

乙烯和水分管理对水稻 Cd 积累和健康风险指数的影响

张明富, 王 松, 李佳原, 王雪彬, 李 蒙, 牙丰硕, 黄丹妮, 何 冰,
顾明华, 王学礼, 韦燕燕*

广西大学农学院, 广西南宁 530004

摘 要: 本文主要研究了水分管理和叶面喷施外源植物激素乙烯 (ETH) 对水稻 (*Oryza sativa* L.) 根表铁膜、镉 (Cd) 积累以及健康风险指数的影响。通过盆栽试验, 在拔节期、扬花期和灌浆期喷施 2 种浓度 (50 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$) 乙烯 (ETH) 3 次, 同时采用连续淹水 (CF) 和间隔淹水 (IF) 2 种水分管理模式。结果表明: (1) 与 IF 水分管理模式相比, CF 水分管理模式, 土壤中 Cd 的赋存形态改变, 弱酸可溶态 Cd 由 36% 降至 30%, 可还原态 Cd 由 30% 增加到 40%; (2) 与 IF 水分管理模式相比, CF 水分管理模式, 水稻根表铁膜中 Fe 和 Cd 含量均显著增加, 外源喷施 ETH 也会显著提高 2 种水分管理模式铁膜中 Fe 和 Cd 含量, 最多提高了 50.59% 和 58.06%; (3) 与 IF 水分管理模式相比, CF 水分管理模式, 水稻根、叶、糙米及精米中的 Cd 含量均显著下降; 外源喷施 ETH 也有利于降低 2 种水分管理模式下水稻各部位 Cd 含量, 其中 CF+50ETH 处理下精米中 Cd 含量最低, 与 CF 处理相比, 精米中 Cd 含量由 0.68 mg/kg 降至 0.45 mg/kg, 降幅为 33.82%; (4) 外源喷施 ETH 显著降低了 2 种水分管理模式 Cd 从根-茎和茎-籽粒的转运系数, 均以 CF+50ETH 处理下转运系数最低, 与 CF 处理相比分别降低了 55.17% 和 23.81%; (5) CF 水分管理模式和喷施 ETH 处理均对降低稻米 Cd 健康风险指数有很好的作用。由此可见, CF 水分管理模式和外源喷施 ETH 在降低水稻对 Cd 的积累中具有一定的应用前景。

关键词: 镉; 水稻; 乙烯; 水分管理; 根表铁膜; 健康风险指数

中图分类号: X173; S511 文献标志码: A

Effects of Ethylene and Water Management on Cd Accumulation and Health Risk Index in Rice

ZHANG Mingfu, WANG Song, LI Jiayuan, WANG Xuebin, LI Meng, YA Fengshuo, HUANG Danni,
HE Bing, GU Minghua, WANG Xueli, WEI Yanyan*

College of Agricultural, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China

Abstract: The effects of water management and foliar spraying of exogenous plant hormone ethylene (ETH) on the accumulation of rhizosphere iron membrane, cadmium (Cd) and health risk index of rice were studied. Through the potting test, two concentrations (50 $\mu\text{mol/L}$ and 100 $\mu\text{mol/L}$) ethylene (ETH) were sprayed three times at the jointing stage, the flowering stage and the grouting stage, and the water management modes of continuous flooding (CF) and interval flooding (IF) were adopted. Compared with the IF water management mode, the storage morphology of Cd in the soil was changed in the CF water management mode, and the soluble Cd was reduced from 36% to 30%, and the reducing state Cd was increased from 30% to 40%. Compared with the IF water management mode, the Fe and Cd content in the rice root surface iron film were significantly increased in the CF water management mode, and the exogenous spraying of ETH also significantly increased the Fe and Cd content in the iron film under the two water management modes, up to 50.59% and 58.06%. Compared with the IF water management mode, the Cd content in rice roots, leaves, brown rice and polished rice decreased significantly under the CF water management mode. The external spraying of ETH was also

收稿日期 2022-10-13; 修回日期 2022-12-29

基金项目 国家自然科学基金项目 (No. 41967045); 桂农科盟项目 (No. 202214)。

作者简介 张明富 (1997—), 男, 硕士研究生, 研究方向: 植物营养学。*通信作者 (Corresponding author): 韦燕燕 (WEI Yanyan), E-mail: 115238635@qq.com。

conducive to reducing the cadmium content of rice under the two water management modes, among which the Cd content in polished rice under CF+50ETH treatment was the lowest, and the Cd content in polished rice decreased from 0.68 mg/kg to 0.45 mg/kg, a decrease of 33.82% compared with CF treatment. Exogenous spraying of ETH significantly reduced the transport coefficients of Cd from rhizome and stem-grain under the two water management modes, and the transport coefficients were the lowest under CF+50ETH treatment, which was reduced by 55.17% and 23.81% respectively compared with CF treatment. CF water management mode and spray ETH treatment have a good effect on reducing the health risk index of rice Cd. It can be seen that CF water management mode and exogenous spraying of ETH have certain application prospects for reducing the accumulation of Cd in rice.

Keywords: cadmium; rice; ethylene; water management; iron plaque; health risk index

DOI: 10.3969/j.issn.1000-2561.2024.05.022

镉 (Cd) 是一种对人体和植物都有严重毒害的重金属元素, 对人体来说, Cd 会引起癌症、器官中毒、死亡等^[1]; 对植物来说, Cd 会影响植物的光合作用, 干扰植物对营养的吸收以及生长发育^[2], 严重时导致植物死亡。当前, 我国耕地土壤重金属污染现状十分严峻, 其中重金属 Cd 污染最为严重和广泛^[3]。有研究认为, 我国约 40% 的耕地存在不同程度的 Cd 污染问题, 至少 $2.786 \times 10^9 \text{ m}^2$ 的耕地受到污染^[4], 在一些地区 Cd 污染还有加重趋势^[5]。中国是水稻 (*Oryza sativa* L.) 种植和生产大国, 每年水稻种植面积约 3000 万 hm^2 ^[6], 水稻产量约占粮食总产量的 32.2%^[7], 然而水稻对 Cd 具有较强的富集作用^[8]。农业农村部调查显示, 我国稻米 Cd 超标率高达 10%, 长期食用 Cd 超标大米会严重危害人体健康^[9]。近几年社会上关于 Cd 大米的新闻屡见报道, 稻米质量安全问题引发关注。当前, 已有多种重金属修复阻控技术应用于实现 Cd 中轻度污染耕地的安全利用^[10], 如客土、换土法、电动修复技术、土壤淋洗技术、植物修复技术等^[11], 但这些技术在实际生产应用中存在一些局限, 如客土、换土难以处理大面积土壤, 电动修复技术成本过高, 土壤淋洗技术会降低土壤肥力导致作物减产, 植物修复技术修复周期长, 影响正常农业生产^[12], 而我国人多地少, 难以通过大规模土地休耕修复土壤污染来减少 Cd 对农作物生长的影响。因此, 寻找一种简单、安全、低成本、便于大面积推广的措施来减少稻米的含 Cd 量及减少人体 Cd 暴露风险具有重要意义。水分管理作为一种成本较低、可操作性强、无二次污染的农艺调控措施, 在降低稻米 Cd 含量方面具有良好的效果。研究表明适宜的水分管理可以影响土壤中重金属活性及其迁移转化能力, 从而阻控水稻对重金属的吸收累积^[13], 具有广泛的应用前景。同时也有研究发现水稻等湿地植物在淹水的条件下, 可以

