

DOI: 10.19741/j.issn.1673-4831.2019.0960

米雅竹,朱广森,张旭,等.3种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻 Cd、As 累积的影响[J].生态与农村环境学报,2020,36(9): 1200-1209.

MI Ya-zhu,ZHU Guang-sen,ZHANG Xu, et al. Accumulation of Cd and As in Rice (*Oryza sativa*) Under Different Water Management Coupled With Charcoal and Diammonium Phosphate Amendment[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2020, 36(9): 1200-1209.

3种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻 Cd、As 累积的影响

米雅竹,朱广森,张旭,刘小红,司友斌^① (安徽农业大学资源与环境学院/农田生态保育与污染防控安徽省重点实验室,安徽合肥 230036)

摘要: 通过测定土壤和水稻体内 Cd、As 含量及水稻产量,探究常规灌溉(W1)、全生育期淹水(W2)和湿润灌溉(W3)耕作条件下,施用木炭和磷酸二铵对水稻 Cd、As 累积的影响。结果表明,3种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵均显著提高土壤 pH 值,pH 值随水稻生长呈先增加后下降趋势,最后趋于中性;土壤氧化还原电位随水分增加呈下降趋势,其值由高到低依次为 W1>W3>W2 水分管理条件,W2 水分管理条件始终处于弱还原状态。同一水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵,土壤有效态 Cd 以及水稻根、茎叶和籽粒 Cd 含量均随施用量的增加而减少。W1、W2 和 W3 水分管理条件下,对照组水稻籽粒 Cd 含量分别为(0.23±0.02)、(0.19±0.03)和(0.22±0.04) mg·kg⁻¹,施用木炭和磷酸二铵后水稻籽粒 Cd 含量均小于 0.2 mg·kg⁻¹;其中,W2 水分管理条件下配施 0.44 kg·m⁻²木炭或 15.00 g·m⁻²磷酸二铵的降低效果较好。3种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵均使土壤有效态 As 含量增加;相比较而言,W2 水分管理条件下各处理土壤有效态 As 含量最少,介于 0.88~1.22 mg·kg⁻¹之间。W2 水分管理条件下各处理水稻根、茎叶和籽粒 As 含量较低,且籽粒无机 As 含量均小于 0.2 mg·kg⁻¹。3种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵均能促进水稻生长,提高水稻产量。水稻产量与土壤有效态 Cd 含量呈极显著负相关,与土壤有效态 As 含量无显著相关性。因此,在确保水稻籽粒无机 As 含量不超过 0.2 mg·kg⁻¹条件下,实际生产中可采用 W2 水分管理配施 0.44 kg·m⁻²木炭或 15.00 g·m⁻²磷酸二铵的方法促进水稻增产,并有效降低水稻籽粒 Cd 累积。

关键词: 水稻; Cd; As; 水分管理; 木炭; 磷酸二铵

中图分类号: X53 文献标志码: A 文章编号: 1673-4831(2020)09-1200-10

Accumulation of Cd and As in Rice (*Oryza sativa*) Under Different Water Management Coupled With Charcoal and Diammonium Phosphate Amendment. MI Ya-zhu, ZHU Guang-sen, ZHANG Xu, LIU Xiao-hong, SI You-bin^①

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University/ Anhui Province Key Laboratory of Farmland Ecological Conservation and Pollution Prevention, Hefei 230036, China)

Abstract: According to the field experiment next to a lead-zinc mining area in Anhui Province, the available cadmium (Cd) and arsenic (As) in farmland as well as rice yields were evaluated as affected by charcoal and diammonium phosphate (DAP) treatments under conventional irrigation (W1), whole growth period flooding (W2), and wet irrigation (W3). Moreover, the pH values, oxidation-reduction potential (Eh), and Cd and As accumulation in rice tissues were also investigated in this study. The results demonstrate that the application of charcoal and DAP enhanced the pH values in soils under all the three conditions of water management. With the rice growth, the pH value in farmland increased firstly and then decreased to neutral. The Eh values of soils showed a declining tendency with the increase of moisture. The Eh values under the different water management conditions followed the sequence of W1>W3>W2. Furthermore, the Eh values at W2 condition showed a weak reductive state. At the same water management condition, the available Cd content in soil

收稿日期: 2019-12-02

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFD0801102); 国家科技支撑计划(2015BAD05B04-02)

^① 通信作者 E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

and Cd content in root, stem leaves and grains decreased as the application amount of charcoal and DAP increased, respectively. In control group, the Cd contents in rice grains under W1, W2, and W3 treatments were (0.23 ± 0.02) , (0.19 ± 0.03) , and (0.22 ± 0.04) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, respectively. After the charcoal and DAP application, Cd accumulation in rice grains was lower than $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ for all treatments. It was found that the reduction in Cd accumulation had an optimum efficiency in application of $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ charcoal or $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ DAP under W2 treatment. On the other hand, the available As content increased after the charcoal and DAP application. The available As content in soil showed the lowest concentration range (0.88 – $1.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) in W2 treatments. In the W2 treatment group, it was observed that the available As content in soil and As accumulation were lower in rice roots, stem leaves and grains. Meanwhile, the inorganic As contents in rice grains were lower than $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Overall, application of charcoal and DAP improved rice growth and increased rice yield. The rice yields were negatively correlated with the available Cd content in soil, but no significant correlation with the available As content was observed. Therefore, the application of $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ charcoal or $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ DAP coupled with W2 water treatment could be adopted to promote rice yields in the condition of ensuring that As content in rice grains below $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, which simultaneously decreased the accumulation of Cd in rice grains.

Key words: rice; Cd; As; water management; charcoal; diammonium phosphate

中国铅锌矿产丰富, 矿山开采会导致周边土壤 Cd、Pb、Cu、Zn 和 As 等重金属污染^[1-2]。研究表明, 农产品中主要超标重金属元素为 Cd 和 As, 且稻米超标率最高^[3]。水稻 (*Oryza sativa*) 作为世界主要粮食作物, 控制水稻籽粒重金属含量是急需解决的环境问题。生物炭作为一种常用的钝化材料可有效提升土壤中重金属稳定性, 在重金属污染农田土壤修复方面应用广泛。如油棕榈生物炭的施用使水稻不同组织中 Cd、As 含量明显减少^[4]; 施用于重度 Cd 污染土壤中的竹炭能显著降低水稻籽粒 Cd 含量, 且土壤 pH 值略有提高^[5]。木炭作为一种广泛存在且廉价的生物炭, 近些年被广泛应用于重金属污染土壤修复。如施用木炭可有效降低土壤中有效态 Cd 含量, 提高土壤微生物对碳源的利用率^[6]。同时, 施用木炭会促进水稻体内干物质的累积和水稻产量的增加^[7]。磷素是植物生长中的必需营养元素, 磷肥作为外源肥料的同时也被用作钝化剂修复重金属污染土壤, 其主要作用成分为五氧化二磷。施用复合磷肥和磷酸二氢钠后土壤 pH 值显著上升, 土壤中 Cd 的移动性降低, Cd 由根部向茎叶的转运系数下降^[8-9]。施用钙镁磷肥在降低水稻各组织间 Cd 迁移系数的同时能显著降低籽粒 Cd 含量^[10]。另外, 在轻中度 As 污染土壤中施用过磷酸钙会促进水稻生长, 减少水稻体内 As 累积^[11]。但也有研究^[12]表明, 施用磷酸二氢钾会导致水稻茎叶和籽粒中 As 累积加剧, 导致水稻减产。

