 棵· 株<sup>-1</sup>)。

按照当地水稻种植习惯进行施肥、除草、防病虫 害及灌溉等田间管理。于抛秧前1d内,人工撒施水 稻专用肥(N+P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>+K<sub>2</sub>O≥35%,南通正联肥料有限公 司生产),施用量为300 kg·hm<sup>-2</sup>;分别于抛秧后的第 15 d和第30 d,再次人工撒施水稻专用肥,每次施用 量都为250 kg·hm<sup>-2</sup>。在水稻生长期间,喷施除草剂 (苄·丁,江苏快达农化股份有限公司生产;吡嘧·丙 草胺,广西田园生化股份有限公司生产)1次和农药 (阿维菌素,郑州汉翔化工产品有限公司生产;春雷 霉素,赣州宇田化工有限公司生产)2次。在分蘖末 期,各试验小区淹水层高出田面约1.0 cm;在成熟收 割前20 d,对各试验小区排水烤田,田面无明显淹水 层;除此之外,在水稻的其他生育期,各试验小区淹 水层均高出田面约5.0 cm。

## 1.3 采样及指标测定

在对试验区域第一次均匀耙田后,运用对角线 布点法采集土壤表层(0~20 cm)样品,经自然风干、研 磨和过筛后,再测定其理化性质和总Cd含量<sup>[29]</sup>;利用 土壤标准样品GBW07387(GSS-31)(地球物理地球 化学勘查研究所IGGE生产)对整个消解和测定分析 过程进行质量控制,标样中Cd的回收率为98.8%。

另外,于水稻成熟收割的前1d内,运用对角线 布点法在各小区"一对一"采集根际土壤鲜样和稻谷 样品,将其置于4℃车载冰箱中,在24h内带回实验 室。将根际土壤样品转至-80℃超低温冷藏箱中冷 冻24h后,再对其进行真空冷冻干燥处理、研磨和过 筛,然后采用DTPA浸提法提取和测定有效态Cd含 量<sup>[30]</sup>,按照文献[29]的方法依次进行有机质、碱解氮、 有效磷、速效钾和CEC的测定与分析。将稻谷样品 晾晒至恒质量,再对其进行脱粒、脱壳、研磨和消 解<sup>[31]</sup>,然后采用石墨炉原子吸收光谱仪(PE AA600) 测定消解液中Cd的含量,同时利用植物标准样品 GBW10048(GSB-26)(地球物理地球化学勘查研究

www.aer.org.cn

所IGGE生产)对整个消解和分析测定过程进行质量 控制,标样中Cd的回收率为95.6%。

## 1.4 修复效率计算

按照对照组和处理组糙米Cd含量的差值与对照 组糙米Cd含量的比值计算修复效率(Remediation efficiency, RE),即:

$$RE = [(C_0 - C_n)/C_0] \times 100\%$$
(1)

式中: $C_0$ 为对照组糙米Cd含量,mg·kg<sup>-1</sup>; $C_n$ 为处理组 糙米Cd含量,mg·kg<sup>-1</sup>。

## 1.5 修复效果综合评价模型

本文主要遵循主导性、客观性、易测性和可评性 的原则,同时参考以往文献报道,确定 DTPA 浸提态 Cd为土壤环境质量评价指标<sup>[7-9,17,23,32]</sup>,有机质、碱解 氮、有效磷、速效钾和 CEC 为土壤肥力质量评价指 标<sup>[23,33-34]</sup>,以及糙米 Cd为土壤健康质量评价指标<sup>[22-23]</sup>。

采用动态加权综合评价模型对改良剂的修复效 果进行综合评价。该方法的原理在于:先将每项指标 进行标准无量纲化处理,再将各指标的权重与其评价 值关联,各指标的权重满足特定的函数关系,将定常 权变为动权,淡化主观因素对评价结果的影响<sup>[22,26]</sup>。

首先,计算各指标的动态权重值。在实际情况 中,当改良剂的施用量在某个区间范围内时,评价指 标值可能会随着施用量的改变而发生显著变化;当偏 离这个区间范围后,即便是改良剂的施用量再继续发 生改变,评价指标值也将趋于稳定。所以,本文选取 偏大型正态分布函数求得各指标的动态权重值,即:

当 $x_i < \alpha_i$ 时, $W_i(x)=0$ ;