通过叶片将大气中的氧气输送到植物根系, 由根系将这部分氧气和其他的氧化性物质释放到根际, 使渍土壤中存在还原性物质 Fe^{2+} 发生氧化, 生成铁氧化物/氢氧化物, 通过这种连续的氧化作用所形成的铁氧化物/氢氧化物呈胶膜状态包裹在根表, 称之为根表铁膜, 根表铁膜影响植物对重金属元素的吸收^[14]。但邵晓伟等^[15]和张雨婷等^[16]研究表明单一水分管理对降低水稻对 Cd 的吸收效果有限。近年来, 植物生长调节物质 (plant growth regulators) 作为一类对植物的生长发育有调节作用的有机化学物质, 具有作用多、用量小、见效快等优点被广泛应用^[17-20]。其中植物生长调节物质乙烯 (ETH) 被证实参与到植物对机械伤害、干旱、水淹、低温和重金属胁迫等抗逆境响应中^[21-22]。针对禾本科植物, 冯文静等^[23]研究表明 $1 \mu\text{mol/L}$ ETH 可以显著降低小麦苗期地上部和根系 Cd 含量。刘娟等^[24]认为外源乙烯增强玉米苗期根细胞壁对 Cd 的吸附作用和液泡的区室化作用, 减少 Cd 向地上部位的转运, 并通过提高抗坏血酸 (AsA) 和谷胱甘肽 (GSH) 的合成, 从而提升玉米幼苗的 Cd 耐受能力。

目前, 在中轻度 Cd 污染条件下, 采用单一技术往往不能将农作物可食部位中 Cd 的含量降低至安全水平之下^[25], 因此, 需要采用联合修复技术模式。然而, 关于水分管理联合叶面喷施乙烯对成熟期稻米中 Cd 阻控的研究较少, 其可能机制仍不明确^[26]。本研究旨在通过盆栽试验, 研究分析不同水分管理模式和叶面喷施 ETH 对水稻 Cd 积累和人体健康风险指数的影响, 为受污染耕地的安全合理利用提供决策参考和理论依据, 减少 Cd 污染带来的危害。

1 材料与方法

1.1 材料

供试水稻品种为 Y 两优 7 号。供试土壤风干

粉碎后过筛,每盆装 6.5 kg 土壤。水稻种子用 30% H_2O_2 溶液消毒 15 min 并用去离子水清洗 3 次,均匀撒在垫有滤纸的托盘中,再覆盖一层滤纸,加入适量去离子水使上下两层滤纸充分湿润,放入恒温培养箱中 25 °C 避光催芽 1 d。将催芽后的种子播于育苗盘中,置于温室大棚中培养。培养 15 d 后选取生长状况一致的幼苗移栽至土壤中,每盆 3 穴,每穴 2 株。

土壤的基本理化性质如下: pH 6.4、有机质 20.5 g/kg、速效氮 68 mg/kg、速效磷 29.7 mg/kg、速效钾 265 mg/kg、总 Cd 含量 1.33 mg/kg, 超过《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准》(GB 15618—2018)所规定 $5.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 的水田中 Cd 的风险筛选值 (0.4 mg/kg), 未达到其风险管控值 (2.0 mg/kg), 可能存在食用农产品不符合质量安全标准等土壤污染风险, 原则上应采取农艺调控、替代种植等安全利用措施。

1.2 方法

1.2.1 试验设计 采用连续淹水 (CF) 和间隔淹水 (IF) 2 种水分管理模式。连续淹水: 试验过程中保持土壤表面 2 cm 水层覆盖; 间隔淹水: 水稻生长早期, 保持土壤淹水, 孕穗期后, 灌溉 2 cm 水层覆盖土壤表面, 自然干燥后再次加水, 重复此循环。在拔节期、扬花期和灌浆期分别喷施 50 $\mu\text{mol/L}$ (50ETH) 和 100 $\mu\text{mol/L}$ (100ETH) 的 ETH 3 次。试验设 6 个处理, 每个处理 3 次重复。6 个处理分别为: (1) IF; (2) IF+50ETH; (3) IF+100ETH; (4) CF; (5) CF+50ETH; (6) CF+100ETH。在水稻生长期间, 施肥情况按照正常施肥量进行, 施肥总量为氮肥 (尿素) 475 mg/kg, 磷肥 (磷酸二氢钾) 750 mg/kg, 钾肥 (氯化钾) 400 mg/kg。基肥与追肥比为 7 : 3。

1.2.2 样本采集 水稻成熟后, 用流水冲洗附着在根系上的土壤, 然后用去离子水冲洗根系并擦干。将水稻全株分为根、茎、叶和籽粒 4 部分, 105 °C 下杀青 30 min, 65 °C 下烘干。称量各部分的干重, 将烘干样品粉碎后放入塑料密封袋备用。

采用抖根分离法收集根际土, 首先轻轻抖落大块不含根系的土壤作为非根际土, 然后用毛刷将根表附着的土收集起来作为根际土^[27]。

1.2.3 测量项目及方法 (1) 株高、生物量和千粒重的测定。采样时用直尺测量植株从根部到主穗顶部的株高高度, 样品烘干后测定干重并记录。

(2) 光合作用的测定。植株叶片光合作用使用

美国 LI-COR 公司生产的 LI-6400 便携式光合测定仪。具体操作是在光照充足的上午 9: 00—11: 00 时, 选取水稻由上往下数第三片完全展开叶, 测定部位尽量选取叶片中部并避开主叶脉, 选用红蓝光源叶室测定水稻叶片气体交换参数, 每个处理测定 3 次, 最终结果取 3 次平均值。测定条件流量计设定为 500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 测定光强为 1500 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, CO_2 浓度为大气 CO_2 浓度。测定结果由仪器系统自动给出, 包括净光合速率 (P_n)、胞间 CO_2 浓度 (C_i)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)。

(3) 根表铁膜中 Fe 和 Cd 的测定。采用 DCB 法提取根表铁膜中的 Fe 和 Cd。具体提取方法是收获后, 将水稻根部用去离子水冲洗, 放入白色塑料瓶中。然后加入 0.3 mol/L $\text{Na}_3\text{C}_6\text{H}_5\text{O}_7 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ 溶液 40 mL, 1 mol/L NaHCO_3 溶液 5 mL, 3 g $\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_4$ 试剂, 确保根完全浸没于提取液中。然后放置在 25 °C 250 r/min 的振荡箱中振荡 3 h, 再将溶液转移到 100 mL 容量瓶中定容, 最后用原子吸收分光光度法测定 Fe 和 Cd 的含量。

(4) 植物中 Cd 的测定。将 DCB 法提取后的水稻根系用去离子水清洗干净, 连同地上部放到 65 °C 烘箱中烘干, 并称取干重。将烘干的水稻根系和地上部粉碎, 准确称取 0.2000 g 样品至消解管中, 加入 6 mL 硝酸, 拧紧盖子放置在通风橱中冷消解, 过夜。冷消解后使用微波消解仪 (美国 CEM 公司, MARS5) 消解, 消解完成后使用赶酸架赶酸, 赶酸完成后移至 50 mL 容量瓶中定容。用 ICP-MS (美国, PE) 测定消解液中 Cd 的含量。样品消解过程中使用的各种酸均为优级纯。

(5) 土壤中 Cd 形态的测定。采用改进的 BCR 法提取土壤中 Cd 形态^[28], 弱酸可溶态: 称取 1.000 g 土壤样品置于 100 mL 离心管中, 加入 0.1 mol/L 乙酸溶液 40 mL, 加盖, 在 $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下 250 r/min 振荡提取 16 h。在离心机上于 3000 r/min 离心 20 min 后, 取上清液过滤, 保存于离心管中, 待测。加入 20 mL 去离子水洗涤残余物, 振荡 20 min, 离心, 弃清洗液。可还原态: 向下一步剩余物中加入 0.5 mol/L 盐酸羟胺溶液 ($\text{NH}_2\text{OH} \cdot \text{HCl}$, 用 HNO_3 调节 $\text{pH}=2$) 40 mL, 加盖, 在 $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下 250 r/min 振荡提取 16 h。在离心机上于 3000 r/min 离心 20 min 后, 取上清液过滤, 保存于离心管中, 待测。加入 20 mL 去离子水洗涤残余物, 振荡 20 min, 离心, 弃清洗液。可氧化态: 向剩余物中缓慢滴加 10 mL 过氧化氢, 加盖, 在 $(22 \pm 3)^\circ\text{C}$ 下消