由于土壤钝化修复技术存在维护成本高、投资时间长等问题, 钝化剂结合水分管理技术开始受到人们广泛关注。水稻在分蘖期晒田比乳熟期晒田更易吸收土壤中 Cd^[13]; 长期淹水可显著降低土壤有效态 Cd 含量, 维持土壤较高的有效磷含量^[14], 并

在一定程度上降低 Cd 由水稻茎叶向籽粒的转运系数^[15]。在单一及复合土壤调理剂结合水分管理条件下, 随着水分增加, 水稻土可提取态 As 含量显著增加, 可提取态 Cd 含量显著降低^[16]。生物炭耦合淹水处理可降低土壤有效态 Cd 含量, 但会提高 As 溶出量^[17]。利用水分管理结合钝化剂修复 Cd 和 As 污染稻田问题, 尚无统一结论。如何综合整治区域水稻田 Cd、As 污染及水稻籽粒 Cd、As 累积, 是目前急需解决的农田土壤重金属污染问题。

通过田间试验, 测定土壤 pH 值、氧化还原电位 (Eh)、水稻产量以及土壤有效态 Cd、As 和水稻体内 Cd、As 含量, 探究常规灌溉、全生育期淹水和湿润灌溉 3 种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻体内 Cd、As 含量的影响, 并分析水稻籽粒 Cd、As 含量及水稻产量与土壤有效态 Cd、As 之间的相关性, 为控制研究区域水稻田籽粒 Cd、As 含量提供可行的理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

试验水稻田位于安徽省某铅锌矿附近 ($31^{\circ}3'44''$ ~ $31^{\circ}3'58''$ N, $118^{\circ}14'43''$ ~ $118^{\circ}14'47''$ E), 年平均降水量为 $1\ 200 \text{ mm}$, 年平均气温为 15 ~ 16 $^{\circ}\text{C}$, 属亚热带湿润气候区。研究区常见耕作土壤有水稻土和潮土。该铅锌矿周边农田长期受到采矿、冶炼等活动的影响, 土壤 Cd、As 污染严重。供试水稻田土壤理化性质: 土壤类型为水稻土, pH 值为 6.53 ± 0.04 , w (有机质) 为 $(56.81 \pm 3.52) \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 阳离子交换量 (CEC) 为 $(8.04 \pm 1.07) \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$, w (砂粒) 为 $(81.62 \pm 2.48) \%$, w (粉粒) 为 $(15.37 \pm 2.21) \%$, w (黏粒) 为 $(2.83 \pm 0.79) \%$, w (总

Cd)为(0.96±0.18) mg·kg⁻¹,*w*(总 As)为(75.84±5.61) mg·kg⁻¹。根据土壤 pH 值和 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》,供试土壤 Cd 和 As 含量分别为风险筛选值(0.6 和 25 mg·kg⁻¹)的 1.60 和 3.03 倍。

1.2 试验材料与处理

大田所用水稻品种为嘉华 1 号,购于合肥丰乐种业股份有限公司。木炭购于安徽芜湖大众包装制品有限公司,由秸秆和木屑挤压并在 1 200 °C 条件下煅烧生成。磷酸二铵 [$m(\text{N}) : m(\text{P}_2\text{O}_5) : m(\text{K}_2\text{O})$ 为 14 : 43 : 0],购于合肥四方磷复肥有限责任公司。木炭和磷酸二铵中 Cd、As 含量均未检出,检出限为 1 mg·kg⁻¹。木炭和磷酸二铵于 2018 年 6 月 15 日水稻插秧前通过人工翻耕方式基施农田,浅水插秧并保持 3 cm 水层 3~5 d,促进秧苗返青。试验过程中,各处理根据不同水分管理条件进行定期管理。设置 3 种水分管理条件:常规灌溉(W1)为间歇性灌溉,在分蘖盛期排水晒田后干湿交替,孕穗期开始保持浅水状态至收割;全生育期淹水(W2)在水稻全生育期保持 3~4 cm 水层直至收割;湿润灌溉(W3)为长期保持土壤湿润,表土无明显水层,土壤含水率 *w* 在 70% 左右。每种水分管理分别设置 5 种钝化剂处理:对照(CK)、施用 0.22 kg·m⁻²木炭(C1)、施用 0.44 kg·m⁻²木炭(C2)、施用 7.50 g·m⁻²磷酸二铵(P1)和施用 15.00 g·m⁻²磷酸二铵(P2)。试验共 15 个处理,每个处理设置 4 个重复小区,每个小区面积为 30 m²,各处理随机分布。

1.3 土样采集及测定方法

土壤 Eh 值采用原位测定方法,分别在水稻苗期(6月30日)、分蘖期(7月21日)、拔节期(8月20日)、孕穗期(10月2日)和成熟期(11月10日)将 Eh 计(SX712,上海仪电科学仪器股份有限公司)电极插入土壤表层以下 3~5 cm,待读数稳定后记录 Eh 值^[18]。土壤 pH 值采用 PHS-3C 型 pH 计按 $m(\text{水}) : V(\text{土}) = 1 : 2.5$ 条件测定^[19]。同时,分别采集 5 个时期各组处理 0~20 cm 土层土样,装入聚乙烯塑料袋中,标记并带回实验室置于通风处自然风干,过 0.2 mm 孔径筛,待用。水稻成熟期土壤总 Cd、总 As 含量采用 HNO₃-HCl-HF-HClO₄ 联合消解法进行前处理,过滤后分别用 0.01 mol·L⁻¹ HNO₃ 溶液和 0.01 mol·L⁻¹ H₂SO₄ 溶液定容^[20];成熟期土壤有效态 Cd、As 含量分别采用 CaCl₂-DTPA 和 NH₄HCO₃-DTPA 提取液进行振荡提取^[21-22]。

水稻成熟期采用梅花布点方法对根、茎叶和籽

粒进行采样,每个小区采集根、茎叶、籽粒各 6 个平行样品,标记并带回实验室,用去离子水冲洗植株样品,置于烘箱中于 105 °C 条件下杀青至恒重,待用。水稻根、茎叶、籽粒中 Cd、As 总含量测定采用 HNO₃-H₂O₂ 联合消解法;籽粒中无机砷(As³⁺ 和 As⁵⁺)采用 HNO₃ 隔夜浸泡消解法进行前处理。As³⁺ 和 As⁵⁺ 测定液采用液相色谱-原子荧光光谱联用仪[LC-AFS 9700,北京海光仪器有限公司]测定,其他土壤和水稻样品重金属待测液均采用电感耦合等离子体发射光谱仪[ICP 6000,赛默飞世尔科技(中国)有限公司]测定^[23-24]。测定过程分别采用国家标准物质土壤 GBW(E)-070009 和湖南大米 GBW10045(GSB-23)进行样品重金属质量控制,回收率分别为 95%~104% 和 93%~102%。水稻产量根据单位面积穗数、穗实粒数和千粒重计算得到。

