

陈剑珠, 潘伯桂, 杨丽雯, 等. 水分管理耦合改良剂施用阻控水稻镉累积的机制[J]. 江苏农业学报, 2025, 41(6): 1147-1158.  
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2025.06.011

## 水分管理耦合改良剂施用阻控水稻镉累积的机制

陈剑珠<sup>1,2,3</sup>, 潘伯桂<sup>1,2,3,4</sup>, 杨丽雯<sup>1,2,3</sup>, 蔡一霞<sup>1,2,3</sup>, 蔡昆争<sup>1,2,3</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东 广州 510642; 2. 华南农业大学农业农村部华南热带农业环境重点实验室, 广东 广州 510642; 3. 华南农业大学广东省生态循环农业重点实验室, 广东 广州 510642; 4. 暨南大学生命科学技术学院/广东省环境污染控制与修复材料工程中心, 广东 广州 510632)

**摘要:** 镉(Cd)污染严重威胁农业生产, 迫切需要有效的修复措施确保粮食安全。单一措施难以有效阻控水稻对镉的吸收和累积, 故需采取多策略联合阻控。本研究通过盆栽试验, 以生物炭(BC)和硅肥(Si)作为土壤改良剂, 探讨其在连续淹水(CF)和干湿交替(AWD)水分管理条件下对稻田系统中镉迁移和转化的控制效果。结果表明, CF处理能提升土壤pH, 促进硅转化, 维持低氧化还原电位, 降低土壤镉有效性, 确保稻米质量安全。CF结合改良剂可有效控制镉含量, 其中CF+BC处理增产效果显著。AWD处理虽能提高土壤氧化还原电位和有机质含量, 却增加了土壤镉有效性, 不利于阻控水稻对镉的吸收和富集。然而, AWD+Si处理能显著降低成熟期水稻各部位镉含量, 减少稻米镉累积, 并且水稻产量较CF处理提高。综上, 水资源充足地区的长期淹水可有效降低稻米镉含量, 但需注意减产风险, 适时施用改良剂可提升产量; 水资源紧张地区的干湿交替灌溉, 建议配合改良剂施用以保障水稻安全生产。

**关键词:** 镉; 水稻; 水分管理; 生物炭; 硅肥; 安全生产

**中图分类号:** X53 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)06-1147-12

## Mechanisms of water management coupled with soil amendments for retarding cadmium accumulation in rice

CHEN Jianzhu<sup>1,2,3</sup>, PAN Bogui<sup>1,2,3,4</sup>, YANG Liwen<sup>1,2,3</sup>, CAI Yixia<sup>1,2,3</sup>, CAI Kunzheng<sup>1,2,3</sup>

(1. College of Natural Resources and Environment, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Key Laboratory of Tropical Agricultural Environment in South China, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 3. Guangdong Provincial Key Laboratory of Eco-Circular Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 4. College of Life Science and Technology, Jinan University/Guangdong Engineering Research Center of Environmental Pollution and Remediation Materials, Guangzhou 510632, China)

**Abstract:** Cadmium (Cd) contamination poses a severe threat to agricultural production, so effective remediation measures to ensure food security are urgently needed. Single remediation strategy is insufficient to effectively block the uptake and accumulation of Cd in rice. Therefore, a multi-strategy approach is required. In this study, pot experiments were conducted, using biochar (BC) and silicon fertilizer (Si) as soil amendments to explore their effectiveness in controlling

Cd migration and transformation in paddy systems under continuous flooding (CF) and alternate wetting and drying (AWD) water management conditions. The results indicated that the CF treatment could increase soil pH and facilitate the transformation of silicon, and maintain a lower redox potential, thereby it could reduce soil Cd bioavailability and ensure the safety of rice grain quality. The combination of CF with amendments effectively controlled Cd

收稿日期: 2024-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目(31870420); 广东省科技计划项目(2021A0505030057)

作者简介: 陈剑珠(1998-), 女, 彝族, 云南临沧人, 硕士研究生, 主要从事环境污染及其修复研究。(E-mail) 1697724645@qq.com

通讯作者: 蔡昆争, (E-mail) kzcai@scau.edu.cn

content, and the CF+BC treatment showed a significant increase in yield. Although AWD treatment increased soil redox potential and organic matter content, it also increased soil Cd bioavailability, which was not conducive to the control of Cd uptake and accumulation in rice. However, the AWD+Si treatment significantly reduced Cd content in all parts of mature rice plants, decreased Cd accumulation in rice grains, and increased rice yield compared to the CF treatment. In summary, long-term flooding in regions with abundant water resources can effectively reduce grain Cd content, but it may carry a slight risk of yield reduction, which can be mitigated by timely application of amendments to enhance yield. In areas with limited water resources, it is recommended to apply amendments in conjunction with AWD to ensure the safe production of rice.

**Key words:** cadmium; rice; water management; biochar; silicon fertilizer; safe production

土壤重金属污染是全球污染面积最大、最严重的环境问题之一。土壤中的镉(Cd)主要来自于工业废弃物排放、农药和化肥不合理施用以及大气沉降等,具有迁移性强、极易被植物吸收积累的特点<sup>[1-2]</sup>。据报道,中国受镉污染的耕地面积超过 $1.3 \times 10^5 \text{ hm}^2$ ,占全国耕地总面积的5%<sup>[2]</sup>。土壤镉污染严重影响粮食安全,并可通过食物链的生物累积和生物放大作用对食品安全和公共健康造成严重威胁。水稻作为中国重要的粮食作物,对镉具有较强的富集作用<sup>[3]</sup>。张妍等<sup>[4]</sup>对中国南方某矿区大米样本进行检测发现,镉超标率为8.8%~48.6%。因此,如何有效治理农田土壤镉污染,实现稻米安全生产对于保障国民经济高质量发展具有重要意义。

在土壤重金属修复治理措施中,土壤改良剂已被广泛运用,其可通过吸附、沉淀、络合以及其他物理化学机制,降低重金属在土壤环境中的有效性和流动性<sup>[5-6]</sup>。研究表明,土壤改良剂对改善土壤质量和土壤健康具有重要意义<sup>[7]</sup>,其中生物炭和硅肥是常见的改良剂,具有成本低、施用简便和成效快等优点<sup>[8-9]</sup>。生物炭是一种由有机物料在限氧条件下热解制备的具有多孔、低密度等特点的富碳介质,它可以通过静电吸附、阳离子交换、络合和沉淀来降低土壤中镉的生物利用度,有效抑制植物对镉的吸收和积累<sup>[10]</sup>。同时,生物炭还能通过内源释放养分元素(N、P、K、Ca、Mg等)来提高土壤肥力,促进作物生长,减轻重金属对植物的逆境伤害<sup>[11]</sup>。据报道,外源硅的施用是减轻镉的植物毒性和调节镉在土壤-水稻系统环境归趋的有力措施<sup>[12]</sup>。硅-镉的相互拮抗作用能够调节镉在稻田系统中的迁移与转化,有效阻控水稻对镉的吸收、迁移与积累<sup>[13-14]</sup>。此外,硅通过增加对土壤中竞争性阳离子的吸收降低土壤系统中镉在固-液二相间的通量平衡,从而提高镉的原位钝化率,进而有效降低镉的生物有效性<sup>[15]</sup>。然而,中国土壤镉污染严重,稻谷质量安全