化 1 h, 继续在(85±2)℃恒温水浴消化 1 h, 直至体积减少到少于 3 mL。再加入 10 mL 过氧化氢, 重复以上操作直至体积减少到大约 1 mL。取下冷却, 加入 1 mol/L 乙酸铵溶液 (HNO₃ 调节 pH=2) 50 mL, 在(22±3)℃下 250 r/min 振荡提取 16 h, 取出后在 3000 r/min 离心 20 min, 取上清液过滤后待测。加入 20 mL 去离子水洗涤残余物, 振荡 20 min, 离心, 弃清洗液。残渣态: 将残余物全部转移到聚四氟乙烯消解管中, 加入 10 mL HNO₃、1 mL HF 和 1 mL HClO₄, 高温消煮后赶酸至黄豆粒大小, 定容待测。

各步骤得到的提取液参照 GB/T 17138—1997 《环境污染分析方法》, 采用原子吸收光谱仪进行测定。

1.2.4 相关参数 (1) 健康风险指数 (HRI) 计算。重金属的健康风险评估是评价在受污染土壤上种植食品质量的有效工具^[29-30], Cd 健康风险指数 (HRI) 是通过估计每日 Cd 摄入量 (DIM) 和参考摄入量 (RF_D) 来确定的, Cd 的参考摄入量 (RF_D) 为 0.001 mg/(kg·d)^[31]。HRI=DIM/RF_D Cd 的 DIM 估计如下:

$$DIM=C_{\text{metal}}\times C_{\text{factor}}\times D_{\text{food intake}}/B_{\text{average weight}}$$

式中, C_{metal} 是籽粒 Cd 含量 (mg/kg), C_{factor} 是转换因子 (0.085), D_{food intake} 是每人每天的谷物摄取量 0.4 kg, B_{average weight} 是人体的平均重量, 参考我国成年男性的平均体重确定, 即每人 69.6 kg^[32]。

(2) 转运系数计算^[33]。根-茎转运系数=茎部 Cd 含量/根部 Cd 含量茎-籽粒转运系数=籽粒 Cd 含量/茎部 Cd 含量

1.3 数据处理

采用 SPSS 25.0 统计软件包(SPSS Inc., USA)对数据进行双向方差分析, 比较水分管理和植物激素对水稻重金属积累和健康风险指数的影响。根据方差分析结果, 采用 Duncan 多重极差检验在 0.05 概率水平上检验均数的差异。当因素之间无显著的相互作用时, 对数据进行 t 检验, 以确定处理之间的显著差异^[34]。

2 结果与分析

2.1 不同处理对土壤 Cd 形态分布的影响

图 1 是土壤中 4 种不同形态的 Cd (弱酸可溶态、可还原态、可氧化态和残渣态) 在不同处理后的分布结果。可见, 与 IF 处理相比, CF 处理明显降低了土壤中弱酸可溶态 Cd 的含量, 弱酸

可溶态 Cd 由 36%降至 30%, 同时提高了土壤中可还原态 Cd 的含量, 可还原态 Cd 由 30%增加到 40%, 但对其他形态的 Cd 无明显影响; 喷施 ETH 处理对土壤中 Cd 的各个形态分布无明显影响。

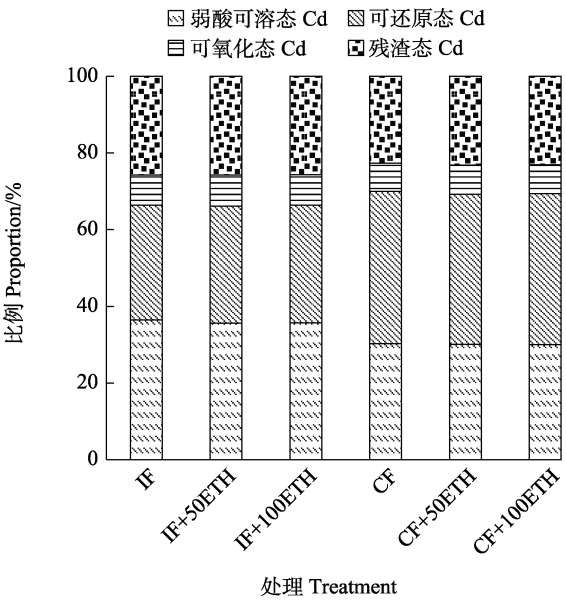


图 1 不同处理下土壤 Cd 各形态占比

Fig. 1 Proportion of each form of Cd in soil under different treatments

2.2 不同处理对水稻叶片光合作用参数的影响

Cd 胁迫下不同处理对水稻叶片 P_n、G_s、C_i 和 T_r 的影响见表 1。不同处理对水稻的 G_s、T_r 影响差异不显著。与 IF 处理相比, CF+50ETH 和 CF+100ETH 处理显著提高了水稻叶片的 P_n (P<0.05), 分别提高了 5.49%和 6.22%。CF+50ETH 和 CF+100ETH 处理显著降低了水稻叶片的 C_i

表 1 不同处理下水稻叶片光合作用参数

Tab. 1 Photosynthetic parameters of rice leaves under different treatments

处理 Treat- ment	P _n /(μmol·m ⁻² ·s ⁻¹)	G _s /(mol·m ⁻² ·s ⁻¹)	C _i /(μL·L ⁻¹)	T _r /(mmol·m ⁻² ·s ⁻¹)
IF	16.39±0.53 ^a	0.35±0.02 ^a	320.59±4.10 ^a	5.22±0.10 ^a
IF+ 50ETH	16.87±0.51 ^{ab}	0.38±0.02 ^a	317.31±6.87 ^{ab}	5.33±0.08 ^a
IF+ 100ETH	16.98±0.50 ^{ab}	0.35±0.01 ^a	315.26±5.82 ^{ab}	5.21±0.01 ^a
CF	16.43±0.62 ^a	0.36±0.02 ^a	316.42±4.99 ^{ab}	5.30±0.08 ^a
CF+ 50ETH	17.29±0.52 ^b	0.36±0.01 ^a	310.87±3.17 ^b	5.27±0.05 ^a
CF+ 100ETH	17.41±0.38 ^b	0.37±0.01 ^a	312.49±4.19 ^b	5.31±0.10 ^a

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 (P<0.05)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments (P<0.05).

($P<0.05$), 与 IF 处理相比分别降低了 3.03%和 2.53%。

2.3 不同处理对水稻生长的影响

不同处理对水稻生长参数的影响见表 2。与 IF 处理相比, CF 和 IF+100ETH 处理显著降低了水稻的株高 ($P<0.05$), 其他处理则对株高影响差异不显著。除 CF 处理外, 其他处理都显著提高了水稻的茎干重 ($P<0.05$), 其中 IF+50ETH 和 CF+50ETH 效果最好, 分别提高了 16.48%和 15.73%。各个处理对水稻根的干重影响差异不显著。IF+100ETH 处理和 CF+50ETH 处理显著提高了水稻的籽粒重 ($P<0.05$), 分别提高了 17.34%和 17.91%。

表 2 不同处理下水稻生长指标
Tab. 2 Rice growth index under different treatments

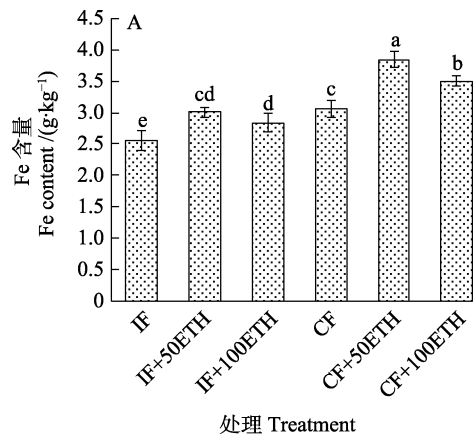
处理 Treatment	株高 Plant height/cm	茎干重 Straw dry weight/g	根干重 Root dry weight/g	籽粒重 Grain weight/g
IF	85.73±0.65 ^a	30.46±1.13 ^a	4.63±0.27 ^a	29.81±0.57 ^a
IF+50ETH	86.51±0.31 ^a	35.48±1.04 ^c	4.65±0.31 ^a	29.91±5.72 ^a
IF+100ETH	82.01±0.55 ^b	33.11±0.21 ^{bc}	4.39±0.05 ^a	34.98±0.86 ^b
CF	82.11±1.24 ^b	32.27±0.99 ^{ab}	4.32±0.31 ^a	33.38±0.8 ^{ab}
CF+50ETH	85.21±1.04 ^a	35.25±1.51 ^c	4.44±0.21 ^a	35.15±0.53 ^b
CF+100ETH	85.26±0.83 ^a	34.41±2.26 ^{bc}	4.62±0.18 ^a	33.05±0.95 ^{ab}

注: 不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

2.4 不同处理对水稻根表铁膜中 Fe 和 Cd 含量的影响

不同处理对水稻根表铁膜中 Fe 含量的影响



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$).