1.4 数据处理

柱形图和折线图绘制采用 Origin 9.0 软件,数据分析采用 SPSS 19.0 和 Excel 2010 软件。

2 结果与分析

2.1 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对土壤 pH、Eh 值的影响

由图 1 可知,3 种水分管理下施用不同剂量木炭和磷酸二铵后,土壤 pH 值随水稻生长呈现先增加后下降趋势,最后趋于中性。全生育期淹水条件下,施用木炭和磷酸二铵对土壤 pH 值提升无明显差异,水稻成熟期土壤 pH 值介于 6.69~7.01 之间。常规和湿润灌溉条件下,施用 0.44 kg·m⁻²木炭和 15.00 g·m⁻²磷酸二铵后土壤 pH 值提升效果最好,两者无明显差异;水稻成熟期土壤 pH 值分别介于 7.37~7.40 和 7.50~7.52 之间。

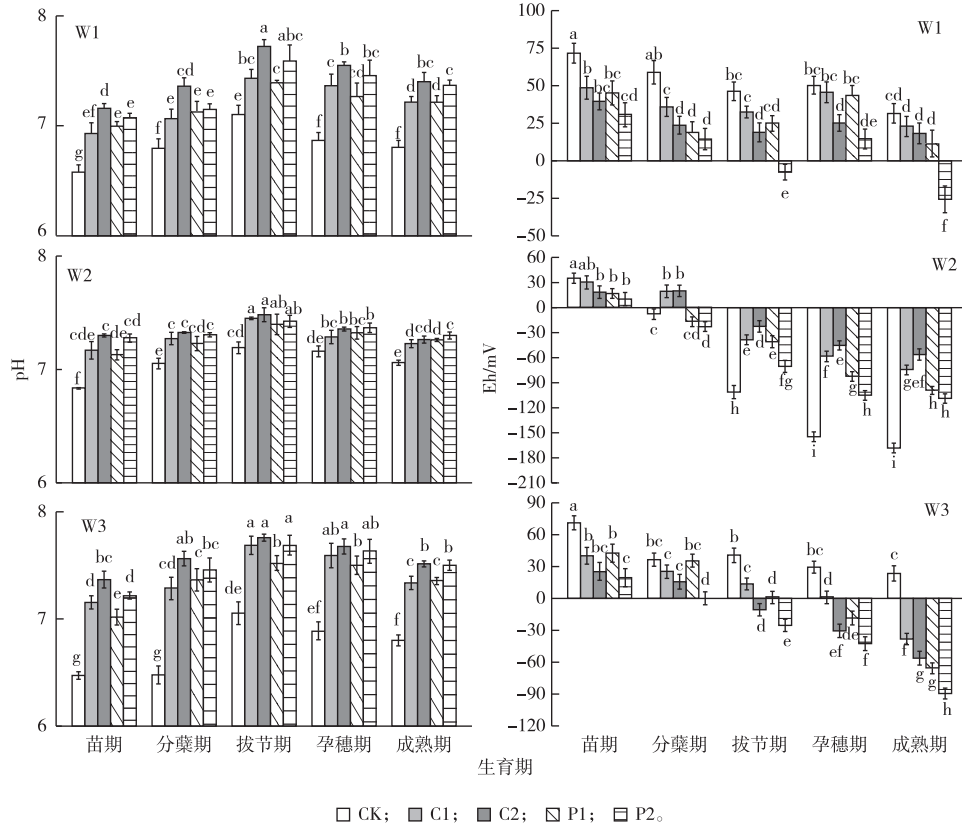
随着水稻的生长,3 种水分管理条件下施用不同剂量木炭和磷酸二铵后土壤 Eh 值均呈下降趋势。常规和湿润灌溉条件下,对照组土壤 Eh 值均大于其他处理,其中,施用 15.00 g·m⁻²磷酸二铵后土壤 Eh 值最低,分别介于 -25.67~30.62 和 -89.50~19.58 之间。全生育期淹水条件下,对照组土壤 Eh 值均小于其他处理,其中,施用 0.44 kg·m⁻²木炭后土壤 Eh 值最高,其值介于 -56.20~20.06 之间(图 1)。

2.2 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对土壤有效态 Cd、As 的影响

由图 2 可知,同一水分管理条件下,与对照相比,土壤有效态 Cd 含量随木炭和磷酸二铵施用量的增加而减少。常规灌溉、全生育淹水和湿润灌溉

条件下,对照组土壤有效态 Cd 含量分别为(0.41±0.02)、(0.33±0.02)和(0.40±0.04) mg·kg⁻¹。全生育期淹水条件下,施用 0.22 和 0.44 kg·m⁻²木炭以及 7.50 和 15.00 g·m⁻²磷酸二铵处理土壤有效

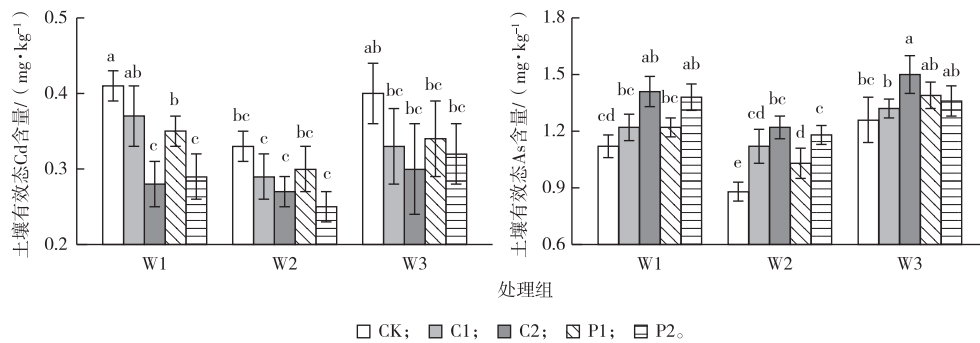
态 Cd 含量分别比对照组下降 12.12%、18.18%、9.09%和 24.24%。其中,全生育期淹水条件下施用 15.00 g·m⁻²磷酸二铵处理土壤有效态 Cd 含量最少,为(0.25±0.02) mg·kg⁻¹。



W1 为常规灌溉,W2 为全生育期淹水,W3 为湿润灌溉。CK 为对照,C1 和 C2 分别为施用 0.22 和 0.44 kg·m⁻²木炭,P1 和 P2 分别为施用 7.50 和 15.00 g·m⁻²磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

图 1 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对土壤 pH 和 Eh 的影响

Fig. 1 Effects of charcoal and diammonium phosphate on pH and Eh values of soil under different water management



W1 为常规灌溉,W2 为全生育期淹水,W3 为湿润灌溉。CK 为对照,C1 和 C2 分别为施用 0.22 和 0.44 kg·m⁻²木炭,P1 和 P2 分别为施用 7.50 和 15.00 g·m⁻²磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P<0.05$)。