仍不容乐观,现阶段普遍推行的污染修复技术以单项技术为主<sup>[16]</sup>,对镉污染稻田的修复与阻控效果有限,迫切需要寻求水稻安全高产的联合措施。

研究表明,在向镉污染土壤中添加改良剂的同时,采取一些因地制宜的耕作管理手段可有效降低镉的生物有效性,并阻控水稻对镉的吸收积累,这是目前较为系统和综合的镉污染治理途径<sup>[17-18]</sup>。联合阻控技术是近年来应对土壤镉污染的新型修复技术,它综合了多种阻隔和控制措施,以降低镉的生物有效性和植物吸收量。其中水分管理是联合阻控技术的关键因素,它不仅影响植物的生长和代谢,还驱动土壤理化性质变化和微生物群落演替<sup>[19-20]</sup>;结合当地的水文条件,根据植物不同阶段的需水规律采取合适的灌溉措施,有目的地科学调配田间水分,可以同时满足植物生长所需和节约水资源<sup>[21]</sup>。同时,水分管理会影响土壤结构、离子交换、pH、氧化还原、有机质含量、微生物数量和生物多样性等,进一步介导铁锰化合物、有机质等对重金属的吸附与固定,从而影响重金属的化学价态和生物有效性。目前常见的水分管理制度有淹水灌溉和干湿交替灌溉<sup>[22-23]</sup>。有研究表明,与干湿交替处理相比,淹水处理能增加土壤pH值和还原性,使镉的有效态转化为无效态,从而降低土壤镉活性<sup>[24]</sup>。然而,由于灌溉周期长、工作量大、不可控因素多等原因,加上灌溉成本增加和世界范围内水资源短缺的影响,造成水分调控的土壤镉污染控制问题难以实现<sup>[25]</sup>。同时,干湿交替处理条件下,镉在干湿界面上的有效性增强,极易增加水稻对镉的富集<sup>[26]</sup>。淹水处理虽然可以有效降低水稻籽粒中的镉含量,但持续淹水条件下土壤含氧量降低,导致根系腐烂和净光合作用速率降低,严重阻碍水稻生长发育,造成水稻减产<sup>[27]</sup>。因此,在实际应用中仅依靠水分管理无法有效兼顾阻控水稻镉吸收积累和促进稻米增产,需要探索在已有水分管理条件下水稻镉积累的

联合阻控与土壤镉污染的修复措施。

综上所述,单一措施均无法同时兼顾降镉与增产的效果,在实际生产中难以达到理想的修复效果,需要采用联合修复技术模式。水分管管理与改良剂组合不仅可以调节土壤性质,还可以为水稻提供有益元素,被证实是一种比单一改良剂添加或者单一水分管管理来阻控水稻对镉吸收累积效果更好的措施<sup>[28]</sup>。本研究拟以土壤-水稻系统中镉的迁移与转化为切入点,比较不同水分管管理耦合改良剂生物炭或硅肥对稻米镉积累的阻控效果,分析影响水稻镉累积的关键因素,阐明水分管管理耦合改良剂施用调控水稻对镉吸收、转运与累积的关键过程与机制,以期对镉污染稻区提供具有针对性与普适性的修复与土壤镉污染的阻控模式。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试土壤采自广东省韶关市曲江某镉污染农田(24°69'N,113°55'E),土壤基本理化性质:总镉含量 2.88 mg/kg,有效镉含量 1.41 mg/kg,pH 5.26,氧化还原电位(*E<sub>h</sub>*) 170 mV,电导率(*EC*) 0.55 mS/cm,阳离子交换量(*CEC*) 5.61 cmol/kg,有机质含量 35.77 g/kg,碱解氮含量 213.50 mg/kg,速效钾含量 100.13 mg/kg,速效磷含量 63.23 mg/kg。水稻品种为华航 31 号,来自华南农业大学农学院。生物炭由辽宁金和福农业开发有限公司提供,其基本性质:pH 9.04,碳、氢、氮以及硫含量(质量分数)分别为 50.55%、1.79%、1.89%和 0.17%<sup>[29]</sup>。

### 1.2 试验设计

2023 年 3-8 月在华南农业大学生态学系试验农场(23°21'N,113°42'E)温室内开展水分管管理和土壤改良剂联合处理的盆栽试验。试验设置 6 个处理,包括淹水(CF)、淹水+生物炭(CF+BC)、淹水+硅肥(CF+Si)、干湿交替(AWD)、干湿交替+生物炭(AWD+BC)、干湿交替+硅肥(AWD+Si),每个处理 3 个重复,每盆移栽 3 穴水稻秧苗,每穴 2 株。参考本研究团队以往的研究结果<sup>[13]</sup>,生物炭和硅肥的添加量分别为 2%和 2 mmol/kg。水分管管理方法:①淹水,水稻整个生育期保持 2~3 cm 淹水层;②干湿交替,从移栽开始,先灌 2~3 cm 水,待其消耗至无明水,土壤刚出现开裂再灌下一次水,使土面始终保持 2~3 cm 淹水层,重复此循环,直至收获。选取生长状况一致的水稻幼苗于 2023 年 3 月 30 日移栽到盆

中,返青后进行水分管管理,黑色塑料试验盆规格为 20 cm×28 cm×17 cm(下口径×上口口径×盆高),每盆装土 5 kg,添加相应含量的生物炭(由辽宁金和福农业开发有限公司使用水稻秸秆制备)和硅肥(以硅酸钾作为外源硅施用)后,加水搅拌均匀浸泡 10 d 待用。除水分管管理措施外,试验期间各处理的病虫害防治等栽培管理措施一致。施肥量参常规栽培,尿素(CH<sub>4</sub>N<sub>2</sub>O)施用量为每盆 3.0 g,磷酸二氢钾(KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>)施用量为每盆 1.0 g。

### 1.3 样品采集与处理

分别在水稻分蘖期、抽穗期和成熟期,对每个处理的水稻植株进行破坏性取样,植株按根、茎叶和谷粒分开储存,新鲜样品于 105 °C 的烘箱内杀青 30 min,75 °C 烘干至恒重,计算生物量,此后将样品粉碎后备用。同时在 3 个生育期(分蘖期、抽穗期和成熟期)对不同处理的土壤取样,室温自然风干,剔除杂物后磨碎,过 18 目、100 目标准检验尼龙网筛,供后续分析。

### 1.4 样品分析

土壤 pH 值使用酸度计(型号:PHS-3C,雷磁)测定;阳离子交换量(*CEC*)采用氯化钡-硫酸强迫交换法测定;氧化还原电位(*E<sub>h</sub>*)用笔式氧化还原电位(ORP)计(型号: SX-630)测定;电导率(*EC*)使用便携式电导率笔(型号: ZDS-EC)测定;土壤有效硅含量、碱解氮含量、有机质含量、速效磷含量以及速效钾含量的测定参照鲍士旦<sup>[30]</sup>的方法。

土壤和植株总镉含量采用微波消解-原子吸收光谱法测定,有效态镉含量的测定参考肖振林等<sup>[31]</sup>的方法,采用欧洲共同体标准物质局(BCR)连续提取法测定土壤中不同化学形态镉[可交换态镉(F1)、可还原态镉(F2)、可氧化态镉(F3)以及残渣态镉(F4)<sup>[32]</sup>]的含量,上述镉提取液及消解液用电感耦合等离子质谱仪(ICP-MS)测定。所有样品均消煮空白和标准样进行质量控制和结果校正。

水稻镉富集系数(*BCF*)和镉转移系数(*TF*)的计算:

$$BCF = \text{水稻器官镉含量}(\text{mg/kg}) / \text{土壤总镉含量}(\text{mg/kg})$$

$$TF_{\text{根-茎叶}} = \text{茎叶镉含量}(\text{mg/kg}) / \text{根镉含量}(\text{mg/kg})$$

$$TF_{\text{茎叶-籽粒}} = \text{籽粒镉含量}(\text{mg/kg}) / \text{茎叶镉含量}(\text{mg/kg})$$

## 1.5 数据统计分析

采用 Microsoft Excel 进行数据的计算,采用 IBM SPSS Statistics 26.0 进行数据的统计分析,采用 Origin 2023b 绘图。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)、双因素方差分析(Two-way ANOVA)和邓肯新复极差法(DMRT)进行方差分析和多重比较( $\alpha=0.05$ ),并用R×64 3.6.3 的软件包 ADE-4 进行主成分分析(PCA)。结果以平均值±标准差(SD)表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 水分管理耦合改良剂施用对土壤化学特性的影响