当 $x_i \ge \alpha_i$ 时,  $W_i(x) = 1 - \exp[-(x_i - \alpha_i)^2 / \sigma_i^2]$  (2) 式中:  $W_i(x)$ 为各指标的权函数; $x_i$ 为第i个指标的测定 值经过极小、极差和标准变换后的评价指标值; $\alpha_i$ 为第 i个指标所对应的第1个标准区间[ $a_1, b_1$ )的中间值; $\sigma_i$ 由 $W_i(a_3^i) = 0.9$ (在本研究中,i = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8)确定, 其中 $a_3^i$ 为第i个指标所对应的第3个标准区间[ $a_3, b_3$ ) 中的 $a_3$ 值。

然后,计算各指标的动态加权和。根据x<sub>i</sub>及其所 对应的动态权重值W<sub>i</sub>(x)建立综合评价模型,求得各 指标的动态加权和(X),即:

 $X = W_1(x_1) \times x_1 + W_2(x_2) \times x_2 + \dots + W_8(x_8) \times x_8$ (3) X的值越小,说明修复的综合效果越好。

#### 1.6 数据处理与统计分析

采用 Excel 2010 进行数据整理及表格制作。采用 SPSS 17.0 进行 T 检验和单因素方差分析,显著性检验采用 Duncan 法。采用 Origin Pro 8.1 作图。

## 2 结果与分析

## 2.1 土壤中DTPA浸提态Cd含量

改良剂的用量为1 500、3 000 kg·hm<sup>-2</sup>和4 500 kg·hm<sup>-2</sup>时, DTPA 浸提态 Cd含量与对照相比无显著差异;然而,当用量为6 000 kg·hm<sup>-2</sup>和7 500 kg·hm<sup>-2</sup>时, DTPA 浸提态 Cd含量较对照分别减少10.5%和8.8%(图1)。这说明,当用量为6 000 kg·hm<sup>-2</sup>和7 500 kg·hm<sup>-2</sup>时,改良剂施用会显著降低根际土壤中Cd的活性。



不同小写字母表示处理间显著差异(P<0.05)。下同 Different lowercase letters indicate significant differences among treatments(P<0.05). The same below

#### 图1 不同处理中 DTPA 浸提态 Cd 含量



### 2.2 土壤中有机质、碱解氮、有效磷、速效钾及CEC含量

当改良剂的用量为6000 kg·hm<sup>-2</sup>时,有机质含量 较对照显著减小6.3%(图2A);碱解氮(图2B)、有效 磷(图2C)和CEC(图3)含量尽管较对照有减少趋势, 但差异并不显著。另外,在所有用量处理条件下,改 良剂的施用都会显著增大速效钾含量。与对照相比, 当用量为1500、3000、4500、6000 kg·hm<sup>-2</sup>和7500 kg·hm<sup>-2</sup>时,速效钾含量分别增大24.8%、16.0%、 24.8%、12.9%和36.5%(图2D)。

#### 2.3 糙米Cd含量及修复效率

当改良剂的用量为4 500、6 000 kg·hm<sup>-2</sup>和7 500 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米 Cd含量分别为0.16、0.14 mg·kg<sup>-1</sup>和 0.09 mg·kg<sup>-1</sup>,均显著低于国家标准(P<0.05)(图4)。 当用量为3 000 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米 Cd含量尽管较对照 显著减小11.9%,但仍显著高于国家标准(P<0.05); 并且,当用量为1 500 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米 Cd含量较对照 显著增大23.9%(P<0.05)(图4)。



Figure 2 Contents of soil organic matter, alkaline hydrolytic nitrogen, available phosphorus and

available potassium in different treatments





改良剂的 RE 随施用量逐渐增大而持续升高。当 用量由 3 000 kg·hm<sup>-2</sup>增加到 7 500 kg·hm<sup>-2</sup>, RE 也由 11.9%持续升高至 69.4%(图 5)。当改良剂用量为 1 500 kg·hm<sup>-2</sup>时, RE 出现负值(图 5)。这说明,在该用量条 件下的改良剂对 Cd 污染稻田并没有表现出明显的修 复效果。

## 2.4 稻谷产量

在所有处理中,仅当用量为4500 kg·hm<sup>-2</sup>时,改良 剂施用会导致稻谷产量较对照显著增大18.7%(图6)。



#### 图4 不同处理中糙米Cd含量

Figure 4 Contents of brown rice Cd in different treatments

## 3 讨论

## 3.1 改良剂对土壤质量的影响

#### 3.1.1 改良剂对土壤环境质量的影响

与总量相比,土壤中重金属的有效态可以较好地 预测糙米中重金属的超标风险<sup>[31,35-37]</sup>。近年来,关于 有效态Cd的提取方法很多<sup>[38]</sup>;并且,由于土壤样品的 前处理方法<sup>[39]</sup>和不同区域土壤理化性质之间的差 异<sup>[40-41]</sup>,究竟哪一种提取方法所得到的有效态Cd含量