图 2 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对土壤有效态 Cd、As 含量的影响

Fig. 2 Effects of charcoal and diammonium phosphate on available Cd and As content of soil under different water management

3 种水分管理条件下,施用不同剂量木炭和磷酸二铵均会使土壤中有有效态 As 含量有所增加,其

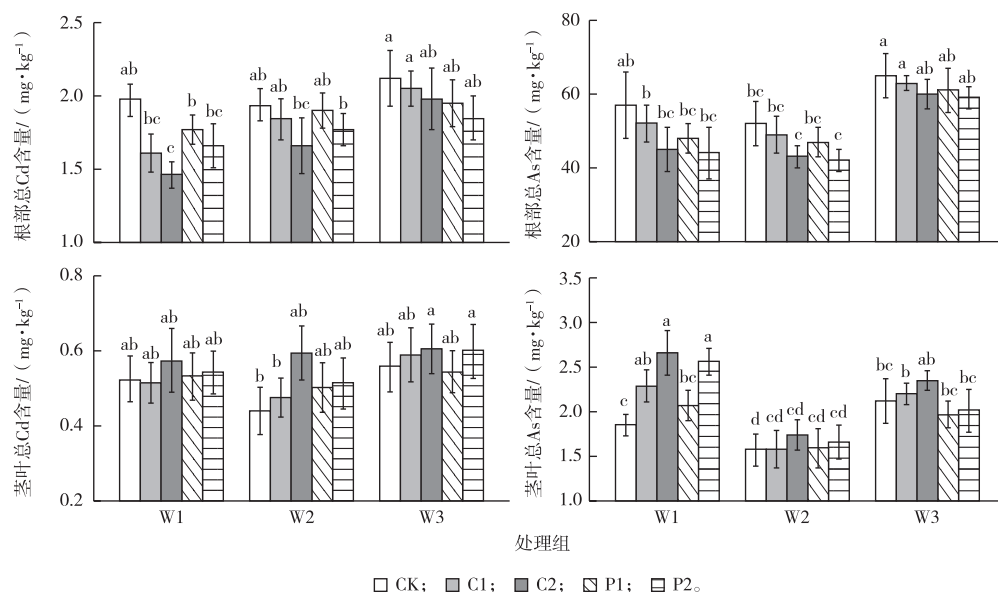
中,全生育期淹水条件下土壤有效态 As 含量相对最小。常规灌溉、全生育期淹水和湿润灌溉条件下,对照组土壤有效态 As 含量分别为 (1.12 ± 0.06) 、 (0.88 ± 0.05) 和 (1.26 ± 0.12) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全生育期淹水条件下,施用 0.22 和 0.44 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭以及 7.50 和 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理土壤有效态 As 含量分别比对照组增加 27.27% 、 38.64% 、 17.06% 和 34.09% 。

2.3 不同水管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻根、茎叶中 Cd、As 含量的影响

3种水管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻根、茎叶 Cd 含量的影响见图3。同一水管理条件下,与对照相比,水稻体内 Cd 含量随木炭和磷酸二铵施用量的增加而下降。由图3可知,常规灌溉条件下水稻根部 Cd 含量最低,全生育期淹水条件次之。常规灌溉条件下,对照组水稻根部 Cd 含量为 (1.97 ± 0.11) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;施用 0.22 和 0.44 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭以及 7.50 和 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻根部 Cd 含量分别比对照组下降 18.27% 、 25.89% 、 10.15% 和 15.74% 。不同水管理条件下水稻茎叶 Cd 含量由低到高依次为全生育期淹水<常

规灌溉<湿润灌溉,其对照组水稻茎叶 Cd 含量分别为 (0.52 ± 0.06) 、 (0.57 ± 0.09) 和 (0.65 ± 0.06) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全生育期淹水条件下,施用 0.22 和 0.44 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭以及 7.50 和 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻茎叶 Cd 含量分别比对照组下降 5.77% 、 17.31% 、 9.62% 和 19.23% ,其中,施用 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻茎叶 Cd 含量为 (0.42 ± 0.03) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (图3)。

水稻根部 As 含量变化见图3。常规和湿润灌溉条件下,施用不同剂量木炭和磷酸二铵处理水稻根部 As 含量差异不显著;全生育期淹水条件下,水稻根部 As 含量随木炭和磷酸二铵施用量增加有所上升。由图3可知,常规灌溉条件下,水稻茎叶 As 含量随木炭和磷酸二铵施用量增加有所上升;而全生育期淹水和湿润灌溉条件下,施用不同剂量木炭和磷酸二铵处理水稻茎叶 As 含量差异不显著。其中,全生育期淹水条件下施用 7.50 和 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻根部和茎叶 As 含量均低于常规和湿润灌溉条件,与对照组相比,2种处理根部 As 含量分别增加 14.16% 和 16.59% ,茎叶 As 含量分别增加 1.27% 和 5.73% 。



W1为常规灌溉,W2为全生育期淹水,W3为湿润灌溉。CK为对照,C1和C2分别为施用 0.22 和 0.44 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭,P1和P2分别为施用 7.50 和 15.00 $\text{g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著($P < 0.05$)。

图3 不同水管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻根和茎叶 Cd、As 含量的影响

Fig. 3 Effects of charcoal and diammonium phosphate on Cd and As content in rice roots and stem leaves under different water management

2.4 不同水管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻籽粒 Cd、As 含量的影响

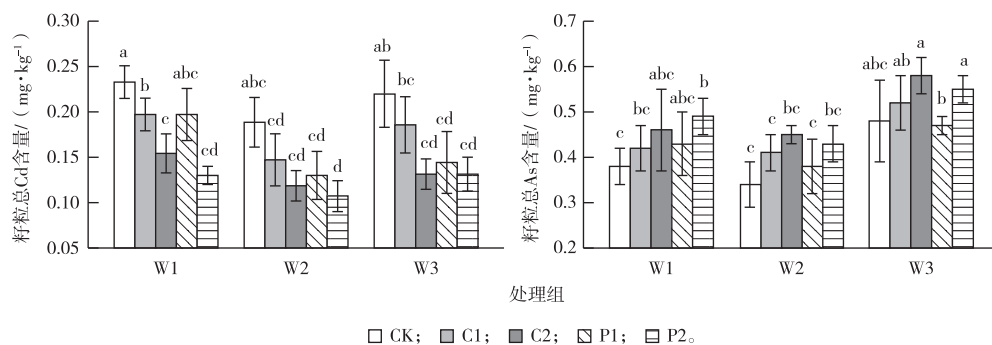
根据 GB 2762—2017《食品安全国家标准 食品

中污染物限量》,水稻籽粒 Cd 含量限值为 0.2 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。由图4可知,3种水管理条件下施用不同剂量木炭和磷酸二铵均能降低籽粒中 Cd 含量,其随

