

水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响

葛颖^{1,2}, 马进川², 邹平², 潘建清³, 陈丽芬⁴, 石其伟⁵, 马军伟^{2*}

(1.浙江农林大学 环境与资源学院, 杭州 311300; 2.浙江省农业科学院 环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021; 3.长兴县农业农村局, 浙江 长兴 313100; 4.丽水市莲都区农业农村局, 浙江 丽水 323000; 5.绍兴市柯桥区农业技术推广中心, 浙江 绍兴 312030)

摘要:【目的】研究镉轻度污染农田水稻适宜的水分管理模式。【方法】采用盆栽试验, 分别设置水稻全生育期湿润灌溉(CK)、全生育期淹水(T1)、拔节期(T2)、孕穗期(T3)、抽穗扬花期(T4)、灌浆乳熟期(T5)、蜡熟期(T6)开始淹水7个处理, 对水稻不同器官镉积累差异以及土壤氧化还原电位、根际土壤溶液水溶性镉质量分数变化进行研究。【结果】土壤氧化还原电位与水溶性Cd呈极显著正相关($p < 0.01$), 淹水后土壤的氧化还原电位(Eh)显著降低, 土壤还原性增强, 淹水时间越长氧化还原电位越低, 其中T1处理最低可降至-159.78 mV, 淹水后根际土壤溶液中水溶性Cd也迅速下降, T3处理下降最多, 为75.0%。不同水分管理模式下水稻糙米含镉量均未超过食品安全国家标准规定的限量值(GB2762—2017)。与CK相比, T1处理降低糙米含镉量达76.9%, 而水稻产量明显下降, 减产19.2%; T6处理明显抑制镉从水稻根系向地上部分转移, 增加根系镉质量占比15.2%; T6处理降低水稻茎秆的镉积累, 降低茎秆镉质量占比13.0%; 淹水通过抑制镉从水稻叶片向谷物的转移来降低水稻镉积累, 与CK相比, T5处理叶片镉质量占比增加5.0%, T3处理谷物镉质量占比降低4.3%。【结论】综合考虑水稻产量、糙米含镉量和田间农事操作习惯, 镉轻度污染稻田推荐的水分调控方式为抽穗扬花期淹水至收获前1周。

关键词: 水分管理; 水稻生育期; 镉; 氧化还原电位; 根际; 水溶性Cd

中图分类号: S511; X53

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.gggs.2020471

OSID:



葛颖, 马进川, 邹平, 等. 水分管理对镉轻度污染农田水稻镉积累的影响[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(3): 79-86.

GE Ying, MA Jinchuan, ZOU Ping, et al. Improving Water Management to Reduce Cd Accumulation in Rice in Lightly Cd-Polluted Paddy Soils[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(3): 79-86.

0 引言

【研究意义】镉(Cd)是农田污染物中一种具有生物高毒性的重金属。由于人类和植物对镉的承受限度存在一定的差异, 尚未表现出植物毒性的含镉量水平可能已经危及人类的健康, 如引起人体生理功能下降, 包括肾病甚至是癌症^[1-3]。水稻是我国主要的粮食作物, 超过60%的人以水稻为主食, 其消费量约占总谷物消费量的55%^[4]。农业农村部调查显示, 我国稻米镉超标率高达10%, 严重威胁我国的粮食安全。据2014年全国土壤污染调查公报数据显示^[5], 我国耕地土壤污染点位超标率高达19.4%, 镉的污染点位

超标率为7.0%, 且污染日趋严重, 极大地威胁着我国农业生产的可持续发展和粮食安全。综合考虑我国稻田镉污染面积、修复成本和农民接受度等因素, 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镉量是实现重金属镉中轻度污染耕地安全利用的当务之急。

【研究进展】水分管理作为一种成本较低、操作简单、无二次污染的农艺调控措施, 在降低稻米含镉量方面具有良好的效果。目前, 关于水分管理降镉技术的研究集中在淹水对稻米镉累积的影响。孕穗期至抽穗扬花期是稻米籽粒镉积累的关键时期^[6-7], 然而另有研究表明水稻吸收镉的关键时期是从灌浆期到成熟期^[8-9]。有研究发现与湿润灌溉以及旱作相比, 稻田长期淹水会增加水稻产量^[10], 然而杨定清等^[7]发现长期淹水处理的产量明显低于关键期淹水和常规处理。鉴于水稻生育期水分管理以及淹水时长对稻米含镉量及产量的影响仍未确定, 因此明确降低稻米

收稿日期: 2020-09-20

基金项目: 浙江省重点研发项目(2018C03047, 2015C03020); 浙江省自然科学基金项目(LY17D010010); 湖州市公益性应用研究项目(2017GY16)