www.aer.org.cn





Figure 6 Rice yields in different treatments

与糙米 Cd 含量具有较好的相关性,至今仍无定论。 目前,我国以 DTPA 浸提法作为提取土壤中有效态 Cd 的标准方法;对于酸性土壤,该方法除了会提取出水 溶态 Cd 和交换态 Cd 以外,同时也会提取出部分碳酸 盐、有机质和铁锰氧化物结合态 Cd<sup>[42]</sup>。考虑到在水 稻的种植过程中,周期性的干湿交替会诱导碳酸盐、 有机质和铁锰氧化物结合态 Cd 向水溶态 Cd 及交换 态 Cd 转变而影响土壤中 Cd 的生物有效性<sup>[43-44]</sup>,同时 由 DTPA 提取的有效态 Cd 含量不仅与土壤母质和 Cd 总量密切相关<sup>[42]</sup>,而且还与糙米中 Cd 含量存在极显

#### 农业环境科学学报 第40卷第6期

著相关关系<sup>[30]</sup>,本研究选择DTPA 浸提态 Cd 来衡量根际土壤中 Cd 的生物有效性。本团队最近的研究结果表明,改良剂中的硫酸根和三价铁,不仅会促进根际土壤中无定形铁矿物对 Cd 的吸附或与 Cd 共沉淀,以及铁硫化物与 Cd 共沉淀,而且还会影响水稻不同组织器官对 Cd 的累积量及转运能力<sup>[25]</sup>。由此可以推测,土壤中 Cd 活性以及水稻不同器官对 Cd 累积量与转运能力的变化,很可能是本研究中有效态 Cd 含量随改良剂施用量逐渐增大而明显减小的重要原因。 3.1.2 改良剂对土壤肥力质量的影响

土壤肥力质量在改良剂施用后所发生的一系列 变化,不仅会影响当季作物的健康状况与产量,而且 还会直接或间接地影响修复效果的稳定性和持续 性<sup>[32,45]</sup>。参考全国第二次土壤普查的养分分级标准 (表1)可以发现,土壤有机质、碱解氮、有效磷、速效 钾和CEC的养分等级在改良剂施用前后并没有发生 明显变化。但是,当改良剂的用量为6000 kg·hm<sup>-2</sup> 时,有机质含量(图2A)与对照相比显著减小,并且所 有处理均显著提高速效钾含量(图2D)。这些结果进 一步表明了改良剂施用对土壤肥力质量的重要影响; 同时也暗示在改良剂的后期应用中,需要根据土壤肥 力质量的现状,及时采取有效措施防止有机质含量下 降,以维持土壤良好的生产能力。

3.1.3 改良剂对土壤健康质量的影响

按照糙米 Cd含量范围可以将 Cd污染稻田进行 污染程度的划分<sup>[46]</sup>,即:糙米 Cd含量在 0.2~0.4 mg· kg<sup>-1</sup>为轻度污染,0.4~0.8 mg·kg<sup>-1</sup>为中度污染,大于 0.8 mg·kg<sup>-1</sup>为重度污染。在本研究中,改良剂未施用 以及施用量为1 500 kg·hm<sup>-2</sup>和3 000 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米 Cd含量均在 0.2~0.4 mg·kg<sup>-1</sup>范围内,说明稻田仍处于 轻度 Cd污染。本团队以往的研究表明,根际土壤中 Cd活性、根表铁膜中 Cd含量,以及水稻不同组织器 官(尤其是根、叶和结节)对 Cd的累积及转运,是影响 糙米 Cd含量在改良剂施用前后发生变化的重要因

表1 土壤养分分级标准[33-34]

Table 1 Criteria for grading of soll nutrients	Table 1	Criteria	for grading	of soil	nutrients[33-3
--	---------	----------	-------------	---------	----------------

			0		
等级	有机质	碱解氮	有效磷	速效钾	CEC/
Grade	Organic matter/( $g \cdot kg^{-1}$ )	Alkaline hydrolytic nitrogen/(mg ${\boldsymbol \cdot}  kg^{{}^{-1}})$	Available phosphorus/( $mg \cdot kg^{-1}$ )	Available potassium/(mg { kg ^ 1})	$(\operatorname{cmol} \cdot \operatorname{kg}^{-1})$
1	>40	>150	>40	>200	>20.0
2	30~40	120~150	20~40	150~200	15.4~20.0
3	20~30	90~120	10~20	100~150	10.5~15.4
4	10~20	60~90	5~10	50~100	6.2~10.5
5	6~10	30~60	3~5	30~50	<6.2
6	<6	<30	<3	<30	