施用量的增加而下降。常规和湿润灌溉条件下, 对照组水稻籽粒 Cd 含量分别为 (0.23 ± 0.02) 和 (0.22 ± 0.04) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他处理籽粒 Cd 含量也均低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全生育期淹水条件下, 对照组水稻籽粒 Cd 含量为 (0.19 ± 0.03) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 施用 0.22 和 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭以及 7.50 和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻籽粒 Cd 含量分别降低 21.05% 、 36.84% 、 31.58% 和 42.11% 。全生育期淹水条件下, 施用 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵后籽粒 Cd 含量降低效果最好, 其值为 (0.11 ± 0.02) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

由图4可知, 3种水分管理条件下, 与对照组相比, 水稻籽粒 As 含量均随着木炭和磷酸二铵施用量

的增加而增加, 其值由大到小依次为湿润灌溉 > 常规灌溉 > 全生育期淹水条件。湿润灌溉条件下, 对照组与施用 $7.50 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理籽粒 As 含量差异不显著, 其值分别为 (0.48 ± 0.09) 和 (0.47 ± 0.02) $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; 施用 0.22 和 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭以及 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理籽粒 As 含量与对照相比分别上升 8.33% 、 20.83% 和 14.58% 。常规灌溉条件下, 施用 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理籽粒 As 含量与对照相比分别上升 21.05% 和 28.95% 。全生育期淹水条件下, 施用 7.50 和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理籽粒 As 含量与对照相比分别上升 11.76% 和 26.47% , 但差异不显著。



W1 为常规灌溉, W2 为全生育期淹水, W3 为湿润灌溉。CK 为对照, C1 和 C2 分别为施用 0.22 和 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭, P1 和 P2 分别为施用 7.50 和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

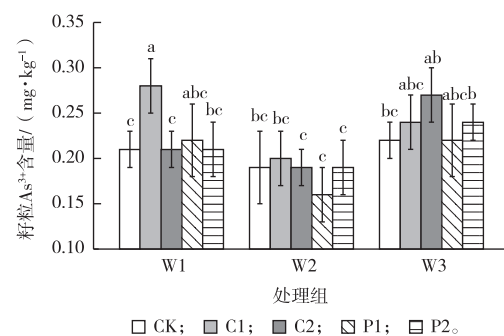
图4 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻籽粒 Cd、As 含量的影响
Fig. 4 Effects of charcoal and diammonium phosphate on Cd and As content in rice grains under different water management

根据 GB 2762—2017, 水稻籽粒 As 含量超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时需测定籽粒中无机 As 含量。经检测, 各处理水稻籽粒 As^{5+} 含量均未检出, 检出限为 $0.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。由图5可知, 常规和湿润灌溉条件下, 水稻籽粒 As^{3+} 含量介于 $0.21 \sim 0.28 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间; 全生育期淹水条件下, 各处理水稻籽粒无机 As 含量均可控制在 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下。

2.5 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻生长及产量的影响

3种水分管理下, 施用不同剂量木炭和磷酸二铵均能促进水稻生长(表1)。与对照组相比, 常规灌溉条件下, 施用 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻株高分别增加 10.96% 和 14.47% , 产量分别增加 3.86% 和 6.15% ; 全生育期淹水条件下, 水稻株高分别增加 1.16% 和 6.31% , 产量分别增加 3.05% 和 6.67% ; 湿润灌溉条件下, 水稻株高分别增加 3.13% 和 4.62% , 产量分别增加 2.71% 和 5.32% 。其中, 全生育期淹水条件下施用

$15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻增产效果最好。



W1 为常规灌溉, W2 为全生育期淹水, W3 为湿润灌溉。CK 为对照, C1 和 C2 分别为施用 0.22 和 $0.44 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 木炭, P1 和 P2 分别为施用 7.50 和 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻籽粒无机 As 含量的影响

Fig. 5 Effects of charcoal and diammonium phosphate on inorganic As content in rice grains under different water management

2.6 土壤有效态 Cd、As 含量与水稻籽粒 Cd、As 含量及水稻产量的关系

由图 6 可知,土壤有效态 Cd、As 含量对水稻籽粒 Cd、As 含量及水稻产量有显著影响,水稻籽粒 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量、水稻籽粒 As 含量与土

壤有效态 As 含量呈极显著正相关 ($P < 0.01, n = 15$)。水稻产量与土壤有效态 Cd 含量呈极显著负相关 ($P < 0.01, n = 15$),与土壤有效态 As 含量相关不显著 ($P > 0.05, n = 15$)。

表 1 不同水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对水稻产量的影响

Table 1 Effects of charcoal and diammonium phosphate on rice yield under different water management

水分管理	钝化剂处理	株高/cm	穗长/cm	千粒重/g	产量/(kg·hm ⁻²)	增产/%
W1	CK	71.20±3.60 ^b	13.10±0.12 ^{de}	25.51±1.06 ^b	6426.94±326.32 ^{ab}	
	C1	73.50±3.20 ^b	12.50±0.08 ^g	26.41±1.20 ^{ab}	6497.26±254.68 ^{ab}	1.08
	C2	79.00±2.40 ^{ab}	15.40±0.09 ^b	27.12±1.08 ^{ab}	6685.27±352.17 ^{ab}	3.86
	P1	77.10±3.10 ^{ab}	11.20±0.05 ^h	27.42±1.33 ^{ab}	6583.86±451.23 ^{ab}	2.38
	P2	81.50±3.50 ^a	16.10±0.13 ^a	28.21±1.15 ^{ab}	6847.98±251.99 ^a	6.15
W2	CK	77.60±2.80 ^{ab}	12.90±0.11 ^f	27.37±1.22 ^{ab}	6597.76±384.62 ^{ab}	
	C1	77.40±3.00 ^{ab}	15.40±0.07 ^b	27.42±1.08 ^{ab}	6603.46±265.53 ^{ab}	0.09
	C2	78.50±3.10 ^{ab}	16.10±0.07 ^a	26.26±1.13 ^b	6805.28±416.90 ^{ab}	3.05
	P1	80.00±3.50 ^{ab}	15.50±0.08 ^b	28.06±1.07 ^{ab}	6807.68±465.22 ^{ab}	3.08
	P2	82.50±2.90 ^a	16.20±0.06 ^a	28.51±1.02 ^a	7069.21±324.85 ^a	6.67
W3	CK	70.40±2.40 ^b	12.80±0.05 ^f	28.41±1.23 ^{ab}	6137.71±364.98 ^b	
	C1	71.10±2.30 ^b	12.60±0.03 ^g	28.10±1.09 ^{ab}	6172.52±214.93 ^b	0.06
	C2	72.60±3.10 ^b	13.10±0.04 ^e	28.49±1.11 ^a	6308.43±436.92 ^b	2.71
	P1	71.40±3.30 ^b	13.30±0.05 ^d	28.75±1.24 ^a	6247.82±285.47 ^b	1.76
	P2	73.65±2.50 ^b	14.20±0.07 ^c	28.50±1.28 ^{ab}	6482.85±398.45 ^{ab}	5.32