作者简介: 葛颖(1995-), 女, 浙江绍兴人。硕士研究生, 主要从事农田重金属污染安全利用研究。E-mail: 635456225@qq.com

通信作者: 马军伟(1972-), 男, 研究员, 主要从事施肥与环境效应研究。E-mail: majuwe111@163.com

中镉积累的关键作用期是降低稻米含镉量和稳定产量的关键。另外,目前关于水分管理降低稻米镉积累作用途径的研究主要集中于淹水对土壤理化性质的改变及对土壤生物有效性镉的影响。田桃等^[9]通过研究土壤氧化还原电位对水稻糙米含镉量的影响发现较低 Eh 可以减少水稻 Cd 的积累;张雪霞等^[11]研究表明不同田间持水率通过影响土壤 S 、 Fe^{2+} 从而影响 Cd 活性。

以上研究对揭示稻田淹水降低稻米镉积累有一定的参考价值,但仍具有一定的局限性,不能直接表征镉从土壤往水稻根系的迁移。考虑到水稻根系主要从土壤溶液中吸收养分及重金属镉,土壤溶液的理化性质能直观反映水稻植株对镉的吸收情况^[12]。Wan 等^[13]发现江西 (pH 值=5.25) 的土壤溶液中 Cd 在有氧条件下的生物有效性高于淹水条件,与湖南 (pH 值=7.26) 不同,说明 Cd 的生物有效性受土壤 pH 值和氧化还原电位共同影响;Honma 等^[14]研究发现土壤溶液水溶性 Cd 在排水后显著增加,后期再进行淹水灌溉后迅速降低。【切入点】因此明确水稻生育期水分调控下土壤氧化还原电位及根际土壤溶液水溶性 Cd 的变化对充分理解淹水对水稻镉吸收的影响至关重要。目前关于水分调控对根际土壤理化性质的影响以及如何影响水稻植株对镉的分配等方面研究较少,有待深入研究。

【拟解决的关键问题】本研究拟通过室内盆栽试验研究不同生育期水分管理对稻米镉累积及水稻产量的影响,以明确不同水分管理模式下水稻含镉量与其产量的相关性,揭示水稻生育期水分管理降镉的最佳调控时期;通过研究不同水分管理模式下水稻氧化还原电位 Eh 和水溶性 Cd 质量分数的变化以及不同生育期水分管理对水稻各部位镉的分配影响,初步揭示不同生育期水分管理降低稻米镉积累的机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验于 2019 年在浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所网室进行,供试水稻土采自浙江省东部典型镉污染稻田,土壤类型根据中国土壤发生分类属青紫泥田土种,按中国土壤系统分类属底潜铁渗水耕人为土^[15]。供试土壤基本理化性质如下: pH 值为 5.52,有机质量为 36.80 g/kg,阳离子交换量为 14.28 cmol/kg,全氮量为 0.21%,速效磷为 9.83 mg/kg,速效钾为 106.50 mg/kg,有效态镉 (DTPA 提取态镉) 质量分数为 0.37 mg/kg,全量镉质量分数为 0.54 mg/kg。供试土壤容重为 1.13 g/cm³,土壤镉质量分数在《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标

准 (试行)》(GB15618—2018) 所规定的风险筛选值 2 倍以内^[5,16],属镉轻度污染稻田。盆栽采用封底的直径为 20 cm 圆柱形 PVC 桶,桶高 30 cm。将采回的土壤自然风干后过 2 mm 筛,在桶底铺设 2 cm 石英,按土壤实际容重称取等量土壤,每 2.5 cm 用橡皮锤锤实后刮毛,分 9 层填土,共计 9 kg 土壤,填土高度为 22.5 cm,填土期间在每盆土壤内拌入等量的肥料 (N 、 P_2O_5 、 K_2O 质量比为 15:6:8, P 、 K 全作为基肥,60% N 作为基肥,40% N 作为追肥,在水稻孕穗期施用),施肥深度为 20 cm。填土结束后对盆栽持续加水保持土壤表面 3 cm 水层,静置 72 h 后,水面无明显下降,视为土壤水分平衡状态。供试水稻品种为浙江省近年来主推单季杂交稻甬优 538,系《浙江省中轻度污染耕地水稻安全利用技术指南 (试行)》(浙耕肥发〔2020〕15 号)^[17]推荐的镉低积累水稻品种,每盆均选用长势相似的 4 株水稻秧苗,在分蘖初期 (三分蘖) 移栽。

1.2 试验设计

试验共设 7 个处理,每个处理 4 次重复,共 28 盆。具体方案设计如下:CK (长期湿润灌溉至收获前 1 周)、T1 (长期淹水至收获前 1 周)、T2 (前期湿润灌溉,拔节期 (移栽后 27 d) 起淹水至收获前 1 周)、T3 (前期湿润灌溉,孕穗期 (移栽后 46 d) 起淹水至收获前 1 周)、T4 (前期湿润灌溉,抽穗扬花期 (移栽后 59 d) 起淹水至收获前 1 周)、T5 (前期湿润灌溉,灌浆乳熟期 (移栽后 63 d) 起淹水至收获前 1 周) 和 T6 (前期湿润灌溉,蜡熟期 (移栽后 73 d) 起淹水至收获前 1 周)。各个生育期生长特性主要如下:水稻品种大致为 7 节间,水稻拔节期开始于 n (伸长节间数)-2=5 的倒数叶龄期;孕穗期水稻茎部顶端出现膨胀,且长出顶叶;抽穗扬花期主要特征为水稻稻穗破口,开始扬花;灌浆乳熟期水稻籽粒中有淀粉沉积呈乳白色,谷壳为绿色;蜡熟期水稻籽粒无乳状物,手压籽粒有坚硬感,谷壳开始变黄。