素<sup>[25,28]</sup>。在本研究中,当用量为1500 kg·hm<sup>-2</sup>时,DTPA 浸提态 Cd含量并未发生明显变化(图1)。所以,根表 铁膜和水稻不同组织器官对土壤-水稻系统中 Cd运 移的影响,可能是导致改良剂用量为1500 kg·hm<sup>-2</sup>时 糙米 Cd含量显著增大的重要原因。此外,在改良剂 施用量为4500、6000 kg·hm<sup>-2</sup>和7500 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙 米 Cd含量显著低于国家标准(图4),且 RE 均超过 40%(图5);与此同时,当改良剂施用量为4500 kg· hm<sup>-2</sup>时,稻谷产量较对照出现明显的增产效果(图6)。 所以,如果仅基于糙米 Cd含量减少和稻谷增产这两方 面考虑,改良剂的最佳施用量为4500 kg·hm<sup>-2</sup>。

## 3.2 改良剂修复Cd污染稻田效果的综合评价

选择何种评价体系或应用模型对改良剂的修复 效果进行客观评判,是当前我国农田修复工作中所面 临的难点。一方面,目前出台的与工业污染场地修复 相关的技术导则并不能直接应用于农田重金属污染 修复效果的评价工作中5,工业污染场地修复中所关 注的重点是修复后的场地是否可以进一步地开发利 用为建设用地或工业用地,然而,农田重金属污染修 复重点关注的是修复后的土壤是否可以复垦,生产出 的农产品是否达到国家食品安全标准[23];另一方面, 传统的农田土壤质量评价方法也不能直接应用于农 田重金属污染修复效果的评价工作中,传统的农田土 壤质量评价方法是选取一系列相关指标,从时间和空 间尺度对土壤的生产力、环境质量和动植物健康等土 壤功能属性进行定性和定量评价,相比而言,农田重 金属污染修复效果评价重点考虑的是修复后的土壤 中重金属的环境风险降低程度、农田土壤生态功能恢 复程度、农产品生产的安全性等,参照一定的标准,定 性或定量地评价修复后农田土壤质量的改善程度[23]。 土壤质量与农产品安全和人体健康密不可分,是维持 生态环境协调健康发展的重要内容[24,47-49]。所以,综 合考虑土壤的环境、肥力和健康质量的变化,以实现 对修复后土壤质量优劣的客观评判<sup>[50]</sup>,在当前农田修 复技术的效果评价中显得尤为必要。

当改良剂的用量为4 500、6 000 kg·hm<sup>-2</sup>和7 500 kg·hm<sup>-2</sup>时,糙米Cd含量均达到国家标准(图4)。所 以,本研究只对这3种施用量的修复效果进行综合评 判。在采用动态加权综合评价模型对改良剂的修复 效果进行综合评价的过程中,按照以下方法确定各指 标的分级标准(表2):参考研究中物种敏感性分析法 得到不同危险值将有效态 Cd 含量划分等级<sup>511</sup>:参考 全国第二次土壤普查的养分分级标准将土壤有机质、 碱解氮、有效磷、速效钾和CEC含量划分等级[33-34]:参 考国家标准中糙米Cd限量值的20%和50%将糙米 Cd含量划分等级<sup>[22]</sup>;水稻产量按照5.3 t·hm<sup>-2</sup>为基准, 对产量的影响在10%以内划分等级[22]。将糙米Cd含 量 $(x_1)$ 和土壤 DTPA 浸提态 Cd 含量 $(x_2)$ 进行极差变换 并标准化,同时将有机质 $(x_3)$ 、碱解氮 $(x_4)$ 、有效磷  $(x_5)$ 、速效钾 $(x_6)$ 、CEC $(x_7)$ 和稻谷产量 $(x_8)$ 进行极小 化和极差变换并标准化(表3)。按照公式(2)计算可 得: $\alpha_1$ , $\alpha_2$ , $\alpha_3$ , $\alpha_4$ , $\alpha_5$ , $\alpha_6$ , $\alpha_7$ 和 $\alpha_8$ 的取值分别为0.1000, 0.166 7、0.250 0、0.300 0、0.125 0、0.250 0、0.262 5 和  $0.3461, \sigma_1, \sigma_2, \sigma_3, \sigma_4, \sigma_5, \sigma_6, \sigma_7$ 和 $\sigma_8$ 的取值分别为 0.262 3,0.329 5,0.274 6,0.296 6,0.247 1,0.274 6, 0.2763和0.3110。最后根据公式(3)计算得到改良 剂3种不同施用量所对应动态加权和(X)。图7表 明,改良剂用量为 $6\,000\,\text{kg-hm}^{-2}$ 时的X(1.1)显著低于 用量为4 500 kg·hm<sup>-2</sup>(3.9)和7 500 kg·hm<sup>-2</sup>(4.2)。因 此,改良剂在用量为6000 kg·hm<sup>-2</sup>时的修复效果最 佳。值得一提的是,当用量为6000 kg·hm<sup>-2</sup>时,土壤 有机质含量会因改良剂的施用而下降(图2A)。所 以,在对修复后的稻田再次进行作物生产时,需要及 时关注土壤有机质含量的变化,以确保作物养分的及