W1 为常规灌溉,W2 为全生育期淹水,W3 为湿润灌溉。CK 为对照,C1 和 C2 分别为施用 0.22 和 0.44 kg·m⁻²木炭,P1 和 P2 分别为施用 7.50 和 15.00 g·m⁻²磷酸二铵。直方柱上方英文小写字母不同表示不同处理间某指标差异显著 ($P < 0.05$)。

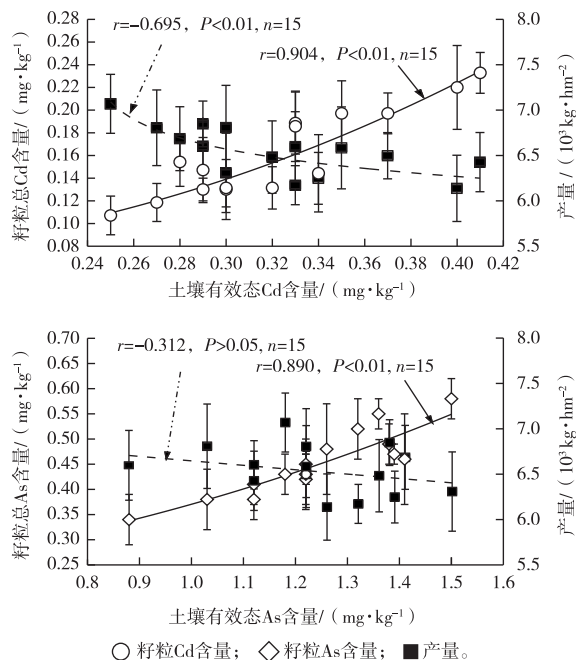


图 6 土壤有效态 Cd、As 含量与水稻籽粒 Cd、As 含量及水稻产量相关关系

Fig. 6 Correlations among available Cd and As content of soil and Cd and As content in rice grains and rice yield

3 讨论

3.1 土壤 pH、Eh 以及施用木炭和磷酸二铵对土壤有效态 Cd、As 的影响

3 种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵均能显著降低土壤有效态 Cd 含量,显著增加土壤有效态 As 含量。全生育期淹水条件下土壤有效态 Cd、As 含量低于常规和湿润灌溉。土壤有效态 Cd、As 含量的改变受到土壤 pH 和土壤氧化还原状态的多重作用,同时也与木炭和磷酸二铵自身性质有关。笔者研究中,3 种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵均能有效提高土壤 pH 值,并显著降低土壤 Eh 值,全生育期淹水条件下土壤始终处于弱还原状态。土壤 pH 升高使得土壤中有有机质、黏土矿物等所带的负电荷增强,促进土壤对 Cd 的吸附;Cd²⁺ 会在土壤中形成 CdCO₃ 和 Cd(OH)₂ 沉淀,使得土壤中 Cd 的生物有效性降低^[17]。对于 As 而言,土壤溶液中 OH⁻ 会和砷酸根离子产生竞争吸附,使得土壤铁氧化物表面的 As 发生解吸,土壤 As 生物活性增强^[25]。

同时,土壤水分的增加导致土壤还原性增强,从而降低 Cd 的生物有效性,提高 As 的生物有效性。Cd 的生物有效性降低主要是因为还原条件有利于土壤中有有机螯合物和硫化物的生成;同时,土壤长期处于还原状态使得土壤中 Mn^{2+} 和 Fe^{2+} 含量上升,与 Cd^{2+} 形成竞争吸附^[26]。土壤中 As 在还原状态下使得砷酸盐还原成亚砷酸盐,As 离子从氧化铁或钝化剂表面解吸到土壤溶液中,还原态 As^{3+} 毒性明显高于 As^{5+} ;Fe/Mn 氧化物的还原使得土壤中砷酸含量上升,进而导致土壤中有效态 As 含量上升^[27]。但通过控制 Eh 值让土壤长期处于还原条件下会导致因氧化还原电位改变而产生的二次铁矿物与 As 发生共沉淀,使得土壤中 As 的移动性显著降低^[28]。

另外,木炭基施使得土壤对重金属离子的吸附能力增强,这是因为木炭自身具有较大的比表面积和密集的微孔结构,对重金属的固持效果较好^[29];同时,木炭与重金属和土壤有机质形成稳定的螯合物,进而降低土壤中重金属有效性。施用磷酸二铵可为水稻生长提供营养来源, PO_4^{3-} 与土壤中 Cd^{2+} 形成稳定的沉积物,能改变土壤表面电荷而起到稳定 Cd 离子的作用,并能将有机结合态 Cd 向残渣态转化,降低土壤中 Cd 的生物利用度^[30]。土壤中 PO_4^{3-} 增加,其与土壤中砷酸盐产生竞争吸附关系,导致土壤中 As 活性增强,使土壤中 As 的生物可利用度上升^[31]。但外源磷对苗期水稻根际 As 形态及其生物有效性的研究表明,低浓度外源磷增加了 As 由水稻根部向地上部的转运,且高浓度外源磷作用下 As 在水稻体内的转运系数最低^[13]。

3.2 土壤有效态 Cd、As 含量对水稻体内 Cd、As 含量及产量的影响

与 3 种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵对土壤有效态 Cd、As 含量的变化规律一致,木炭和磷酸二铵能通过降低或增加土壤有效态 Cd、As 含量,进而影响水稻根、茎叶和籽粒对 Cd、As 的吸附累积(图 2~4)。水稻籽粒 Cd、As 含量与土壤有效态 Cd、As 含量呈极显著正相关。各处理组水稻不同部位 Cd、As 含量由高到低均为根>茎叶>籽粒,且全生育期淹水条件相比于常规和湿润灌溉能有效降低茎叶和籽粒 Cd、As 含量,这与已有研究结果^[16,32]一致。对湘南某矿区 Cd、As 复合污染水稻田的研究结果^[32]表明,Cd、As 进入水稻体内主要累积在根和茎叶中;不同水分管理条件下,针对浙江 7 种水稻的研究结果^[16]表明,水稻分蘖期和孕穗期前后的水分管理对茎叶和籽粒 Cd、As 积累均有影响,全生育期

淹水条件能有效控制部分水稻品种籽粒 Cd、As 含量。由图 5 可知,就产量而言,随着土壤有效态 Cd、As 含量的下降,水稻产量有所提升;其中,产量与土壤有效态 Cd 含量呈极显著负相关,与土壤有效态 As 含量相关不显著。对吉林黑土的研究结果^[33]表明,随着土壤中 Cd、As 含量的增加,水稻产量显著下降。施用生物炭能显著降低辽宁某水稻田土壤有效态 Cd 和水稻籽粒 Cd 含量,且增产效果明显^[34]。水分管理条件下施用钝化剂能促进水稻增产,这是因为施用钝化剂不但能降低土壤有效态重金属含量,同时钝化剂自身还为水稻生长提供所需营养元素^[35]。笔者研究结果与之一致,施用磷酸二铵对水稻增产的效果优于木炭,这可能是因为磷酸二铵中含有水稻生长所必需的磷素。