图 2 不同处理下水稻根表铁膜 Fe、Cd 含量

Fig. 2 Fe, Cd content in root iron plaque of rice under different treatments

见图 2A。与 IF 处理相比, 其他处理显著提高了水稻根表铁膜中 Fe 的含量 ($P<0.05$), 其中以 CF+50ETH 处理效果最好, 提高了 50.59%; 不施加 ETH 的 CF 处理也显著提高了水稻的根表铁膜中的 Fe 含量 ($P<0.05$), 提高了 20.00%。

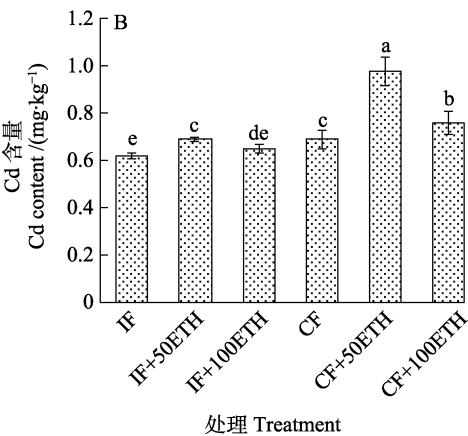
不同处理对水稻根表铁膜中 Cd 含量的影响见图 2B。与 IF 处理相比, IF+50ETH、CF、CF+50ETH、CF+100ETH 处理均显著提高了水稻根表铁膜中的 Cd 含量 ($P<0.05$), 其中 CF+50ETH 处理的效果最好, 提高了 58.06%, 而 IF+100ETH 处理虽然也能够提高根表铁膜中的 Cd 含量, 但其结果与 IF 处理相比差异不显著。

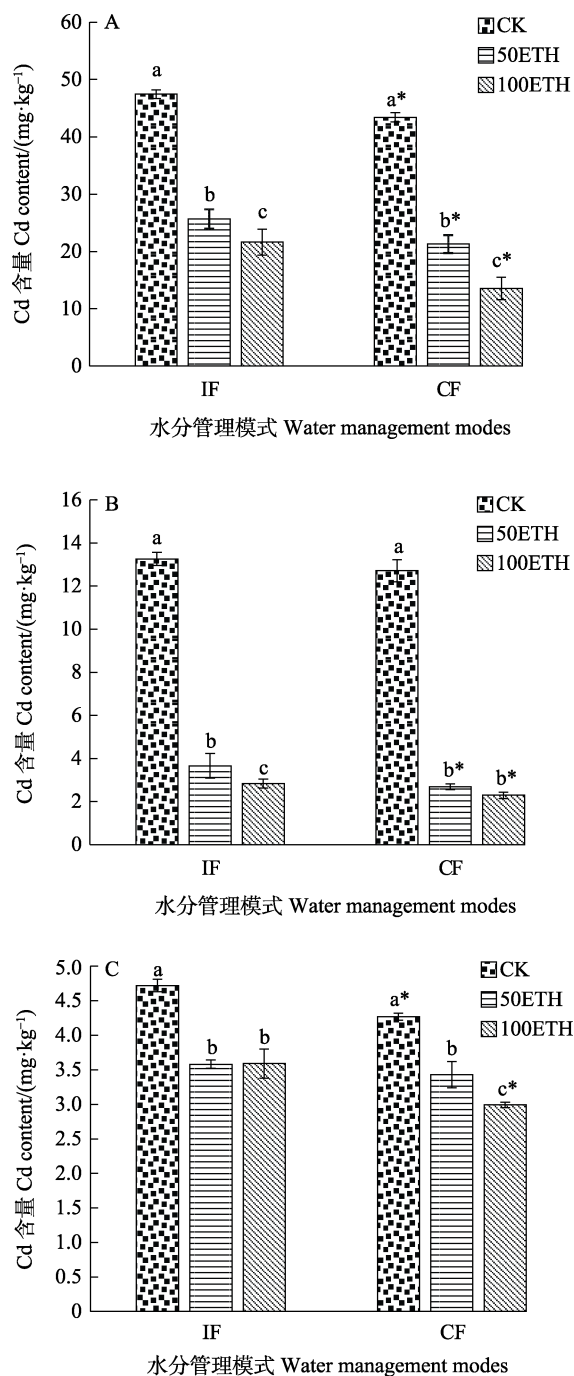
2.5 不同处理对水稻各部位 Cd 含量的影响

2.5.1 不同处理对水稻根、茎、叶片 Cd 含量的影响 不同处理对水稻根部 Cd 含量的影响见图 3A, 水分管理对水稻根中 Cd 含量的影响差异显著 ($P<0.05$)。与 IF 处理相比, CF 处理显著降低了水稻根部 Cd 含量。此外, 50 ETH 和 100 ETH 处理均显著降低了水稻根部 Cd 含量 ($P<0.05$), 分别降低了 17.01%和 37.46%。

不同处理对水稻茎 Cd 含量的影响见图 3B, 不同的水分管理方式对水稻茎的 Cd 含量影响差异不显著。喷施 ETH 对水稻茎 Cd 的吸收影响差异显著 ($P<0.05$)。与不喷施激素的 CK 相比, 50 ETH 处理和 100 ETH 处理显著降低了水稻茎中 Cd 的含量。在整个生育期, CF 处理使水稻茎中的 Cd 含量下降了 78.90%和 81.35%。

不同处理对水稻叶片 Cd 含量的影响见图 3C, 在 CK 和喷施 100 ETH 处理下, CF 处理显著降低





不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$) ; *表示相同 ETH 浓度下处理间差异显著 ($P < 0.05$) 。

Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P < 0.05$); * indicates significant difference between treatments at the same ETH concentration ($P < 0.05$).

图 3 不同处理下水稻根 (A)、茎 (B)、叶 (C) Cd 含量
Fig. 3 Cd content in rice root (A), stem (B) and leaf (C) under different treatments

了水稻叶片中的 Cd 含量, 分别降低了 9.53% 和 16.71%, 但在 50 ETH 处理下, 水分管理对水稻叶片中 Cd 含量影响差异不显著。相同水分管理模式下, 喷施 2 种浓度的 ETH 对水稻叶片的 Cd

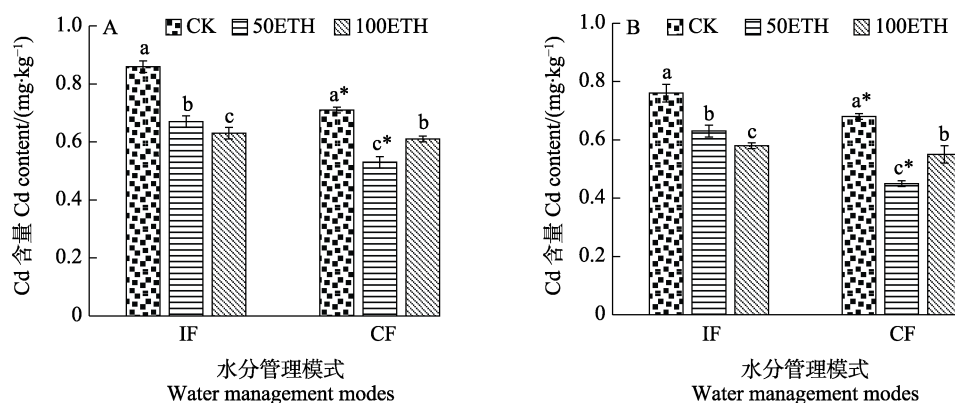
吸收影响差异显著 ($P < 0.05$), 与 CK 相比, 50 ETH 处理和 100 ETH 处理显著降低了水稻叶片中 Cd 的含量, 在 CF 处理中, 分别降低了 19.67% 和 29.97%; 在 IF 处理中, 分别降低了 24.15% 和 23.94%。