	表2	修复效果评估指标等级分类标准	
--	----	----------------	--

项目Items	优秀Excellent	良好 Good	一般 Fair	较差Poor
糙米Cd Brown rice Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	(0,0.04]	(0.04,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,∞)
DTPA浸提态Cd DTPA extractable Cd/(mg·kg <sup>-1</sup> )	(0,0.1]	(0.1,0.2]	(0.2,0.3]	(0.3,∞)
有机质 Organic matter/(g·kg <sup>-1</sup> )	[40,∞)	[30,40)	[20,30)	[0,20)
碱解氮 Alkaline hydrolytic nitrogen/(mg•kg <sup>-1</sup> )	[150,∞)	[120,150)	[90,120)	[0,90)
有效磷 Available phosphorus/(mg·kg <sup>-1</sup> )	[40,∞)	[20,40)	[10,20)	[0,10)
速效钾 Available potassium/(mg·kg <sup>-1</sup> )	[200,∞)	[150,200)	[100,150)	[0,100)
$CEC/(cmol \cdot kg^{-1})$	[20,∞)	[15.4,20)	[10.5,15.4]	[0,10.5)
稻谷产量 Rice yield/(t・hm <sup>-2</sup> )	[6.82,∞)	[5.77, 6.82)	[4.72, 5.77)	[0, 4.72)

Table 2 Classification criteria of evaluation indexes of remediation effect

#### 农业环境科学学报 第40卷第6期

Table 3 Classification interval values of evaluation indexes of remediation effect after non-dimensional treatment					
项目Items	优秀Excellent	良好 Good	—般 Fair	较差Poor	
糙米 Cd Brown rice Cd	(0,0.200 0]	(0.200 0, 0.500 0]	(0.500 0,1]	(1,∞)	
DTPA浸提态 Cd DTPA extractable Cd	(0,0.333 3]	(0.333 3,0.666 7]	(0.6667,1]	(1,∞)	
有机质 Organic matter	(0,0.5000]	(0.5000,0.6667]	(0.6667,1]	(1,∞)	
碱解氮 Alkaline hydrolytic nitrogen	(0,0.6000]	(0.600 0,0.750 0]	(0.7500,1]	(1,∞)	
有效磷 Available phosphorus	(0,0.2500]	(0.2500,0.5000]	(0.5000,1]	(1,∞)	
速效钾 Available potassium	(0,0.500 0]	(0.500 0,0.666 7]	(0.6667,1]	(1,∞)	
CEC	(0,0.525 0]	(0.525 0,0.681 8]	(0.681 8,1]	(1,∞)	
稻谷产量 Rice yield	(0,0.6921]	(0.692 1,0.818 0]	(0.8180,1]	$(1,\infty)$	

表3 修复效果评估指标分类标准无量纲化处理后所对应的区间



图 7 不同处理评价指标的动态加权和(X) Figure 7 Sum of dynamic weights of evaluation indexes(X) in different treatments

时供给和保障农田良好的生产能力。

## 4 结论

(1)改良剂施用会影响土壤的环境、肥力和健康 质量。重点围绕土壤环境(采用 DTPA 浸提态 Cd 含 量评价)、肥力(采用有机质、碱解氮、有效磷、速效钾 和 CEC 含量评价)和健康质量(采用糙米 Cd 含量评 价)构建指标体系,同时运用动态加权综合评价模 型,可以实现对改良剂修复 Cd 污染稻田的综合效果 评价。

(2)当用量为6000 kg·hm<sup>-2</sup>时,改良剂修复Cd污染稻田的综合效果最佳。在后期改良剂的大范围应用及推广中,需要及时关注土壤有机质含量的变化 情况,以维持农田土壤良好的生态服务功能。