4 结论

(1) 3 种水分管理条件下施用木炭和磷酸二铵,随着水稻生长,土壤 pH 值最后趋于中性,土壤 Eh 值均呈下降趋势,全生育期淹水条件下土壤始终处于弱还原状态。

(2) 3 种水分管理条件下,施用木炭和磷酸二铵均降低土壤有效态 Cd 和水稻体内 Cd 含量,但增加了土壤 As 的溶出和水稻体内 As 的累积。全生育期淹水条件下,土壤有效态 As、水稻根和茎叶 As 含量较低,且籽粒无机 As 含量均低于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。全生育期淹水配施 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理对降低 Cd 含量的效果最好,土壤有效态 Cd 以及水稻根、茎叶和籽粒 Cd 含量与对照相比分别降低 24.24%、15.74%、19.23% 和 42.11%,且籽粒 Cd 含量最低,为 $(0.11 \pm 0.02) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

(3) 与常规灌溉和湿润灌溉相比,全生育期淹水对水稻的增高促产效果最好。全生育期淹水配施 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵处理水稻株高增加 6.31%,产量增加 6.67%。水稻产量与土壤有效态 Cd 含量呈极显著负相关,与土壤有效态 As 含量相关不显著。

(4) 综合考虑水稻籽粒 Cd、As 的累积和水稻产量,全生育期淹水配施 $15.00 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2}$ 磷酸二铵是研究区水稻安全生产的较佳种植模式。

参考文献:

- [1] HUANG B, GUO Z H, TU W J, *et al.* Geochemistry and Ecological Risk of Metal(Loid)s in Overbank Sediments Near an Abandoned Lead/Zinc Mine in Central South China[J]. Environmental Earth Sciences, 2018, 77(3): 1-13.
- [2] MI Y Z, ZHAN F D, LI B, *et al.* Distribution Characteristics of Cad-

- mium and Lead in Particle Size Fractions of Farmland Soils in a Lead-zinc Mine Area in Southwest China [J]. *Environmental Systems Research*, 2018, 7(1): 1-10.
- [3] 于焕云, 崔江虎, 乔江涛, 等. 稻田镉砷污染阻控原理与技术应用[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1418-1426. [YU Huan-yun, CUI Jiang-hu, QIAO Jiang-tao, *et al.* Principle and Technique of Arsenic and Cadmium Pollution Control in Paddy Field [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1418-1426.]
- [4] QIAO J T, LIU T X, WANG X Q, *et al.* Simultaneous Alleviation of Cadmium and Arsenic Accumulation in Rice by Applying Zero-valent Iron and Biochar to Contaminated Paddy Soils [J]. *Chemosphere*, 2018, 195: 260-271.
- [5] WANG R Z, WEI S, JIA P H, *et al.* Biochar Significantly Alters Rhizobacterial Communities and Reduces Cd Concentration in Rice Grains Grown on Cd-contaminated Soils [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 676: 627-638.
- [6] 崔红标, 范玉超, 周静, 等. 改良剂对土壤铜镉有效性和微生物群落结构的影响 [J]. *中国环境科学*, 2016, 36(1): 197-205. [CUI Hong-biao, FAN Yu-chao, ZHOU Jing, *et al.* Availability of Soil Cu and Cd and Microbial Community Structure as Affected by Applications of Amendments [J]. *China Environmental Science*, 2016, 36(1): 197-205.]
- [7] 陈芳, 张康康, 谷思诚, 等. 不同种类生物质炭及施用量对水稻生长及土壤养分的影响 [J]. *华中农业大学学报*, 2019, 38(5): 57-63. [CHEN Fang, ZHANG Kang-kang, GU Si-cheng, *et al.* Effects of Kinds and Application Rates of Biochar on Rice Growth and Soil Nutrients [J]. *Journal of Huazhong Agricultural University*, 2019, 38(5): 57-63.]
- [8] SIEBERS N, SIANGLIW M, TONGCUMPOU C. Cadmium Uptake and Subcellular Distribution in Rice Plants as Affected by Phosphorus: Soil and Hydroponic Experiments [J]. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 2013, 13(4): 833-844.
- [9] 李桃, 李军, 韩颖, 等. 磷对水稻镉的亚细胞分布及化学形态的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2017, 36(9): 1712-1718. [LI Tao, LI Jun, HAN Ying, *et al.* Effects of Phosphorus on Subcellular Distribution and Chemical Speciation of Cadmium in Rice [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(9): 1712-1718.]
- [10] 吴迪, 魏小娜, 彭湃, 等. 钝化剂对酸性高镉土壤钝化效果及水稻镉吸收的影响 [J]. *土壤通报*, 2019, 50(2): 482-488. [WU Di, WEI Xiao-na, PENG Pai, *et al.* Effects of Passivators on Acid and Cadmium Farmland Soils and Cadmium Absorption by Rice [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2019, 50(2): 482-488.]
- [11] 薛培英, 刘文菊, 段桂兰, 等. 外源磷对苗期小麦和水稻根际砷形态及其生物有效性的影响 [J]. *生态学报*, 2009, 29(4): 2027-2034. [XUE Pei-ying, LIU Wen-ju, DUAN Gui-lan, *et al.* Effects of Exogenous Phosphorus on Arsenic Fractions in the Rhizosphere and Their Bioavailability to Rice and Wheat Seedlings [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(4): 2027-2034.]
- [12] HOSSAIN M B, JAHIRUDDIN M, LOEPPERT R H, *et al.* The Effects of Iron Plaque and Phosphorus on Yield and Arsenic Accumulation in Rice [J]. *Plant and Soil*, 2009, 317(1/2): 167-176.
- [13] 刘昭兵, 纪雄辉, 彭华, 等. 水分管理模式对水稻吸收累积镉的影响及其作用机理 [J]. *应用生态学报*, 2010, 21(4): 908-914. [LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, PENG Hua, *et al.* Effects and Action Mechanisms of Different Water Management Modes on Rice Cd Absorption and Accumulation [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2010, 21(4): 908-914.]
- [14] 李海龙, 李香真, 聂三安, 等. 水分管理对 Cd-Pb-Zn 污染土壤有效态及水稻根际细菌群落的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(7): 1456-1467. [LI Hai-long, LI Xiang-zhen, NIE San-an, *et al.* Effects of Two Flooding Methods on Bio-available Cd-Pb-Zn Contents of Contaminated Paddy Soil and Bacteria Community in Rice Rhizosphere [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1456-1467.]
- [15] 刘昭兵, 纪雄辉, 官迪, 等. 镉胁迫条件下淹水时间对水稻吸收累积镉的影响 [J]. *生态与农村环境学报*, 2017, 33(12): 1125-1131. [LIU Zhao-bing, JI Xiong-hui, GUAN Di, *et al.* Effects of Timing and Duration of Waterlogging on Cd Absorption and Accumulation by Rice Under Cadmium Stress [J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2017, 33(12): 1125-1131.]
- [16] HU P J, HUANG J X, OUYANG Y, *et al.* Water Management Affects Arsenic and Cadmium Accumulation in Different Rice Cultivars [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35(6): 767-778.
- [17] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(4): 696-704. [LI Yuanxinglu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, *et al.* Bioavailability of Arsenic and Cadmium, and Their Cumulative Control in Rice Grown on Arsenic-cadmium-contaminated Paddy Soils [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4): 696-704.]
- [18] 田桃, 曾敏, 周航, 等. 水分管理模式与土壤 Eh 值对水稻 Cd 迁移与累积的影响 [J]. *环境科学*, 2017, 38(1): 343-351. [TIAN Tao, ZENG Min, ZHOU Hang, *et al.* Effects of Different Water Managements and Soil Eh on Migration and Accumulation of Cd in Rice [J]. *Environmental Science*, 2017, 38(1): 343-351.]
- [19] 吴翰萍, 王明湖, 席杰君, 等. 不同农业废弃物生物炭及施用量对土壤 pH 值和保水保氮能力的影响 [J]. *中国土壤与肥料*, 2019(1): 87-92. [WU Yu-ping, WANG Ming-hu, XI Jie-jun, *et al.* The Effects of Different Agricultural Waste Biochars and Application Rates on Soil pH, Water Holding Capacity and N Adsorption [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(1): 87-92.]
- [20] 赵钰, 董黎明, 张艳萍, 等. 北京道路尘土与土壤植物中重金属形态分析与评价 [J]. *环境科学与技术*, 2013, 36(9): 169-174. [ZHAO Yu, DONG Li-ming, ZHANG Yan-ping, *et al.* Speciation Analysis and Pollution Assessment of Heavy Metals in Road Dust, Soils and Plants in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 36(9): 169-174.]
- [21] 冉洪珍, 郭朝晖, 肖细元, 等. 改良剂连续施用对农田水稻 Cd 吸收的影响 [J]. *中国环境科学*, 2019, 39(3): 1117-1123. [RAN Hong-zhen, GUO Zhao-hui, XIAO Xi-yuan, *et al.* Effects of Continuous Application of Soil Amendments on Cadmium Availability in Paddy Soil and Uptake by Rice [J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(3): 1117-1123.]
- [22] 唐爱玲. 土壤中有态砷钒铬的两种提取方法比较 [J]. *环境监*