2.5.2 不同处理对水稻糙米、精米中 Cd 含量的影响 喷施 ETH 和水分管理对水稻糙米 Cd 含量的影响见图 4A, 水分管理显著影响糙米中 Cd 的积累 ($P < 0.05$)。与 IF 处理相比, CF 处理在 CK 和喷施较低浓度的 ETH 情况下显著降低了糙米的 Cd 含量。在 2 种水分管理模式下, 喷施 ETH 显著降低糙米中 Cd 含量 ($P < 0.05$)。IF 处理下, 50 ETH 和 100 ETH 处理糙米中 Cd 含量显著低于 CK (Cd 含量为 0.86 mg/kg), 分别降低 22.09% 和 26.74%。在 CF 处理下, 50 ETH 和 100 ETH 处理糙米中 Cd 含量分别比 CK (Cd 含量为 0.71 mg/kg) 显著降低 25.35% 和 14.08%。

喷施 ETH 和水分管理对水稻精米 Cd 含量的影响见图 4B。结果表明, 水分管理对精米 Cd 积累有显著影响 ($P < 0.05$)。喷施 ETH 对精米中 Cd 含量有显著影响 ($P < 0.05$)。在 IF 处理下, 与 CK 组 (Cd 含量为 0.76 mg/kg) 相比, 50 ETH 和 100 ETH 显著降低精米的 Cd 含量, 分别降低了 17.11% 和 23.68%。在 CF 处理下, 与 CK (Cd 含量为 0.68 mg/kg) 相比, 外源施用 50 ETH 和 100 ETH 显著降低了精米中 Cd 的含量, 分别降低了 33.82% 和 19.11%。

2.5.3 不同处理对水稻 Cd 转运系数的影响 喷施 ETH 和水分管理对水稻中 Cd 的转运系数的影响见图 5, 由图 5A 可见, 与 CK 相比, 在 2 种水分管理模式下喷施 ETH 均显著降低了 Cd 水稻根-茎的转运系数, 在 CF 处理下, 50 和 100 ETH 处理分别使得 Cd 根-茎的转运系数降低了 55.17% 和 41.38%; 在 IF 处理下, 50 ETH 和 100 ETH 处理分别使得 Cd 从根-茎的转移系数降低了 48.95% 和 53.04%。

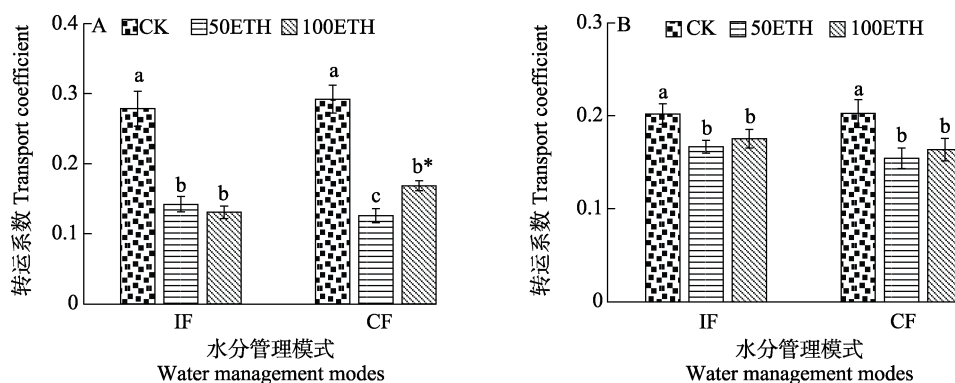
Cd 水稻茎-籽粒运输的转运系数见图 5B, 与 CK 处理相比, 在 2 种水分管理模式下喷施 ETH 均显著降低了 Cd 水稻茎-籽粒的转运系数, 在 CF 处理下, 50 ETH 和 100 ETH 处理分别使得 Cd 茎-籽粒的转移系数降低了 23.81% 和 19.13%; 在 IF 处理下, 喷施 50 $\mu\text{mol/L}$ 和 100 $\mu\text{mol/L}$ ETH 分别使得 Cd 茎-籽粒的转运系数降低了 17.33% 和 13.21%。



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) ; *表示相同 ETH 浓度下处理间差异显著 ($P<0.05$) 。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$); * indicates significant difference between treatments at the same ETH concentration ($P<0.05$).

图 4 不同处理下水稻糙米 (A)、精米 (B) 中 Cd 含量

Fig. 4 Ca content in unpolished rice (A) and polished rice (B) under different treatments



不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$) ; *表示相同 ETH 浓度下处理间差异显著 ($P<0.05$) 。
Different lowercase letters indicate significant difference among treatments ($P<0.05$); * indicates significant difference between treatments at the same ETH concentration ($P<0.05$).

图 5 不同处理下水稻中 Cd 从根-茎 (A)、茎-籽粒 (B) 转运系数

Fig. 5 Ca transport coefficients from root-stem (A) and stem-to-grain (B) in rice under different treatments

2.6 水稻根表铁膜 Fe 和各部位 Cd 含量与转运系数间的相关性

对水稻根表铁膜 Fe 和 Cd 含量、各部位 Cd 含量和转运系数相关性分析 (表 3) 结果表明, 水稻根表铁膜 Fe 含量与根表铁膜 Cd 含量呈极显著正相关 ($P<0.01$), 与水稻根、茎、叶、糙米和精米的 Cd 含量、Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著负相关 ($P<0.01$)。水稻根表铁膜中的 Cd 含量, 与水稻茎、糙米中的 Cd 含量呈显著负相关 ($P<0.05$), 与精米 Cd 含量、Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著负相关 ($P<0.01$), 与根部和叶片 Cd 含量无显著相关。水稻根部 Cd 含量与茎、叶、糙米和精米的 Cd 含量、Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。水稻茎部 Cd 含量与叶、糙米和精米的 Cd 含量、Cd 根-茎的转

运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。水稻叶片 Cd 含量与糙米和精米的 Cd 含量、Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。水稻糙米 Cd 含量与精米的 Cd 含量、Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。水稻精米 Cd 含量与 Cd 根-茎的转运系数、茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。水稻 Cd 根-茎的转运系数与茎-籽粒的转运系数呈极显著正相关 ($P<0.01$)。

综上所述, 水稻各部位 Cd 含量和转运系数之间呈极显著正相关, 根表铁膜中的 Fe 和 Cd 含量则与水稻各部位 Cd 含量和转运系数之间呈显著或极显著负相关, 根表铁膜中 Fe 含量和 Cd 含量二者呈极显著正相关, 根表铁膜对 Cd 的阻截作用显著。

表 3 水稻根表铁膜 Fe、Cd 含量和各部位 Cd 含量及转运系数间的相关性
Tab. 3 Correlation between Fe, Cd content in root iron plaque and Ca content in different parts and the transport coefficient of rice

项目 Item	根表铁膜 Fe 含量 Fe content in iron plaque	根表铁膜 Cd 含量 Cd content in iron plaque	根 Cd 含量 Root Cd content	茎 Cd 含量 Cd content in stem	叶 Cd 含量 Cd content in leaves	糙米 Cd 含量 Cd content in brown rice	精米 Cd 含量 Cd content in polished rice	根-茎 转运系数 Root-to-stem transport coefficient	茎-籽粒 转运系数 Stem-to-grain transport coefficient
根表铁膜 Fe 含量	1								
根表铁膜 Cd 含量	0.804**	1							
根 Cd 含量	-0.765**	-0.386	1						
茎 Cd 含量	-0.827**	-0.488*	0.977**	1					
叶 Cd 含量	-0.710**	-0.317	0.963**	0.954**	1				
糙米 Cd 含量	-0.821**	-0.550*	0.854**	0.926**	0.830**	1			
精米 Cd 含量	-0.869**	-0.690**	0.853**	0.905**	0.787**	0.930**	1		
根-茎转运系数	-0.887**	-0.619**	0.925**	0.978**	0.892**	0.960**	0.960**	1	
茎-籽粒转运系数	-0.883**	-0.606**	0.860**	0.895**	0.831**	0.835**	0.892**	0.923**	1

注：*表示显著相关（ $P<0.05$ ），**表示极显著相关（ $P<0.01$ ）。
Note: * indicates significant correlation ($P<0.05$), ** indicates extremely significant correlation ($P<0.01$).