**致谢:**本研究得到广东省广州市仲恺农业工程学院环境 科学与工程学院刁增辉教授及甘宗旭实习生的大力支持和协助,在此表示感谢。

#### 参考文献:

- [1] 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 Dao-you, ZHU Qi-hong, ZHU Han-hua, 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.
- [2] 汪鹏, 王静, 陈宏坪, 等. 我国稻田系统镉污染风险与阻控[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1409-1417. WANG Peng, WANG Jing, CHEN Hong-ping, et al. Cadmium risk and mitigation in paddy systems in China[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37 (7): 1409-1417.
- [3] Wang P, Chen H P, Kopittke P M, et al. Cadmium contamination in agricultural soils of China and the impact on food safety[J]. *Environmental Pollution*, 2019, 249:1038–1048.
- [4] Zhao F J, Ma Y, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: Current status and mitigation strategies[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49:750–759.
- [5] 骆永明, 滕应.中国土壤污染与修复科技研究进展和展望[J].土壤 学报, 2020, 57(5):1137-1142. LUO Yong-ming, TENG Ying. Research progresses and prospects on soil pollution and remediation in China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1137-1142.
- [6] Sebastian A, Prasad M N V. Cadmium minimization in rice: A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34:155–173.
- [7] 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 Li-jun, WU Lin, LIN Xiao-bing, et al. Remediation of cadmium contaminated paddy fields using soil conditioners[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(11):5098-5106.
- [8] 彭惠, 邓华健, 徐浩然, 等. 石灰对生物炭和腐植酸阻控水稻Cd吸收的效应[J]. 中国环境科学, 2020, 40(1):329-337. PENG Hui, DENG Hua-jian, XU Hao-ran, et al. Effect of lime on biochar and humic acid controlling cadmium uptake in rice[J]. China Environmental Science, 2020, 40(1):329-337.
- [9] 王建乐, 谢仕斌, 林丹虹, 等. 5 种钝化剂对镉砷污染稻田的田间修 复效果对比[J]. 环境工程学报, 2019, 13(11): 2691-2700. WANG

Jian-yue, XIE Shi-bin, LIN Dan-hong, et al. Comparative of the field remediation effect of cadmium and arsenic contaminated paddy by five passivators[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2019, 13 (11):2691–2700.

- [10] Sun Y B, Sun G H, Xu Y M, et al. Evaluation of the effectiveness of sepiolite, bentonite, and phosphate amendments on the stabilization remediation of cadmium-contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Management*, 2016, 166:204–210.
- [11] 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.
- [12] Huang Y, Sheng H, Zhou P, et al. Remediation of Cd-contaminated acidic paddy fields with four-year consecutive liming[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 188:109903
- [13] Zhang Y, Wang X, Ji X, et al. Effect of a novel Ca–Si composite mineral on Cd bioavailability, transport and accumulation in paddy soilrice system[J]. *Journal of Environmental Management*, 2019b, 233: 802–811.
- [14] Chen Z, Tang Y T, Yao A J, et al. Mitigation of Cd accumulation in paddy rice(*Oryza sativa* L.) by Fe fertilization[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231:549–559.
- [15] Huang G X, Ding C F, Hu Z Y, et al. Topdressing iron fertilizer coupled with pre-immobilization in acidic paddy fields reduced cadmium uptake by rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Science of the Total Environment, 2018, 636:1040–1047.
- [16] Zhang D X, Du G H, Chen D, et al. Effect of elemental sulfur and gypsum application on the bioavailability and redistribution of cadmium during rice growth[J]. *Science of the Total Environment*, 2019a, 657: 1460–1467.
- [17] 刘佳炜, 周航, 魏宾纭, 等. 组配改良剂联合硅肥对 Cd 污染稻田的 修复效果[J]. 中国环境科学, 2020, 40(8):3512-3519. LIU Jiawei, ZHOU Hang, WEI Bin-yun, et al. Remediation effects of combined amendment and silicon fertilizer on Cd contaminated paddy soil [J]. China Environmental Science, 2020, 40(8):3512-3519.
- [18] Deng X, Chen Y X, Yang Y, et al. Cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) alleviated by basal alkaline fertilizers followed by topdressing of manganese fertilizer[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 262:114289
- [19] Cai Y X, Zhang S H, Cai K Z, et al. Cd accumulation, biomass and yield of rice are varied with silicon application at different growth phases under high concentration cadmium-contaminated soil[J]. *Che*mosphere, 2020, 242:125128.
- [20] Zhang Q, Zhang L, Liu T T, et al. The influence of liming on cadmium accumulation in rice grains via iron-reducing bacteria[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645:109-118.
- [21] 李昂, 侯红, 苏本营, 等. 基于 CNKI 文献分析的镉污染土壤钝化技术概况及效果评估研究[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(8): 1677-1684. LI Ang, HOU Hong, SU Ben-ying, et al. Assessment of heavy metal passivation technology and evaluation of cadmium-contaminated soil based on CNKI literature analysis[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2019, 38(8):1677-1684.