不同处理下的土壤化学特性表现不同(表 1)。改良剂的施用可以有效地提高土壤 pH,但也与灌溉方式有关;与 AWD 处理相比,CF 处理能够显著提高土壤 pH ( $P<0.05$ )。相对于 CF 处理,CF+BC 处理和 CF+Si 处理均能不同程度地提高土壤 pH,且差异显著( $P<0.05$ );与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理土壤 pH 显著增加( $P<0.05$ )。对于土壤氧化还

原电位,AWD 处理、AWD+Si 处理、AWD+BC 处理比 CF 处理均显著增加( $P<0.05$ )。与 CF 处理相比,CF+BC 处理土壤电导率显著增加 76.5% ( $P<0.05$ )。与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理土壤 EC 显著增加 77.3% ( $P<0.05$ )。CF+BC 处理和 CF+Si 处理土壤 CEC 与 CF 处理差异不显著( $P>0.05$ )。

CF+BC 处理和 CF+Si 处理的有机质含量分别较 CF 处理显著提高 11.6% 和 12.8% ( $P<0.05$ ),但 AWD+BC 处理和 AWD+Si 处理与 AWD 处理相比差异不显著( $P>0.05$ )。与 CF 处理相比,CF+BC 处理和 CF+Si 处理显著提高了土壤速效钾含量,尤其 CF+BC 处理,土壤速效钾含量高达 159.68 mg/kg;与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理土壤速效钾含量显著提高( $P>0.05$ ),高达 92.03 mg/kg。各处理之间土壤碱解氮含量、速效磷含量差异不显著( $P>0.05$ ),但是与 AWD 处理相比,CF 处理能够显著促进土壤有效硅的累积( $P<0.05$ ),且持续淹水条件下添加改良剂可向土壤中补充大量有效态的 K 和 Si 供水稻吸收利用。

表 1 施用水分管理耦合改良剂对土壤化学特性的影响

Table 1 Effects of combined water managements and amendments application on soil chemical properties

指标	CF	CF+BC	CF+Si	AWD	AWD+BC	AWD+Si
pH	6.14±0.04b	6.34±0.02a	6.32±0.02a	5.49±0.02d	5.62±0.02c	5.54±0.06cd
Eh(mV)	173.67±1.76b	172.33±0.67b	164.33±0.88c	184.00±1.00a	185.33±0.88a	185.00±1.15a
EC(mS/cm)	0.17±0.02de	0.30±0.01b	0.15±0.02e	0.22±0.02cd	0.39±0.02a	0.25±0.01bc
CEC(cmol/kg)	5.63±0.15abc	6.20±0.18a	5.90±0.27ab	5.06±0.19c	5.55±0.07abc	5.36±0.26bc
有机质含量(g/kg)	39.44±1.21b	44.02±0.79a	44.48±0.46a	42.65±1.38a	42.65±0a	42.65±0.79a
碱解氮含量(mg/kg)	140.00±2.02a	143.50±6.06a	143.50±2.02a	143.50±5.35a	134.17±2.33a	138.83±1.17a
速效钾含量(mg/kg)	29.32±0.62d	159.68±5.07a	39.41±2.01c	21.40±1.00d	92.03±5.23b	23.92±1.18d
速效磷含量(mg/kg)	58.35±0.31a	59.44±1.07a	57.81±0.52a	58.32±0.56a	60.00±0.95a	58.80±0.18a
有效硅含量(mg/kg)	109.04±1.91a	121.33±7.50a	116.96±3.96a	63.38±0.38b	74.13±5.50b	62.88±3.59b

CF 表示淹水处理;CF+BC 表示淹水+生物炭处理;CF+Si 表示淹水+硅肥处理;AWD 表示干湿交替处理;AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理;AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。Eh:氧化还原电位;EC:电导率;CEC:阳离子交换量。同一行数据后不同小写字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

### 2.2 水分管理耦合改良剂施用对土壤总镉含量、有效态镉含量以及镉赋存形态的影响

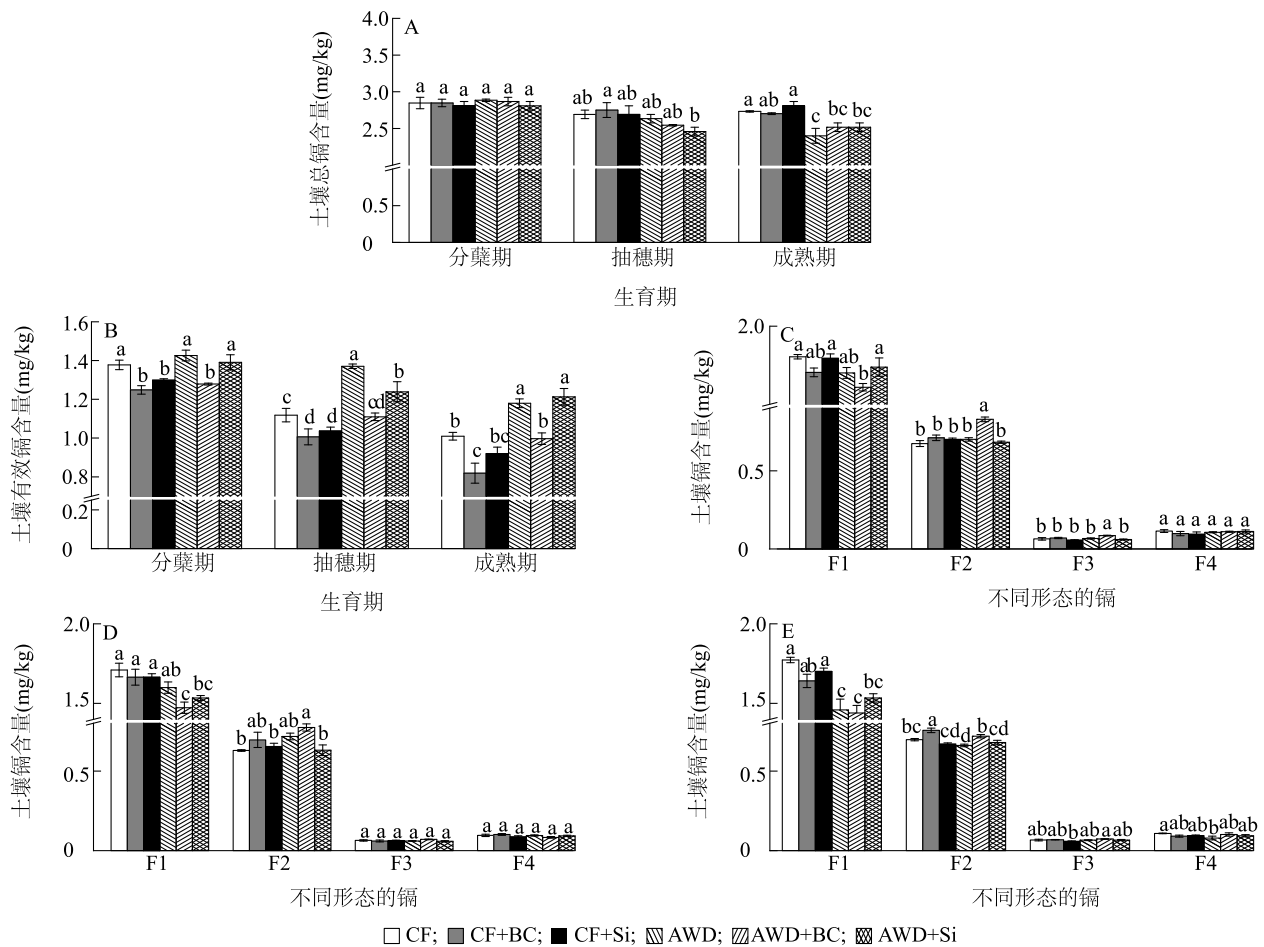
图 1A 显示,在水稻的 3 个生育期中,与 CF 处理相比,CF+BC 处理和 CF+Si 处理土壤总镉含量差异不显著( $P>0.05$ );与 AWD 处理相比,抽穗期时 AWD+Si 处理土壤总镉含量降低 6.6% ( $P>0.05$ )。图 1B 显示,随着水稻生育期的延长,土壤有效态镉含量整体呈现下降的趋势,CF+BC 处理土壤有效态