2.7 不同处理对 Cd 健康风险指数的影响

通过计算可以发现，对于以大米为主食的成年人，在不同处理下 Cd 健康风险指数（HRI）在 0.219~0.369 之间（表 4）。不同水分管理模式下的 HRI 指数有所不同，与 IF 处理相比，CF 处理有利于降低 HRI 指数，其中以 CF+50ETH 处理最低。叶面喷施 ETH 也有效地降低了大米的 HRI 指数，但不同浓度的效果在不同水分管理模式下略有不同，IF 模式下喷施高浓度 ETH 对降低 HRI 指数效果要优于喷施低浓度 ETH，而在 CF 模式下则相反。

表 4 不同处理下成人每日金属摄入量（DIM）和 Cd 健康风险指数（HRI）
Tab. 4 Daily intake of metal (DIM) and health risk index (HRI) for Cd in adults under different treatments

处理 Treatment	每日摄入量 DIM	健康风险指数 HRI
CF	0.00033	0.33
CF+50ETH	0.00022	0.22
CF+100ETH	0.00027	0.27
IF	0.00037	0.37
IF+50ETH	0.00031	0.31
IF+100ETH	0.00028	0.28

3 讨论

基于采用单一技术往往不能将农作物可食部位中 Cd 的含量降低至安全水平之下这一前提，本研究选择水稻为研究对象，通过外源喷施 2 种

不同浓度的 ETH，结合不同的水分管理模式来实现“降镉”的目的。土壤中 Cd 的生物有效性不仅取决于总量，更受其在土壤中的赋存形态分布所制约。本研究发现，与间隔淹水相比，持续淹水降低了弱酸可溶态 Cd 并提高了可还原态 Cd 的占比，李剑睿等^[35]的研究也发现了同样的结果。也有研究发现，淹水会导致土壤中的镉向可氧化态转变^[36]。但在本研究中，淹水对土壤可氧化态镉的占比未产生影响。还原性物质在淹水条件下的溶解过程中，消耗了大量 H^+ ，使土壤固相表面带负电荷，提高了土壤 pH，从而增强了土壤固相对 Cd 的吸附，降低弱酸可溶态重金属含量^[37]。此外，在淹水条件下，硫化物被还原后与 Cd^{2+} 结合生成 CdS 也有可能增加可还原态 Cd 的占比^[38]。通常认为，弱酸可溶态 Cd 是土壤中有效性和移动性最强的 Cd 组分，常与有效 Cd 一起被作为评价土壤中 Cd 毒性的指标，可还原态 Cd 和可氧化态 Cd 则是相对稳定的形态，残渣态具有很强的稳定性^[39]。由此可见，淹水促使 Cd 赋存形态由弱酸可溶态转化为相对稳定的形态，从而降低了水稻对 Cd 的吸收。

水稻在生长发育过程中为长期适应淹水环境，其地上部及根系结构、生理特性等均发生特殊变化而形成大量的通气组织，通气组织向水稻根际释放氧气和氧化性物质，而此时根际中的有机质、 Mn^{2+} 、 Fe^{2+} 等还原性物质被氧化后附着在根表形成铁锰膜，它以吸附和共沉淀的方式影响着土壤中的许多元素的化学行为及生物有效性^[40]。铁

膜在抑制水稻吸收 Cd 的过程中发挥了无可替代的作用^[41-43], 这是因为水稻根表铁膜可以吸附、截控重金属^[27, 44]。本研究中, 与间隔淹水相比, 持续淹水和外源施加 ETH 后, 水稻根表铁膜中 Fe 和 Cd 含量均显著增加, 增幅最高分别达到 50.59% 和 58.06%, 根、茎、叶和籽粒 Cd 含量也随之显著下降。已有研究报道, 乙烯能够诱导水稻通气组织形成, 从而促进根表铁膜的形成^[45-46]。在淹水条件下添加乙烯合成抑制剂 AVG 后发现, 水稻经过 AVG 预处理后根表铁膜的含量大大减少^[40]; 相比于野生型水稻日本晴, 在 Cd 胁迫下乙烯信号突变体 *ein2* 根表铁膜中 Cd 的含量也显著降低^[47]。可见淹水和外源喷施 ETH 提升了铁膜在抑制水稻 Cd 吸收的过程中发挥的屏障作用, 减少了水稻对 Cd 的吸收和转运, 根表铁膜与水稻各部位 Cd 含量及转运系数呈显著负相关关系也证明了这一点。

研究表明, 调节水分管理模式以及外源喷施乙烯均可以降低植物对 Cd 的吸收和转运^[23, 35]。在本研究中, 与间隔淹水相比, 持续淹水和外源施加 ETH 显著降低了水稻各部位 (根、茎、叶、糙米、精米) 中的 Cd 含量, 其中 CF+50ETH 处理下精米中 Cd 含量最低 (0.45 mg/kg)。高敏等^[48]也发现, 与常规水分管理相比, 持续淹水处理下糙米 Cd 含量降低了 61.90%。这可能与淹水条件下土壤中的 Cd 向水稻难以吸收的形态转变以及根表铁膜对 Cd 的吸收增加有关。另一方面, 本研究中外源喷施 ETH 可以显著降低 Cd 向水稻茎和籽粒的转运系数。ETH 可以激活植物体内金属转运蛋白的表达, 进而影响到植物对金属元素的吸收和耐受^[49]。研究发现, Cd 主要以 Cd^{2+} 的形式进入水稻体内, 竞争阳离子通道^[50], 而吴忆泽^[47]的研究发现, ETH 可以调控水稻体内多种转运蛋白的表达, 包括 IRT1、IRT2、NAS2、DMAS、OPT7 等, 进而影响水稻对 Fe^{2+} 、 Zn^{2+} 等阳离子的吸收转运, 而 Cd^{2+} 也可以通过这些阳离子通道进入植物体内^[51], 这可能是 ETH 降低 Cd 向水稻茎和籽粒转运系数的原因。

HRI 作为单一重金属的健康风险指数, 常用于评价人体长期暴露于受重金属污染的潜在健康风险^[52]。本研究发现, 喷施 ETH 和 CF 水分管理模式均可以降低 Cd 暴露人群的健康风险, 其中 CF+50ETH 处理下健康风险指数最低, 仅为 0.219。

参考文献

- [1] RAFATI R M, RAFATI R M, KAZEMI S, MOGHADAMNIA A A. Cadmium toxicity and treatment: an update[J]. *Caspian Journal of Internal Medicine*, 2017, 8(3): 135-145.
- [2] 刘玲玉. 拟南芥 Cd 胁迫下乙烯诱导合成的分子机制和乙烯的作用机理初步研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2016.
LIU L Y. The molecular mechanism of Cd-induced ethylene production and the role of ethylene in response to Cd stress in *Arabidopsis*[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2016. (in Chinese)
- [3] 周江明. 中国耕地重金属污染现状及其人为污染源浅析[J]. *中国土壤与肥料*, 2020(2): 83-92.
ZHOU J M. The present status of heavy metal (loid) pollution in farmland soils and analysis of polluting sources in China[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2020(2): 83-92. (in Chinese)
- [4] FRISTAK V, PIPISKA M, LESNY J, SOJA G, FRIESL-HANL W, PACKOVA A. Utilization of biochar sorbents for Cd^{2+} , Zn^{2+} , and Cu^{2+} ions separation from aqueous solutions: comparative study[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187(1): 1-16.
- [5] XU X, QIAN J, XIE E, SHI X Z, ZHAO Y C. Spatio-temporal change and pollution risk of agricultural soil cadmium in a rapidly industrializing area in the yangtze delta region of China[J]. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2018, 15(12): 2743.
- [6] 姜海斌, 张克强, 沈仕洲, 马瑛骏, 渠清博, 邹洪涛. 洱海流域减氮施肥条件下水稻产量和土壤剖面氮磷变化特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(1): 23-32.
JIANG H B, ZHANG K Q, SHEN S Z, MA Y J, LIANG Q B, ZOU H T. Rice yield and nitrogen and phosphorus changes in soil profile under different fertilization strategies in Erhai Lake Basin, Yunnan[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(1): 23-32. (in Chinese)
- [7] 张妮, 张国忠. 水稻种植机械化技术研究现状与展望[J]. *湖北农业科学*, 2020, 59(17): 5-6.
ZHANG N, ZHANG G Z. Research status and prospect of rice planting mechanization[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2020, 59(17): 5-6. (in Chinese)
- [8] 崔冬霞, 刘应平. Cd 元素在土壤-水稻系统中的富集和分布[J]. *农业科学*, 2017, 7(4): 288-294.
CUI D X, LIU Y P. Enrichment and distribution of Cd elements in soil-rice plant system[J]. *Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 7(4): 288-294. (in Chinese)
- [9] 焦礼鹏. 大田水稻镉富集研究[D]. 北京: 清华大学, 2016.
JIAO L P. The research of cadmium accumulation in rice in