- [22] 何赢, 杜平, 石静, 等. 土壤重金属钝化效果评估——基于大田试验的研究[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(8):1734-1740. HE Ying, DU Ping, SHI Jing, et al. Evaluation of the effect of heavy metal immobilization remediation field experiment study[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(8):1734-1740.
- [23] 王涛, 李惠民, 史晓燕. 重金属污染农田土壤修复效果评价指标体系分析[J]. 土壤通报, 2016, 47(3):725-729. WANG Tao, LI Huimin, SHI Xiao-yan. Analysis on evaluation system of remediation effectiveness in farmland soil contaminated by heavy metals[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, 47(3):725-729.
- [24] 徐建明, 刘杏梅."十四五"土壤质量与食物安全前沿趋势与发展 战略[J]. 土壤学报, 2020, 57(5):1143-1154. XU Jian-ming, LIU Xing-mei. Frontier trends and development strategies of soil quality and food safety in the 14<sup>th</sup> Five-Year Plan[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1143-1154.
- [25] 李义纯,陈勇,唐明灯,等.硫酸亚铁和硝酸铁施用对根际土壤-水 稻系统中镉运移的影响[J].环境科学,2020,41(11):5143-5150. LI Yi-chun, CHEN Yong, TANG Ming-deng, et al. Effects of ferrous sulfate and ferric nitrate on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. Environmental Science, 2020, 41 (11): 5143-5150.
- [26] Fan F, Liu L, Li Y F, et al. A dynamic water quality index model based on functional data analysis[J]. *Ecological Indicators*, 2015, 57: 249-258.
- [27] Li Y C, Yu S, Strong J, et al. Are the biogeochemical cycles of carbon, nitrogen, sulfur, and phosphorus driven by the "Fe<sup>III</sup> – Fe<sup>II</sup> redox wheel" in dynamic redox environments?[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12:683–693.
- [28] 李义纯, 王艳红, 唐明灯, 等. 改良剂对根际土壤-水稻系统中镉运移的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(7): 3331-3338. LI Yi-chun, WANG Yan-hong, TANG Ming-deng, et al. Effects of an amendment on cadmium transportation in the rhizosphere soil-rice system[J]. Environmental Science, 2019, 40(7): 3331-3338.
- [29] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:农业科技出版社, 1999 LU Ru-kun. Soil and agro-chemical analysis methods[M]. Beijing: Agricultural Science and Technology Press, 1999.
- [30] Xiao W D, Ye X Z, Zhu Z Q, et al. Evaluation of cadmium (Cd) transfer from paddy soil to rice (*Oryza sativa* L.) using DGT in comparison with conventional chemical methods: derivation of models to predict Cd accumulation in rice grains[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2020, 27:14953–14962.
- [31] Chen H P, Zhang W W, Yang X P, et al. Effective methods to reduce cadmium accumulation in rice grain[J]. *Chemosphere*, 2018, 207:699– 707.
- [32] 魏岚,黄连喜,刘晓文,等.Cd污染农田的炭基修复方案设计和效 果评价[J].农业环境科学学报,2020,39(10):2277-2287. WEI Lan, HUANG Lian-xi, LIU Xiao-wen, et al. Evaluation the effects of specifically designed biochar amendments on the remediation of cadmium - contaminated soils[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(10):2277-2287
- [33] 王远鹏, 黄晶, 柳开楼, 等. 东北典型县域稻田土壤肥力评价及其

空间变异[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 256-266. WANG Yuan-peng, HUANG Jing, LIU Kai-lou, et al. Evaluation and spatial variability of paddy soil fertility in typical county of Northeast China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26(2): 256-266.