镉含量下降最明显。相较于 CF 处理,分蘖期 CF+BC 处理和 CF+Si 处理土壤有效态镉含量均显著降低( $P<0.05$ ),降低幅度分别为 9.4% 和 5.7%;抽穗期时,CF+BC 处理和 CF+Si 处理土壤有效态镉含量较 CF 处理分别显著降低了 10.0% 和 7.3% ( $P<0.05$ );成熟期 CF+BC 处理土壤有效态镉含量较 CF 处理显著降低了 18.9% ( $P<0.05$ )。与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理土壤有效态镉含量在分蘖期、

抽穗期和成熟期时分别显著降低了 10.3%、19.0%、15.5%。由此可知,在灌溉方式统一的情况下,BC 处理降低有效镉含量的作用更大。

水管理方式耦合改良剂施用对水稻 3 个生育期土壤镉赋存形态的影响如图 1C、图 1D、图 1E 所示。3 个生育期不同形态的镉含量均表现为可交换态镉含量>可还原态镉含量>残渣态镉含量>可氧化态镉含量。图 1C 显示,相较于 CF 处理,分蘖期 CF+BC 处理和 CF+Si 处理不同形态的镉含量没有显著差异 ( $P>0.05$ );与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理

虽使可交换态镉含量降低 5.4%,但显著增加了可还原态镉含量和可氧化态镉含量 ( $P<0.05$ ),分别增加 18.3% 和 27.3%。图 1D 显示,相较于 AWD 处理,抽穗期 AWD+BC 处理使可交换态镉含量显著降低 7.9% ( $P<0.05$ ),其他 3 种形态的镉含量没有显著差异 ( $P>0.05$ )。图 1E 显示,与 CF 处理相比,成熟期 CF+BC 处理使可还原态镉含量显著增加 8.4% ( $P<0.05$ );与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理可还原态镉含量显著增加 ( $P<0.05$ ),增幅为 8.8%。



F1:可交换态镉;F2:可还原态镉;F3:可氧化态镉;F4:残渣态镉。A:土壤总镉含量;B:土壤有效镉含量;C、D、E 分别为分蘖期、抽穗期、成熟期不同形态的镉含量。CF 表示淹水处理;CF+BC 表示淹水+生物炭处理;CF+Si 表示淹水+硅肥处理;AWD 表示干湿交替处理;AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理;AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P<0.05$ )。

图 1 水管理耦合改良剂施用对土壤总镉含量、有效态镉含量以及不同形态的镉含量的影响

Fig.1 Effects of water managements combined with amendments application on contents of total cadmium, available cadmium, and cadmium fraction in soil

### 2.3 水管理耦合改良剂施用对水稻生长的影响

从表 2 可以看出,各处理对水稻株高和分蘖数

的影响整体不显著 ( $P>0.05$ ),而对水稻各部位生物量和产量具有显著的影响 ( $P<0.05$ )。与 CF 处理

相比,CF+BC 处理和CF+Si 处理地上部生物量变化不显著( $P>0.05$ );与 AWD 处理相比,AWD+Si 处理地上部生物量显著提高 42.0% ( $P<0.05$ ),效果最佳。与 CF 处理相比,CF+BC 处理和CF+Si 处理水稻根部生物量变化不显著( $P>0.05$ ),但AWD+BC 处理和AWD+Si 处理较 AWD 处理分别显著提高 19.6%和 20.5%。值得注意的是,与 AWD 处理相

比,CF 处理成熟期产量显著降低了 29.7% ( $P<0.05$ )。然而,在 CF 处理基础上添加改良剂均能起到良好的增产效果,其中CF+BC 处理的增产率最高,达到 58.2% ( $P<0.05$ ),CF+Si 处理的增产效果不显著( $P>0.05$ )。与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理对水稻籽粒产量的增加效果不显著( $P>0.05$ ),而 AWD+Si 处理的水稻产量则显著下降( $P<0.05$ )。

表 2 施用水分管理耦合改良剂对水稻生长的影响

Table 2 Effects of combined water managements and amendments application on rice growth

处理	株高 (cm)	分蘖数 (个)	地上部干重 (g, 1 盆)	根干重 (g, 1 盆)	产量 (g, 1 盆)
CF	105.00±2.65a	17.33±0.33b	39.21±0.93bc	10.77±0.58ab	38.18±3.24b
CF+BC	103.67±2.33a	19.33±0.33ab	46.52±4.10ab	11.64±0.59ab	60.41±2.30a
CF+Si	97.33±3.18a	17.67±0.33b	36.80±1.89c	10.34±0.77b	42.43±2.60b
AWD	104.00±2.08a	19.00±0ab	35.86±2.87c	10.28±0.53b	54.32±2.70a
AWD+BC	104.67±3.18a	18.67±2.03ab	44.50±3.39abc	12.29±0.50a	56.92±3.13a
AWD+Si	102.33±1.45a	21.33±0.88a	50.92±1.61a	12.39±0.32a	45.39±1.86b

CF 表示淹水处理;CF+BC 表示淹水+生物炭处理;CF+Si 表示淹水+硅肥处理;AWD 表示干湿交替处理;AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理;AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。同一列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著( $P<0.05$ )。

#### 2.4 水分管理耦合改良剂施用对水稻各部位镉含量的影响

由表 3 可知,水分管理以及改良剂的施用对水稻吸收累积镉具有一定的影响,尤其是水稻根部镉含量随着水稻生育期的延长,受水分管理以及改良剂的影响变大。本研究中发现,水稻各部位镉含量为根>茎叶>籽粒。值得注意的是,根中镉含量远高于茎叶和籽粒镉含量。在水稻 3 个生育期中,与 CF 处理相比,CF+BC 处理和CF+Si 处理水稻根部镉含量波动较小,差异不显著( $P>0.05$ );与 AWD 处理相比,成熟期 AWD+Si 处理使水稻根部镉含量显著降低 41.1% ( $P<0.05$ )。

茎叶镉含量介于 0.13~13.24 mg/kg,随着生育进程的推进,CF 处理、CF+BC 处理茎叶镉含量整体逐渐降低,但差异不明显,而 AWD 处理、AWD+BC 处理和AWD+Si 处理镉含量变化则相反。与 CF 处理相比,分蘖期CF+Si 处理水稻茎叶镉含量显著降低( $P<0.05$ ),降幅为 66.7%,但抽穗期和成熟期 CF+Si 处理及 CF+BC 处理水稻茎叶镉含量差异不显著( $P>0.05$ )。与 AWD 处理相比,分蘖期 AWD+Si 处理水稻茎叶镉含量显著降低 40.8% ( $P<0.05$ );抽穗期 AWD+BC 处理和AWD+Si 处理水稻茎叶镉含量分别显著降低 21.6%和 42.7% ( $P<0.05$ );成熟

期 AWD+BC 处理和AWD+Si 处理水稻茎叶镉含量显著降低( $P<0.05$ ),由此可看出,在 AWD 条件下施用 Si 降镉效果更明显。

对于水稻籽粒而言,CF 处理的镉含量最低 (0.09 mg/kg),且CF+BC 处理和CF+Si 处理镉含量与 CF 处理相比差异不显著( $P>0.05$ ),但均低于稻米镉污染国家安全标准 (<0.20 mg/kg);与 AWD 处理相比,AWD+Si 处理籽粒镉含量显著降低 ( $P<0.05$ ),降低 30.2%。