- 控与预警, 2019, 11(1): 21-25, 31. [TANG Ai-ling. Comparative Study of Two Methods on Extraction of As, V and Cr in Soil [J]. Environmental Monitoring and Forewarning, 2019, 11(1): 21-25, 31.]
- [23] 马金晶, 罗雯, 张龙旺, 等. 微波消解-电感耦合等离子体质谱法测定人面果树中的重金属元素 [J]. 分析试验室, 2012, 31(7): 32-35. [MA Jin-jing, LUO Wen, ZHANG Long-wang, *et al.* Determination of Heavy Metal Elements in Garcinia Xanthochymus by ICP-MS Using Microwave Digestion for Sample Preparation [J]. Chinese Journal of Analysis Laboratory, 2012, 31(7): 32-35.]
- [24] WANG Y, LIU X H, SI Y B, *et al.* Release and Transformation of Arsenic From As-bearing Iron Minerals by Fe-reducing Bacteria [J]. Chemical Engineering Journal, 2016, 295: 29-38.
- [25] 钟松雄, 尹光彩, 陈志良, 等. Eh, pH 和铁对水稻土砷释放的影响机制 [J]. 环境科学, 2017, 38(6): 2530-2537. [ZHONG Song-xiong, YIN Guang-cai, CHEN Zhi-liang, *et al.* Influencing Mechanism of Eh, pH and Iron on the Release of Arsenic in Paddy Soil [J]. Environmental Science, 2017, 38(6): 2530-2537.]
- [26] RAMZANI P M A, KHALID M, ANJUM S, *et al.* Cost-effective Enhanced Iron Bioavailability in Rice Grain Grown on Calcareous Soil by Sulfur Mediation and Its Effect on Heavy Metals Mineralization [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(2): 1219-1228.
- [27] SHAH A L, NAHER U A, HASAN Z, *et al.* Arsenic Management in Contaminated Irrigation Water for Rice Cultivation [J]. Pertanika Journal of Tropical Agricultural Science, 2016, 39(2): 155-166.
- [28] PARSONS C T, COUTURE R M, OMOREGIE E O, *et al.* The Impact of Oscillating Redox Conditions; Arsenic Immobilisation in Contaminated Calcareous Floodplain Soils [J]. Environmental Pollution, 2013, 178: 254-263.
- [29] KOLB S E, FERMANICH K J, DORNBUSH M E. Effect of Charcoal Quantity on Microbial Biomass and Activity in Temperate Soils [J]. Soil Science Society of America Journal, 2009, 73(4): 1173-1181.
- [30] CAO X D, WAHBI A, MA L, *et al.* Immobilization of Zn, Cu, and Pb in Contaminated Soils Using Phosphate Rock and Phosphoric Acid [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 164(2/3): 555-564.
- [31] BEESLEY L, MARMIROLI M, PAGANO L, *et al.* Biochar Addition to an Arsenic Contaminated Soil Increases Arsenic Concentrations in the Pore Water but Reduces Uptake to Tomato Plants (*Solanum lycopersicum* L.) [J]. Science of the Total Environment, 2013, 454/455: 598-603.
- [32] 辜娇峰, 周航, 吴玉俊, 等. 复合改良剂对稻田 Cd、As 活性与累积的协同调控 [J]. 中国环境科学, 2016, 36(1): 206-214. [GU Jiao-feng, ZHOU Hang, WU Yu-jun, *et al.* Synergistic Control of Combined Amendment on Bioavailability and Accumulation of Cd and as in Rice Paddy Soil [J]. China Environmental Science, 2016, 36(1): 206-214.]
- [33] 张秀芝, 李强, 彭畅, 等. 不同添加量重金属对水稻产量及籽粒重金属富集的影响 [J]. 吉林农业科学, 2015, 40(4): 13-16. [ZHANG Xiu-zhi, LI Qiang, PENG Chang, *et al.* Effect of Heavy Metals With Different Additional Amount on Rice Yield and Heavy Metal Concentration in Grain [J]. Journal of Jilin Agricultural Sciences, 2015, 40(4): 13-16.]
- [34] 胡雪芳, 田志清, 梁亮, 等. 不同改良剂对铅镉污染农田水稻重金属积累和产量影响的比较分析 [J]. 环境科学, 2018, 39(7): 3409-3417. [HU Xue-fang, TIAN Zhi-qing, LIANG Liang, *et al.* Comparative Analysis of Different Soil Amendment Treatments on Rice Heavy Metal Accumulation and Yield Effect in Pb and Cd Contaminated Farmland [J]. Environmental Science, 2018, 39(7): 3409-3417.]
- [35] CHAUHAN R, AWASTHI S, TRIPATHI P, *et al.* Selenite Modulates the Level of Phenolics and Nutrient Element to Alleviate the Toxicity of Arsenite in Rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2017, 138: 47-55.

作者简介: 米雅竹(1994—), 女, 安徽阜阳人, 博士生, 主要研究方向为重金属污染土壤修复。E-mail: myz_study@163.com

(责任编辑: 王昌群)