- [34] 王远鹏,黄晶,孙钰翔,等.近35年红壤稻区土壤肥力时空演变特征——以进贤县为例[J].中国农业科学,2020,53(16):3294-3306. WANG Yuan-peng, HUANG Jing, SUN Yu-xiang, et al. Spatiotemporal variability characteristics of soil fertility in red soil paddy region in the past 35 years: A case study of Jinxian County[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(16):3294-3306.
- [35] Zhang J R, Li H Z, Zhou Y Z, et al. Bioavailability and soil-to-crop transfer of heavy metals in farmland soils: A case study in the Pearl River Delta, South China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 235: 710-719.
- [36] Ma Q, Zhao W F, Guan D X, et al. Comparing CaCl<sub>2</sub>, EDTA and DGT methods to predict Cd and Ni accumulation in rice grains from contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 260:114042.
- [37] Wen Y B, Li W, Yang Z F, et al. Evaluation of various approaches to predict cadmium bioavailability to rice grown in soils with high geochemical background in the karst region, Southwestern China[J]. Environmental Pollution, 2020, 258:113645.
- [38] Liu B L, Mo C H, Zhang Y M. Using cadmium bioavailability to simultaneously predict its accumulation in crop grains and the bioaccessibility in soils[J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 246– 252.
- [39] Qi Y, Huang B, Darilek J L. Effect of drying on heavy metal fraction distribution in rice paddy soil[J]. *PLoS One*, 2014, 9(5):e97327.
- [40] Li D Q, Li W Y, Lu Q, et al. Cadmium bioavailability well assessed by DGT and factors influencing cadmium accumulation in rice grains from paddy soils of three parent materials[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018, 18:2552–2561.
- [41] 鄂倩, 赵玉杰, 刘潇威, 等. 不同土壤镉提取方法预测稻米富集镉 性能评估[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5):1000-1009. E Qian, ZHAO Yu-jie, LIU Xiao-wei, et al. Screening and evaluation of soil cadmium extraction methods for predicting cadmium accumulation in rice[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2020, 39(5): 1000-1009.
- [42] 熊婕,朱奇宏,黄道友,等.南方稻田土壤有效态镉提取方法研究
  [J]. 农业现代化研究, 2018, 39(1):170-177. XIONG Jie, ZHU
  Qi-hong, HUANG Dao-you, et al. Comparison of single extraction methods for assessing Cd availability in paddy soils in South China[J].

农业环境科学学报 第40卷第6期

Research of Agricultural Modernization, 2018, 39(1):170-177.

- [43] Wang J, Wang P M, Gu Y, et al. Iron-manganese (oxyhydro) oxides, rather than oxidation of sulfides, determine mobilization of Cd during soil drainage in paddy soil systems[J]. *Environmental Science & Tech*nology, 2019, 53(5):2500-2508.
- [44] Kögel-knabner I, Amelung W, Cao Z, et al. Biogeochemistry of paddy soils[J]. Geoderma, 2010, 157:1-14.
- [45] 郭碧林,陈效民,景峰,等.施用生物炭对红壤性水稻土重金属钝化与土壤肥力的影响[J].水土保持学报,2019,33(3):298-304. GUO Bi-lin, CHEN Xiao-min, JING Feng, et al. Effects of biochar application on heavy metal passivation and soil fertility in the red paddy soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(3):298-304.
- [46] 薛涛, 廖晓勇, 王凌青, 等. 农艺强化措施治理稻田镉污染的效果 评价[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7):1537-1544. XUE Tao, LIAO Xiao-yong, WANG Ling-qing, et al. Evaluation on effect of strengthening agronomic measures in cadmium-contaminated paddy field[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(7):1537-1544.
- [47] 沈仁芳, 颜晓元, 张甘霖, 等. 新时期中国土壤科学发展现状与战略思考[J]. 土壤学报, 2020, 57(5):1051-1059. SHEN Ren-fang, YAN Xiao-yuan, ZHANG Gan-lin, et al. Status quo of and strategic thinking for the development of soil science in China in the new era [J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(5):1051-1059.
- [48] Zhong X, Chen Z, Li Y, et al. Factors influencing heavy metal availability and risk assessment of soils at typical metal mines in Eastern China[J]. Journal of Hazardous Materials, 2020, 400: 123289.
- [49] Sydow M, Chrzanowski Ł, Hauschild M Z, et al. Influence of metal speciation on soil ecotoxicity impacts in life cycle assessment[J]. Journal of Environmental Management, 2020, 266 :110611.
- [50] 吴霄霄, 米长虹, 吴昊, 等. 镉污染稻田修复效果评估指标体系的 构建[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1498-1505. WU Xiaoxiao, MI Chang-hong, WU Hao, et al. Construction of an evaluation index system to evaluate the remediation effect of cadmium pollution in paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7): 1498-1505.
- [51] 张云慧, 杜平, 何赢, 等. 基于农产品安全的土壤重金属有效态含量 限值推定方法[J]. 环境科学, 2019, 40(9):4262-4269. ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, et al. Derivation of the thresholds of available concentrations of heavy metals in soil based on agricultural product safety[J]. Environmental Science, 2019, 40(9):4262-4269.