#### 2.5 水分管理耦合改良剂施用对镉转运系数的影响

由表 4 可知,AWD 处理、AWD+BC 处理和 AWD+Si 处理的  $TF_{\text{根/茎叶}}$  随水稻的生长整体上逐渐增加。在水稻分蘖期,CF+BC 处理和CF+Si 处理  $TF_{\text{根/茎叶}}$  与 CF 处理相比分别显著降低 22.7% 和 45.3% ( $P<0.05$ );与 AWD 处理相比,AWD+BC 处理和AWD+Si 处理  $TF_{\text{根/茎叶}}$  分别显著降低 28.3% 和 32.6% ( $P<0.05$ )。在水稻抽穗期,相较于 CF 处理,CF+BC 处理和CF+Si 处理  $TF_{\text{根/茎叶}}$  分别显著降低 70.8%和 63.0% ( $P<0.05$ );在水稻成熟期,CF+BC 处理和CF+Si 处理  $TF_{\text{根/茎叶}}$  分别显著降低 53.9%和 55.2% ( $P<0.05$ ),而AWD+BC 处理和AWD+Si 处理  $TF_{\text{根/茎叶}}$  与 AWD 处理差异不显著 ( $P>0.05$ )。由此

可知,CF+BC 处理增加了镉由根部到茎叶迁移的难度。CF+BC 处理和CF+Si 处理的  $TF_{\text{茎叶/籽粒}}$  值与 CF 处理相比分别显著提高 134.5% 和 132.8% ( $P < 0.05$ )。

表 3 施用水分管理耦合改良剂对水稻各部位镉含量的影响

Table 3 Effects of water managements combined with amendments application on cadmium content in various parts of rice

生育期	项目	CF	CF+BC	CF+Si	AWD	AWD+BC	AWD+Si	项目	水分管理 F 值	改良剂 F 值	水分管理× 改良剂 F 值
分蘖期	根(mg/kg)	5.16±0.30c	4.51±0.37c	3.21±0.17c	10.75±1.73ab	14.33±1.56a	9.66±1.86b	根	52.21**	2.92	1.64
	茎叶(mg/kg)	0.39±0.04bc	0.26±0.03cd	0.13±0.01d	0.98±0.13a	0.94±0.09a	0.58±0.07b	茎叶	97.46**	11.56**	1.37
抽穗期	根(mg/kg)	1.11±0.10c	1.87±0.21c	1.52±0.04c	52.66±6.24b	71.17±6.62a	47.23±5.10b	根	254.84**	4.53*	4.16*
	茎叶(mg/kg)	0.37±0.05d	0.19±0.04d	0.19±0.04d	5.79±0.43a	4.54±0.59b	3.32±0.42c	茎叶	234.22**	7.42**	5.56*
成熟期	根(mg/kg)	1.98±0.27c	2.79±0.40c	2.09±0.19c	110.18±5.69a	122.27±6.15a	64.95±5.42b	根	844.67**	27.86**	26.97**
	茎叶(mg/kg)	0.31±0.04d	0.19±0.04d	0.16±0.04d	13.24±1.52a	8.87±0.68b	5.56±0.45c	茎叶	244.74**	15.55**	14.32**
	籽粒(mg/kg)	0.09±0c	0.12±0.01c	0.10±0.01c	1.82±0.26a	1.86±0.19a	1.27±0.11b	籽粒	191.48**	3.00	2.85

CF 表示淹水处理; CF+BC 表示淹水+生物炭处理; CF+Si 表示淹水+硅肥处理; AWD 表示干湿交替处理; AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理; AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。F 值:显著性分析的数值。在双因素方差分析中, F 值越大,表明各个因素对结果变量的影响越大,反之则越小。\* 表示在 0.05 水平上显著相关;\*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

表 4 施用水分管理耦合改良剂对镉转运系数(TF)的影响

Table 4 Effects of water managements combined with amendments application on transfer coefficients (TF) of cadmium

处理	$TF_{\text{根/茎叶}}$			$TF_{\text{茎叶/籽粒}}$
	分蘖期	抽穗期	成熟期	成熟期
CF	0.075±0.005b	0.349±0.080a	0.165±0.037a	0.290±0.034b
CF+BC	0.058±0.006c	0.102±0.012b	0.076±0.023b	0.680±0.212a
CF+Si	0.041±0.003d	0.129±0.028b	0.074±0.015b	0.675±0.112a
AWD	0.092±0.003a	0.111±0.005b	0.120±0.013ab	0.137±0.007b
AWD+BC	0.066±0.004bc	0.064±0.007b	0.073±0.006b	0.210±0.005b
AWD+Si	0.062±0.005bc	0.071±0.009b	0.086±0b	0.229±0.018b

CF 表示淹水处理; CF+BC 表示淹水+生物炭处理; CF+Si 表示淹水+硅肥处理; AWD 表示干湿交替处理; AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理; AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。同一列数据后不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

## 2.6 水分管理耦合改良剂施用对镉富集系数的影响

表 5 显示,水稻不同部位的 BCF 主要表现为  $BCF_{\text{根}} > BCF_{\text{茎叶}} > BCF_{\text{籽粒}}$ 。水稻生长中后期 CF 处理、CF+BC 处理和 CF+Si 处理的  $BCF_{\text{根}}$  明显低于分蘖期,而 AWD 处理、AWD+BC 处理和 AWD+Si 处理的  $BCF_{\text{根}}$  则随水稻生长逐渐增加,在成熟期达到最大值,分别高达 38.212、42.407 和 22.525。由此可以看出,干湿交替的灌溉方式下,水稻根系对镉的富集能力最大。相较于 AWD 处理,抽穗期 AWD+BC 处理  $BCF_{\text{根}}$  显著增加 35.1% ( $P < 0.05$ );成熟期,AWD+Si 处理  $BCF_{\text{根}}$  显著降低 41.1% ( $P < 0.05$ )。

分蘖期 CF+Si 处理的  $BCF_{\text{茎叶}}$  较 CF 处理显著降低 65.9% ( $P < 0.05$ ),抽穗期和成熟期 CF 处理、CF+BC 处理和 CF+Si 处理之间  $BCF_{\text{茎叶}}$  均无显著差异 ( $P > 0.05$ )。与 AWD 处理相比,分蘖期 AWD+Si 处

理  $BCF_{\text{茎叶}}$  显著降低 40.9% ( $P < 0.05$ );与 AWD 处理相比,抽穗期 AWD+BC 处理和 AWD+Si 处理分别显著降低 21.6%、42.6% ( $P < 0.05$ );与 AWD 处理相比,成熟期 AWD+BC 处理和 AWD+Si 处理分别显著降低 33.0%、58.0% ( $P < 0.05$ )。

不同处理下水稻籽粒对土壤中镉的富集能力差异极大,其中 AWD+BC 处理最高,CF 处理最低,均低于 1.000。与 AWD 处理相比,AWD+Si 处理  $BCF_{\text{籽粒}}$  显著降低 30.2% ( $P < 0.05$ );CF+BC 处理和 CF+Si 处理的  $BCF_{\text{籽粒}}$  与 CF 处理差异不显著 ( $P > 0.05$ )。

## 2.7 水稻籽粒镉累积与土壤性质的相关性分析

为评价水分管理耦合改良剂施用对籽粒镉累积的影响,对土壤性质和镉在土壤-水稻系统中的含量分布进行了相关性分析。结果(表 6)表明,籽粒镉

含量与 pH 值、土壤总镉含量和土壤有效硅含量呈极显著负相关 ( $P \leq 0.01$ ), 与土壤有效态镉含量、水稻根部镉含量和茎叶镉含量呈极显著正相关 ( $P \leq 0.01$ )。本研究发现, 土壤 pH、土壤有效硅含量均与土壤有效镉含量存在极显著负相关, 表明受水分管理与改良剂施用联合调控的土壤性质 (土壤 pH 和

土壤有效硅含量) 可能起到控制土壤有效镉含量的作用, 从而阻控水稻对镉的吸收、迁移与累积。以籽粒为中心, 发现水稻各组织镉含量显著地影响籽粒镉累积, 反映了水稻的根、茎等营养器官是一个巨大的镉储存库, 影响着镉向籽粒部分的转运与累积。