- the paddy[D]. Beijing: Tsinghua University, 2016. (in Chinese)
- [10] 张英英, 施志国, 李彦荣, 周彦芳, 常瑛. 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.
- ZHANG Y Y, SHI Z G, LI Y R, ZHOU Y F, CHANG Y. Effects of amendments on heavy metal uptake and transport in *Sorghum bicolor* L. under severe cadmium stress[J]. Southwest China Journal of Agriculture Sciences, 2021, 34(9): 1959-1968. (in Chinese)
- [11] 杨国栋, 张梦竹, 冯涛, 李明, 张惠灵, 邓雅茜, 闫晶. 土壤重金属污染修复技术研究现状及展望[J]. 现代化工, 2020, 40(12): 50-54, 58.
- YANG G D, ZHANG M Z, FENG T, LI M, ZHANG H L, DENG Y Q, YAN J. Research status and prospect of remediation technology for heavy metal polluted soil[J]. Modern Chemical Industry, 2020, 40(12): 50-54, 58. (in Chinese)
- [12] 闫晓强, 李汉杰, 周辉, 杨泽明, 张亚利, 陈晓光. 农田土壤重金属污染的危害及修复技术[J]. 南方农业, 2022, 16(2): 24-26.
- YAN X Q, LI H J, ZHOU H, YANG Z M, ZHANG Y L, CHEN X G. Hazards of heavy metal pollution in agricultural soil and remediation technology[J]. South China Agriculture, 2022, 16(2): 24-26. (in Chinese)
- [13] 杨小粉, 吴勇俊, 张玉盛, 汪泽钱, 敖和军. 水分管理对水稻镉吸收的影响[J]. 中国稻米, 2019, 25(4): 34-37.
- YANG X F, WU Y J, ZHANG Y S, WANG Z Q, AO H J. Effects of water management on the absorption of cadmium in rice[J]. China Rice, 2019, 25(4): 34-37. (in Chinese)
- [14] LI Y, ZHAO J, ZHANG B, LIU Y J, XU X H, LI Y F, LI B, GAO Y X, CHAI Z F. The influence of iron plaque on the absorption, translocation and transformation of mercury in rice (*Oryza sativa* L.) seedlings exposed to different mercury species[J]. Plant and Soil, 2016, 398(1/2): 87-97.
- [15] 邵晓伟, 雷俊, 许竹激, 汪寿根, 陈润兴, 石子建. 水分管理对不同水稻品种稻米镉含量的影响[J]. 农业科技通讯, 2021(8): 182-183, 186.
- SHAO X W, LEI J, XU Z W, WANG S G, CHEN R X, SHI Z J. Effect of water management on cadmium content in rice of different rice varieties[J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2021(8): 182-183, 186. (in Chinese)
- [16] 张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏. 典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响[J]. 环境科学, 2021, 42(5): 2512-2521.
- ZHANG Y T, TIAN Y B, HUANG D Y, ZHANG Q, XU C, ZHU H H, ZHU Q H. Effects of water management on cadmium accumulation by rice (*Oryza sativa* L.) growing in typical paddy soil[J]. Environmental Science, 2021, 42(5): 2512-2521. (in Chinese)
- [17] 龙婵, 王丹, 陈立, 江文静, 向明文. 4种植物激素对向日葵富集 U 和 Cd 的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3251-3257.
- LONG C, WANG D, CHEN L, JIANG W J, XIANG M W. Effect of four kinds of phytohormones on U and Cd accumulation in *Helianthus annuus*[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2017, 11(5): 3251-3257. (in Chinese)
- [18] BEN M M, KARMOUS I, EL F E, CHAOUI A. Alleviation of copper toxicity in germinating pea seeds by IAA, GA₃, Ca and citric acid[J]. Journal of Plant Interactions, 2018, 13(1): 21-29.
- [19] 尚宏芹, 高昌勇. 表油菜素内酯对镉胁迫下小麦幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(17): 57-61.
- SHANG H Q, GAO C Y. Effects of epibrassinolide on growth and physiological characteristics of wheat seedlings under Cd²⁺ stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2018, 46(17): 57-61. (in Chinese)
- [20] 方治国, 杨青, 谢俊婷, 都韶婷. 重金属污染土壤植物修复中细胞分裂素的作用与机制[J]. 生态学报, 2022, 42(8): 3056-3065.
- FANG Z G, YANG Q, XIE J T, DU S T. The role and mechanism of cytokinin in phytoremediation of heavy metal contaminated soil[J]. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(8): 3056-3065. (in Chinese)
- [21] ARTECA R N, ARTECA J M. Heavy-metal-induced ethylene production in *Arabidopsis thaliana*[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(11): 1480-1488.
- [22] 赵赫, 陈受宜, 张劲松. 乙烯信号转导与植物非生物胁迫反应调控研究进展[J]. 生物技术通报, 2016, 32(10): 1-10.
- ZHAO H, CHEN S Y, ZHANG J S. Ethylene signaling pathway in regulating plant response to abiotic stress[J]. Biotechnology Bulletin, 2016, 32(10): 1-10. (in Chinese)
- [23] 冯文静, 高巍, 刘红恩, 聂兆君, 秦世玉, 李畅, 睢福庆, 赵鹏. 植物生长调节剂促进小麦幼苗生长及降低镉吸收转运的研究[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(6): 1036-1044.
- FENG W J, GAO W, LIU H E, NIE Z J, QIN S Y, LI C, SUI F Q, ZHAO P. Effects of plant growth regulator on growth and cadmium uptake and accumulation in wheat seedlings[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(6): 1036-1044. (in Chinese)
- [24] 刘娟, 赵欢蕊, 刘永华, 王镜惠. 外源乙烯对镉处理下玉米幼苗生理代谢的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(5): 757-765.
- LIU J, ZHAO H R, LIU Y H, WANG J H. Effect of exogenous ethylene on physiological metabolism of Zea mays