表 5 施用水分管理耦合改良剂对富集系数 (BCF) 的影响

Table 5 Effects of water managements combined with amendments application on enrichment factors (BCF)

处理	BCF <sub>根</sub>			BCF <sub>茎叶</sub>			BCF <sub>籽粒</sub>
	分蘖期	抽穗期	成熟期	分蘖期	抽穗期	成熟期	成熟期
CF	1.788±0.105c	0.385±0.036c	0.688±0.093c	0.135±0.013bc	0.129±0.017d	0.108±0.013d	0.030±0.001c
CF+BC	1.563±0.130c	0.649±0.071c	0.967±0.137c	0.090±0.009cd	0.067±0.013d	0.067±0.013d	0.040±0.005c
CF+Si	1.112±0.060c	0.528±0.013c	0.726±0.066c	0.046±0.004d	0.067±0.013d	0.054±0.013d	0.033±0.002c
AWD	3.728±0.601ab	18.265±2.165b	38.212±1.975a	0.340±0.044a	2.008±0.149a	4.592±0.527a	0.630±0.090a
AWD+BC	4.969±0.540a	24.683±2.295a	42.407±2.134a	0.326±0.031a	1.574±0.204b	3.075±0.236b	0.647±0.065a
AWD+Si	3.350±0.646b	16.380±1.770b	22.525±1.879b	0.201±0.023b	1.152±0.144c	1.929±0.156c	0.440±0.037b

CF 表示淹水处理; CF+BC 表示淹水+生物炭处理; CF+Si 表示淹水+硅肥处理; AWD 表示干湿交替处理; AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理; AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。不同小写字母表示处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ )。

表 6 籽粒镉累积与土壤性质的相关性分析

Table 6 Correlation analysis of grain cadmium accumulation and soil properties

处理	籽粒镉含量	pH	土壤总镉含量	土壤有效镉含量	茎叶镉含量	根部镉含量	土壤有效硅含量
籽粒镉含量	1.000						
pH	-0.924 **	1.000					
土壤总镉含量	-0.884 **	0.855 **	1.000				
土壤有效镉含量	0.604 **	-0.815 **	-0.571 *	1.000			
茎叶镉含量	0.949 **	-0.882 **	-0.869 **	0.621 **	1.000		
根部镉含量	0.966 **	-0.894 **	-0.776 **	0.570 *	0.933 **	1.000	
土壤有效硅含量	-0.868 **	0.970 **	0.798 **	-0.814 **	-0.828 **	-0.856 **	1.000

\* 表示在 0.05 水平上显著相关; \*\* 表示在 0.01 水平上显著相关。

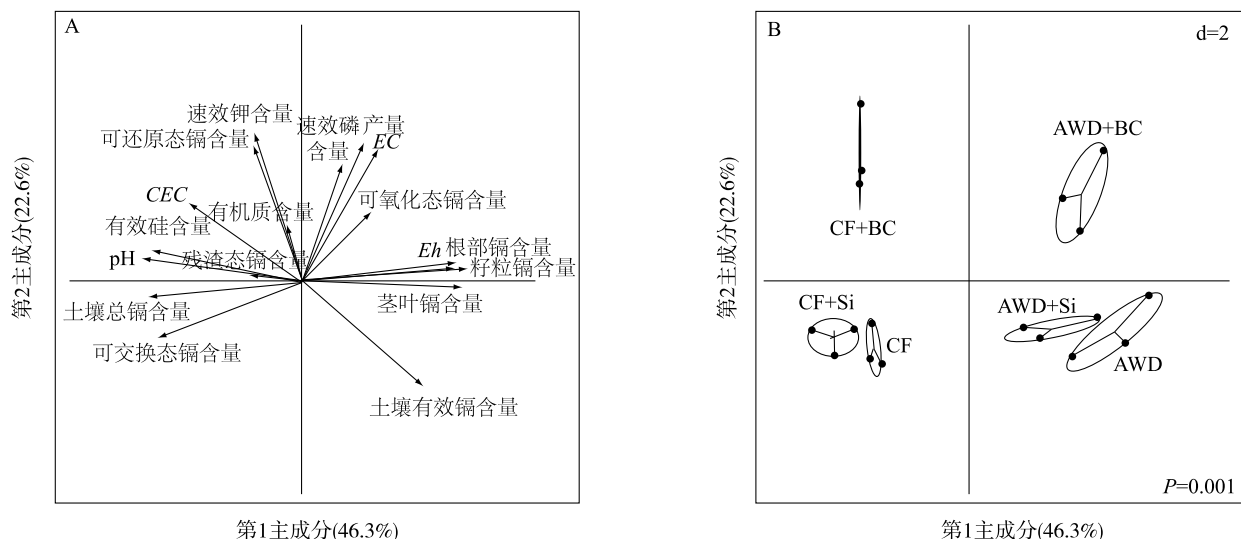
## 2.8 水稻镉含量、土壤性质及水稻产量的综合分析

为了更好地探讨水分管理耦合改良剂施用对镉在土壤-水稻系统的反馈调控机制, 分别对土壤性质、土壤镉转化以及水稻对镉的吸收累积特性进行主成分分析 (图 2)。结果 (图 2A) 表明, 第 1 主成分 (PC1) 和第 2 主成分 (PC2) 累计方差贡献率达到 68.9%, PC1 方差贡献率为 46.3%, 其中 CEC、氧化还原电位、pH、土壤有效硅含量、土壤总镉含量、可交换态镉含量、根部镉含量、茎叶镉含量、籽粒镉含量是关键影响因素; PC2 方差贡献率为 22.6%, 其中速效钾含量、速效磷含量、EC、水稻产量、可还原态镉含量是关键影响因素。主成分得分图 (图 2B) 显

示, 各处理间镉的土壤与植物的反馈差异达到了极显著水平 ( $P = 0.001$ ), 尤其是 AWD 及其改良剂添加处理与 CF 及其改良剂添加处理相比, 在 PC1 轴上出现明显的差异分离现象, 占总解释率的 46.3%。结合主成分荷载图 (图 2A) 来看, AWD 处理与土壤 Eh 以及水稻组织镉含量增加的趋势呈显著正相关, 表明 AWD 处理能够显著增加土壤氧化性以及增加水稻对镉吸收与累积的风险; 而在 AWD 处理下, 2 种改良剂的添加可有效阻控水稻镉富集, 尤其是 AWD+BC 处理显著地趋向于促进土壤镉的惰性转化和增加土壤速效磷含量以及增加籽粒产量的方向。另外, CF 处理能有效缓解水稻对镉的吸收

累积,但对产量存在负反馈调节;而在淹水条件下,CF处理比CF+Si处理更倾向于增加土壤残渣态镉含量以及土壤总镉滞留量,而CF+BC处理能更有效地提高土壤养分含量,保障稻米质量和增产。综合评价结果显示,AWD处理可以促进水稻增产但

对水稻镉吸收累积的阻控能力不足,改良剂的添加可以强化对水稻镉吸收累积的阻控效果;CF处理可以有效阻控水稻对镉的富集但略有减产风险,而改良剂的添加可以强化水稻对镉富集的阻控效果并维持增产效果。



A: 主成分载荷图, B: 主成分得分图。CF 表示淹水处理; CF+BC 表示淹水+生物炭处理; CF+Si 表示淹水+硅肥处理; AWD 表示干湿交替处理; AWD+BC 表示干湿交替+生物炭处理; AWD+Si 表示干湿交替+硅肥处理。Eh: 氧化还原电位; EC: 电导率; CEC: 阳离子交换量。

图2 处理间镉含量、土壤性质及产量的主成分分析

Fig.2 Principal component analysis of cadmium content, soil properties and yield between treatments

### 3 讨论

稻田土壤镉污染严重威胁到土壤环境质量安全,亟需采取有力的修复措施来保障农业安全生产。水稻镉累积是土壤-水稻系统互作的结果,由镉在土壤中的有效态以及水稻自身生理活动共同决定<sup>[33]</sup>。近年来,越来越多的研究表明,镉在土壤-植物系统中的迁移和积累受到土壤 pH、Eh、有机质含量和养分有效性等土壤性质调控<sup>[34-35]</sup>。然而,当前单一措施的修复效果普遍受到限制,难以高效地阻控水稻对镉的吸收与积累。因此,有必要采用多种手段的联合阻控策略。尽管已有关于采用水管理改良剂联合阻控植物对镉吸收累积的研究<sup>[36]</sup>,但水管理耦合改良剂组合的最佳方案、阻控机理和长期效果仍不甚明确。

#### 3.1 水管理耦合改良剂施用对土壤性质与镉有效性的影响

水分是影响植物生长的关键因素,同时也是控制土壤理化性质变化的重要因子,它可以影响土壤

的物理基础、化学性质及微生物种类等<sup>[37]</sup>。不同的水管理方式会导致土壤水分含量<sup>[38]</sup>、pH、氧化还原、有机质含量等因素的变化,从而影响土壤镉的迁移、转化和生物有效性<sup>[39]</sup>。本研究发现,淹水灌溉(CF)可以降低土壤镉有效性,减少镉向地上部转运,降低稻米镉含量。这是因为淹水灌溉可以提高土壤 pH 值,促进土壤硅转化,维持较低的氧化还原电位,从而抑制镉的溶解和释放<sup>[40]</sup>。另外,有研究发现稻田频繁的干湿交替过程强烈影响镉元素的形态转化,进而影响其迁移性和生物有效性<sup>[41-42]</sup>。在本研究中,干湿交替灌溉可以改善土壤结构和通气性,增加土壤有机质含量;但是,AWD 处理提高了土壤氧化度,导致土壤镉溶解与释放量增加,从而增加稻米中镉的累积风险<sup>[43]</sup>。

考虑到水管理方式对稻田系统镉阻控效果的缺陷,本研究以生物炭和硅肥为土壤改良剂,探究其在水管理驱动下对重金属元素镉的形态分布与有效性的影响。结果显示,施加生物炭和硅肥能显著降低土壤有效态镉含量。研究发现,在土壤还原和

再氧化过程中,可溶解态镉的比例与土壤 pH 呈正相关,但与氧化还原电位呈负相关<sup>[26]</sup>。生物炭的施用可以影响土壤特性,进而影响土壤中重金属的固定<sup>[44]</sup>。另外,在土壤淹水灌溉处理(CF)中,施加生物炭能提高土壤 CEC、EC 和速效钾含量,增加土壤对镉的螯合作用和土壤养分有效性以改善土壤环境。因此,与单一的灌溉处理相比,耦合改良剂的施用是一种综合阻控技术,可以兼顾水分管理和土壤改良,实现对土壤镉有效性的双重调控,提高修复效率。

### 3.2 水分管理耦合改良剂施用对水稻产量与稻米质量安全的影响

不同的水分管理方式对水稻各部位镉积累的影响不同。在本研究中,淹水灌溉处理能明显降低水稻各部位镉含量,并抑制镉在水稻各组织间的转移,有效减少籽粒镉富集量,保障稻米质量安全。但本研究结果还表明,CF 处理可能导致水稻减产,这可能是由于 CF 处理会降低土壤的通透性和氧气含量,影响水稻的根系生长和养分吸收<sup>[45]</sup>。AWD 处理能显著地增加水稻产量,但是 AWD 处理的水稻各部位对镉富集效率较大,尤其是籽粒镉含量均显著高于 CF 处理,说明镉在水稻地上部的积累不仅取决于根系的积累,而且还由镉的迁移能力决定<sup>[13]</sup>。

有研究表明,生物炭和硅肥在作为土壤改良剂的同时,亦可充当水稻的促生调节剂。一方面,生物炭是一种含有植物养分和有机碳的有机肥料,可促进根系生长和提高植物生物量,且通过改变根际微生物群落和根系分泌物影响水稻植株对镉的吸收和积累<sup>[46-47]</sup>。另一方面,水稻是一种喜硅作物,施用外源硅能缓解镉胁迫引起的负面影响,促进镉在根组织的固定,降低镉在水稻体内的迁移能力,改善光合作用和营养代谢,增强抗氧化能力<sup>[12-15]</sup>。本研究中,淹水灌溉联合改良剂(生物炭和硅肥)的施用能够显著提高水稻产量,且地上部分镉的转移系数有降低的趋势,表明 CF 联合改良剂不仅可以克服淹水导致的减产风险,还能增加镉向地上部转移的难度<sup>[27,48]</sup>。在 AWD 处理下,施用生物炭和硅肥可有效地阻控水稻镉富集,其中 AWD+Si 处理显著降低了成熟期水稻各部位镉含量,抑制了稻米中镉的累积,这可能是因为在干湿交替的灌溉条件下,水稻根细胞壁中硅化细胞体的形成,可以减少镉从根

到茎叶的转移<sup>[49]</sup>,这表明在水资源匮乏地区采用干湿交替的灌溉方式并补充改良剂是实现水稻安全生产的有效途径。

## 4 结论

阻控水稻镉累积的效果因水分管理耦合不同改良剂的组合而异。在本研究中,淹水(CF)处理可以有效地降低镉生物有效性,但略有减产风险。CF 耦合改良剂使土壤 pH 值从酸性逐渐接近中性,降低土壤镉有效性以及水稻对镉的吸收,并使水稻籽粒镉含量达到国家食品安全标准。干湿交替(AWD)水分管理可以提高水稻产量,增加土壤有机质含量和土壤氧化还原电位,但是对于阻控水稻镉累积的能力不足,而 AWD 耦合改良剂可以有效地减少稻米镉富集并对产量起到正反馈调节效果,但镉含量仍存在超标风险。本研究结果可为运用水分管理耦合改良剂施用阻控水稻镉累积的机理的研究提供参考。然而,考虑到植物-土壤系统的复杂性,未来应在不同的时间点开展不同类型的土壤试验,以验证水分管理耦合改良剂施用对重金属的生物可利用性的广泛影响。

### 参考文献:

- [1] HU Y A, CHENG H F, TAO S. The challenges and solutions for cadmium-contaminated rice in China; a critical review[J]. *Environment International*, 2016, 92: 515-532.
- [2] YANG N K, WANG H B, WANG H J, et al. Screening maize (*Zea mays* L.) varieties with low accumulation of cadmium, arsenic, and lead in edible parts but high accumulation in other parts; a field plot experiment[J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2021, 28: 33583-33598.
- [3] LI K, CAO C L, MA Y B, et al. Identification of cadmium bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.) by the soil-plant transfer model and species sensitivity distribution[J]. *The Science of the Total Environment*, 2019, 692: 1022-1028.
- [4] 张妍,张磊,程红光,等. 南方某矿区土壤镉污染及作物健康风险研究[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(12): 2752-2761.
- [5] 张英英,施志国,李彦荣,等. 施用改良剂对重度镉胁迫下甜高粱重金属吸收和转运的调控效应[J]. *西南农业学报*, 2021, 34(9): 1959-1968.
- [6] 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.
- [7] LI Q, LI L F, DU H H, et al. Soil conditioners promote the formation of Fe-bound organic carbon and its stability[J]. *Journal of Environmental Management*, 2024, 349: 119480.