- seedlings under cadmium stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(5): 757-765. (in Chinese)
- [25] 张燕, 江建锋, 黄奇娜, 邵国胜, 王宏航. 水分管理调控水稻镉污染的研究与应用进展[J]. 中国稻米, 2021, 27(3): 10-16.
- ZHANG Y, JIANG J F, HUANG Q N, SHAO G S, WANG H H. Advances in research and application of water management related to cadmium contamination in rice[J]. China Rice, 2021, 27(3): 10-16. (in Chinese)
- [26] 谢洋, 李艾凝, 丁忠杰, 郑绍建. 乙烯调控植物根毛发育的研究进展[J]. 植物生理学报, 2020, 56(12): 2517-2525.
- XIE Y, LI A N, DING Z J, ZHENG S J. Current researches on the roles of ethylene in the regulation of plant root hairs[J]. Plant Physiology Journal, 2020, 56(12): 2517-2525. (in Chinese)
- [27] XU B, YU J Y, XIE T, LI Y L, LIU M J, GUO J X, LI H L, YU Y, ZHENG C Y, CHEN Y H, WANG G. Brassinosteroids and iron plaque affect arsenic and cadmium uptake by rice seedlings grown in hydroponic solution[J]. Biologia Plantarum, 2020, 62(2): 362-368.
- [28] RAURET G, LOPEZ-SANCHEZ J F, SAHUQUILLO A, RUBIO R, DAVIDSON C, URE A, QUEVAUVILLER, P. Improvement of the BCR three step sequential extraction procedure prior to the certification of new sediment and soil reference materials[J]. Journal of Environmental Monitoring, 1999, 1(1): 57-61.
- [29] MAHMOOD A, MALIK R N. Human health risk assessment of heavy metals via consumption of contaminated vegetables collected from different irrigation sources in Lahore, Pakistan[J]. Arabian Journal of Chemistry, 2014, 7(1): 91-99.
- [30] YOUSAF B, AMINA, LIU G J, WANG R W, IMTIAZ M, RIZWAN M S, ZIA-UR-REHMAN M, QADIR A, SI Y B. The importance of evaluating metal exposure and predicting human health risks in urban-periurban environments influenced by emerging industry[J]. Chemosphere, 2016, 150: 79-89.
- [31] RIZWAN M, ALI S, HUSSAIN A, ALI Q, SHAKOOR M B, ZIA-UR-REHMAN M, FARID M, ASMA M. Effect of zinc-lysine on growth, yield and cadmium uptake in wheat (*Triticum aestivum* L.) and health risk assessment[J]. Chemosphere, 2017, 187: 35-42.
- [32] 吕梅霞. 维吾尔族超重肥胖人群膳食模式与炎症因子的相关性研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆医科大学, 2021.
- LYU M X. Correlation between dietary patterns and inflammatory factors in overweight and obese Uygur[D]. Urumqi: Xinjiang Medical University, 2021. (in Chinese)
- [33] 秦丽, 祖艳群, 湛方栋, 李元, 王吉秀, 唐艳芬, 李鹏程. 续断菊与玉米间作对作物吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(3): 471-477.
- QIN L, ZU Y Q, ZHAN F D, LI Y, WANG J X, TANG Y F, LI P C. Absorption and accumulation of Cd by *Sonchus asper* L. *Hill* and *Maize* in intercropping systems[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(3): 471-477. (in Chinese)
- [34] ZHANG X, WU S, REN B H, CHEN B D. Water management, rice varieties and mycorrhizal inoculation influence arsenic concentration and speciation in rice grains[J]. Mycorrhiza, 2016, 26(4): 299-309.
- [35] 李剑睿, 徐应明. 长期淹水、传统灌溉、湿润灌溉条件下海泡石修复镉污染水稻土效应[J]. 江苏农业科学, 2021, 49(17): 226-231.
- LI J R, XU J M. Effects of sepiolite repairing cadmium-contaminated paddy soil under long-term flooding traditional irrigation, and wetting irrigation[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2021, 49(17): 226-231. (in Chinese)
- [36] LI J R, XU Y M. Immobilization of Cd in a paddy soil using moisture management and amendment[J]. Chemosphere, 2015, 122: 131-136.
- [37] 汤家庆. 水分条件对生物炭钝化污染水稻土铅镉铜锌的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2021.
- TANG J Q. Effects of water regimes on lead, cadmium, copper and zinc immobilization by biochar in contaminated paddy soil[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2021. (in Chinese)
- [38] ZHOU Q W, LIN L N, QIU W W, SONG Z G, LIAO B H. Supplementation with ferromanganese oxide-impregnated biochar composite reduces cadmium uptake by indica rice (*Oryza sativa* L.)[J]. Journal of Cleaner Production, 2018, 184: 1052-1059.
- [39] 杨宾, 罗会龙, 刘士清, 韩聪, 宋秋浩, 曹云者. 淹水对土壤重金属浸出行为的影响及机制[J]. 环境工程学报, 2019, 13(4): 936-943.
- YANG B, LUO H L, LIU S Q, HAN C, SONG Q H, CAO Y Z. Effect and mechanism of water inundation on the leaching behavior of heavy metals in contaminated soils[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering, 2019, 13(4): 936-943. (in Chinese)
- [40] 郭月. 乙烯和赤霉素参与调节完全淹水诱导的水稻根表锰膜形成[D]. 南京: 南京农业大学, 2014.
- GUO Y. Involvement of ethylene and gibberellins in regulating the complete submergence-induced formation of manganese plaque on root surface in rice seedlings[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [41] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 沈宏. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1527-1534.

- FU Y Q, YU Z W, CAI K Z, SHEN H. Mechanisms of iron plaque formation on root surface of rice plants and their ecological and environmental effects: a review[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(6): 1527-1534. (in Chinese)
- [42] 龙小林, 向珣朝, 徐艳芳, 苏文丽, 康翠芳. 镉胁迫下籼稻和粳稻对镉的吸收、转移和分配研究[J]. 中国水稻科学, 2014, 28(2): 177-184.
- LONG X L, XIANG X C, XU Y F, SU W L, KANG C F. Absorption, transfer and distribution of Cd in indica and japonica rice under Cd stress[J]. Chinese Journal of Rice Science, 2014, 28(2): 177-184. (in Chinese)
- [43] 谷建诚, 郭彬, 林义成, 傅庆林, 刘琛, 丁能飞, 李华, 李凝玉. 根表铁膜对水稻镉吸收的影响[J]. 浙江农业学报, 2020, 32(6): 963-970.
- GU J C, GUO B, LIN Y C, FU Q L, LIU C, DING N F, LI H, LI N Y. Effects of iron plaque in root surface on cadmium uptake of rice[J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2020, 32(6): 963-970. (in Chinese)
- [44] FU Y Q, YANG X J, SHEN H. Root iron plaque alleviates cadmium toxicity to rice (*Oryza sativa*) seedlings[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2018, 161: 534-541.
- [45] GUO Y, ZHU C H, GAN L J, NG D, XIA K. Ethylene is involved in the complete-submergence induced increase in root iron and manganese plaques in *Oryza sativa*[J]. Plant Growth Regulation, 2015, 76(3): 259-268.
- [46] YAMAUCHI T, YOSHIOKA M, FUKAZAWA A, MORI H, NISHIZAWA N K, TSUTSUMI N, YOSHIOKA H, NAKAZONO M. An NADPH oxidase RBOH functions in rice roots during lysigenous aerenchyma formation under oxygen-deficient conditions[J]. Plant Cell, 2017, 29(4): 775-790.
- [47] 吴忆泽. 乙烯信号通路对水稻耐镉胁迫及镉吸收的影响[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2020.
- WU Y Z. Effects of ethylene signal on cadmium tolerance and absorption in rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2020. (in Chinese)
- [48] 高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静. 叶面喷施硅硒联合水分管理对水稻镉吸收转运特征的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2): 215-222.
- GAO M, ZHOU J, LIU H L, HU Y M, XU L, LIANG J N, HUANG G F, ZHOU J. Effect of silica and selenite foliar sprays on the uptake and transport of cadmium by rice under water management[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2018, 37(2): 215-222. (in Chinese)
- [49] IQBAL N, TRIVELLINI A, MASOOD A, FERRANTE A, KHAN N A. Current understanding on ethylene signaling in plants: the influence of nutrient availability[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013, 73: 128-138.
- [50] 张祎雯, 董畅茹, 刘小强, 张伟, 潘丹丹, 樊霆. 硒对水稻吸收转运镉、砷和汞影响机制的研究进展[J]. 生物学杂志, 2021, 38(5): 101-104, 109.
- ZHANG Y W, DONG C R, LIU X Q, ZHANG W, PAN D D, FAN T. Research on effects of selenium on the uptake and transfer of Cd, As and Hg in rice[J]. Journal of Biology, 2021, 38(5): 101-104, 109. (in Chinese)
- [51] LI H, LUO N, LI Y W, CAI Q Y, LI H Y, MO C H, WONG M H. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. Environmental Pollution, 2017, 224: 622-630.
- [52] SHARMA R K, AGRAWAL M, MARSHALL F. Heavy metal contamination of soil and vegetables in suburban areas of Varanasi, India[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2007, 66(2): 258-266.