- [ 8 ] QIU Z, TANG J W, CHEN J H, et al. Remediation of cadmium-contaminated soil with biochar simultaneously improves biochar's recalcitrance[J]. *Environmental Pollution*, 2020, 256: 113436.
- [ 9 ] 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]. *Chemosphere*, 2020, 242: 125128.
- [ 10 ] CANG L, XING J F, LIU C, et al. Effects of different water management strategies on the stability of cadmium and copper immobilization by biochar in rice-wheat rotation system[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, 202: 110887.
- [ 11 ] 吴 岩, 杜立宇, 梁成华, 等. 生物炭与沸石混施对不同污染土壤镉形态转化的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(1): 286-290.
- [ 12 ] CAI Y X, PAN B G, LIU B Q, et al. The Cd sequestration effects of rice roots affected by different Si management in Cd-contaminated paddy soil[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 849: 157718.
- [ 13 ] PAN B G, CAI Y X, LIU B Q, et al. Abatement of Cd in rice grain and toxic risks to human health by the split application of silicon at transplanting and jointing period[J]. *Journal of Environmental Management*, 2022, 302: 114039.
- [ 14 ] 潘伯桂, 刘丙权, 蔡昆争, 等. 硅素分期施用对镉污染水稻光合特性及物质积累的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(14): 5934-5944.
- [ 15 ] 潘伯桂, 莫汉乾, 王 维, 等. 硅素对水稻幼苗镉积累及抗胁迫应答的调节效应[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(3): 1096-1104.
- [ 16 ] 曾秀君, 程 坤, 黄学平, 等. 石灰、腐植酸单施及复配对污染土壤铅镉生物有效性的影响[J]. *生态与农村环境学报*, 2020, 36(1): 121-128.
- [ 17 ] 张庆沛, 李 冰, 王昌全, 等. 秸秆还田配施无机改良剂对稻田土壤镉赋存形态及生物有效性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(12): 2345-2352.
- [ 18 ] CHEN L M, WU W G, HAN F X, et al. Agronomic management and rice varieties controlling Cd bioaccumulation in rice[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2019, 16(13): 2376.
- [ 19 ] 王亚丹, 乔冬梅, 陆红飞. 水分管理对重金属污染土壤植物修复效果的影响研究综述[J]. *土壤通报*, 2022, 53(6): 1499-1505.
- [ 20 ] KANNENBERG S A, ANDEREGG W R L, BARNES M L, et al. Dominant role of soil moisture in mediating carbon and water fluxes in dryland ecosystems[J]. *Nature Geoscience*, 2024, 17: 38-43.
- [ 21 ] ZHUANG Y H, ZHANG L, LI S S, et al. Effects and potential of water-saving irrigation for rice production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 217: 374-382.
- [ 22 ] LI F, YIN H, ZHU T Q, et al. Understanding the role of manganese oxides in retaining harmful metals: insights into oxidation and adsorption mechanisms at microstructure level[J]. *Eco-Environment & Health*, 2024, 3(1): 89-106.
- [ 23 ] 吕银斐. 不同水分管理方式对水稻镉积累的影响[D]. 贵阳: 贵州大学, 2015.
- [ 24 ] LI X, ZHOU Y, LUO L H, et al. Effect of water management under different soil conditions on cadmium and arsenic accumulation in rice[J]. *Agronomy*, 2023, 13(10): 2472.
- [ 25 ] SEIDEL S J, WERISCH S, SCHÜTZE N, et al. Impact of irrigation on plant growth and development of white cabbage[J]. *Agricultural Water Management*, 2017, 187: 99-111.
- [ 26 ] GUO Y A, ZHANG S, GUSTAVE W, et al. Dynamics of cadmium and arsenic at the capillary fringe of paddy soils: a microcosm study based on high-resolution porewater analysis[J]. *Soil & Environmental Health*, 2024, 2(1): 100057.
- [ 27 ] HUANG X Y, FAN C W, XIE D Y, et al. Synergistic effects of water management and silicon foliar spraying on the uptake and transport efficiency of cadmium in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. *Plants*, 2023, 12(6): 1414.
- [ 28 ] ALVARENGA P, FERNÁNDEZ-RODRÍGUEZ D, ABADES D P, et al. Combined use of olive mill waste compost and sprinkler irrigation to decrease the risk of As and Cd accumulation in rice grain [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 835: 155488.
- [ 29 ] 陈海浪, 罗家欣, 何 洋, 等. 减氮配施生物炭对水稻生产力及土壤细菌群落组成的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2023, 42(9): 1983-1994.
- [ 30 ] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [ 31 ] 肖振林, 王 果, 黄瑞卿, 等. 酸性土壤中有效态镉提取方法研究[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(2): 795-800.
- [ 32 ] PUEYO M, MATEU J, RIGOL A, et al. Use of the modified BCR three-step sequential extraction procedure for the study of trace element dynamics in contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*, 2008, 152(2): 330-341.
- [ 33 ] ARAO T, 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 & Technology*, 2009, 43(24): 9361-9367.
- [ 34 ] CHAVEZ E, HE Z L, STOFFELLA P J, et al. Concentration of cadmium in cacao beans and its relationship with soil cadmium in southern Ecuador[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, 533: 205-214.
- [ 35 ] ZHOU H, ZHOU X, ZENG M, et al. Effects of combined amendments on heavy metal accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) planted on contaminated paddy soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014, 101: 226-232.
- [ 36 ] 李园星露, 叶长城, 刘玉玲, 等. 硅肥耦合水分管理对复合污染稻田土壤 As-Cd 生物有效性及稻米累积阻控[J]. *环境科学*, 2018, 39(2): 944-952.
- [ 37 ] ABEGUNRIN T P, AWE G O, IDOWU D O, et al. Impact of wastewater irrigation on soil physico-chemical properties, growth and water use pattern of two indigenous vegetables in southwest Nigeria[J]. *CATENA*, 2016, 139: 167-178.

- [38] 李奕含,周蓓蓓,任培琦,等. 水肥调控模式对滨海盐碱地水肥盐迁移及春玉米水肥利用率的影响[J]. 排灌机械工程学报, 2023,41(1):80-88.
- [39] 罗秋红,吴俊,柏斌,等. 水稻镉吸收与转运机理的研究进展[J]. 土壤,2021,53(6):1142-1151.
- [40] 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.
- [41] HU P J, ZHANG Y, WANG J J, et al. Mobilization of colloid- and nanoparticle-bound arsenic in contaminated paddy soils during reduction and reoxidation[J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(26):9843-9853.
- [42] LI X Y, CAO Z Y, DU Y P, et al. Multi-metal contaminant mobilizations by natural colloids and nanoparticles in paddy soils during reduction and reoxidation [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024,461:132684.
- [43] SEBASTIAN A, PRASAD M N V. Cadmium minimization in rice. A review [J]. Agronomy for Sustainable Development, 2014, 34(1):155-173.
- [44] CHEN X K, JIANG S J, WU J C, et al. Three-year field experiments revealed the immobilization effect of natural aging biochar on typical heavy metals (Pb,Cu,Cd) [J]. Science of the Total Environment, 2024,912:169384.
- [45] 张露,吴龙龙,黄晶,等. 增氧处理对稻田土壤微生物量碳、氮和酶活性的影响[J]. 中国水稻科学,2022,36(4):410-418.
- [46] JING F, CHEN C, CHEN X M, et al. Effects of wheat straw derived biochar on cadmium availability in a paddy soil and its accumulation in rice[J]. Environmental Pollution,2020,257:113592.
- [47] ZHANG M, SHAN S D, CHEN Y G, et al. Biochar reduces cadmium accumulation in rice grains in a tungsten mining area-field experiment: effects of biochar type and dosage, rice variety, and pollution level[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2019, 41(1):43-52.
- [48] RIZWAN M, ALI S, ABBAS T, et al. Residual effects of biochar on growth, photosynthesis and cadmium uptake in rice (*Oryza sativa* L.) under Cd stress with different water conditions [J]. Journal of Environmental Management, 2018,206:676-683.
- [49] WANG X X, JIANG J C, DOU F G, et al. Simultaneous mitigation of arsenic and cadmium accumulation in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings by silicon oxide nanoparticles under different water management schemes [J]. Paddy and Water Environment, 2021, 19(4):569-584.

(责任编辑:陈海霞)