在盆中设置水位控制线 (距土表上 3 cm),淹水处理为保持土壤表面 3 cm 可见水层。湿润灌溉处理设置为自然落干,保持土壤湿润且无明显水层 (按照田间农民习惯进行灌溉),分蘖末期进行 1 周晒田处理。其他时期均按照试验设计进行灌溉,各处理均在收获期前 1 周停止灌溉,其余农艺措施与农民习惯保持一致。灌溉水使用检出无镉污染, pH 值为 6.78 的自来水。

在盆栽土柱距表土下 7.50 cm 处水平放置有膜孔径约为 0.12~0.18 μm 根际土壤溶液采集管,采集管上附带保护套,待盆栽晒田结束,土壤环境稳定后 (移栽后 29 d) 每隔 10 d 用针筒抽取水样带回实验室测

定。采集方法如下：采集时取下保护套，通过塑料接头连接塑料注射器抽取空气，利用小木棍顶住塑料注射器活塞芯杆，保持注射器内一定负压，使土壤孔隙中的水进入注射器，静置过夜采集水样。在盆栽土柱距土表 10 cm 处同一水平面不同位置插有 2 根传感器，分别是温度传感器和 CD-1 型铂复合电极（南京传滴仪器设备有限公司产品），每隔 5 min 采集 1 次盆栽氧化还原电位值和内部温度数据，用数据采集器自动存储数据，传感器设置在包括 7 个处理在内的 7 盆盆栽内，具体盆栽装置见图 1。

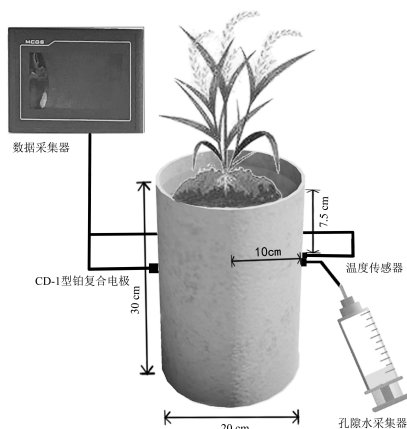


图 1 盆栽装置示意

Fig.1 Schematic diagram of soil pore water sampler

1.3 样品采集与处理

土壤基本理化性质测定方法如下：pH 值采用玻璃电极法（土水比为 1:2.5）测定，全氮采用凯氏定氮法测定，有机质采用重铬酸钾外加加热法测定，速效磷采用氟化铵浸提法测定，速效钾采用乙酸铵浸提法测定，阳离子交换量采用乙酸铵法测定。DTPA 提取态镉采用 DTPA（二乙三铵五乙酸）浸提法，全量镉采用微波消解，石墨炉原子吸收测定。

对取回实验室的水样过孔径 0.45 μm 滤膜后直接

用原子吸收光谱仪石墨炉法测定水溶性 Cd。收获后将水稻各部位（根、茎秆、叶片和谷物）分别装到尼龙网袋内，置于烘箱内 70 °C 烘干过夜后对水稻不同部位单独称质量。测产结束后，对收集的水稻各部位（根、茎秆和叶片）分别进行粉碎，谷物采用砵谷机进行脱粒，保留谷壳并粉碎。植株样品采用 HNO₃-H₂O₂ 微波消解，待测液中含 Cd 量用原子吸收光谱仪石墨炉法测定。

1.4 数据处理与分析

水稻各部位（根、茎秆、叶片和谷物）镉的质量计算式为：

$$m_{Cdi} = C_i \times m_i, \quad (1)$$

式中： m_{Cdi} 为水稻某一部位的镉质量 (mg/pot)； C_i 为水稻该部位的镉浓度 (mg/kg)； m_i 为水稻该部位的质量 (kg/pot)。

氧化还原电位最终结果根据测量温度值手动查表加上参比电位后计算获得，氧化还原电位通过求平均值归一到每 2 天 1 个数值。试验数据使用 Microsoft Excel 2010 处理，用 SPSS 21.0 进行独立样本 T 检验和单因素方差分析，采用 Sigmaplot 14.0 作图。

2 结果与分析

2.1 土壤氧化还原电位的分析

本试验供试水稻土青紫泥田为还原性土壤， Eh 总体偏低。由图 2 可见，初始 Eh 较低，这是由于移栽初期对水稻作淹水处理可以增加水稻有效分蘖，土壤还原性增强，该时期 CK（长期湿润灌溉）的 Eh 处于整个生育期最低值，为 59.57 mV；在拔节期前 1 周（移栽后 20 d），除 T1 处理（长期淹水）外其余处理的 Eh 均迅速增加且处于较高的值，这是因为在水稻分蘖后期为控制无效分蘖对除 T1 处理外的其余处理均进行晒田处理，土壤氧化性增强。

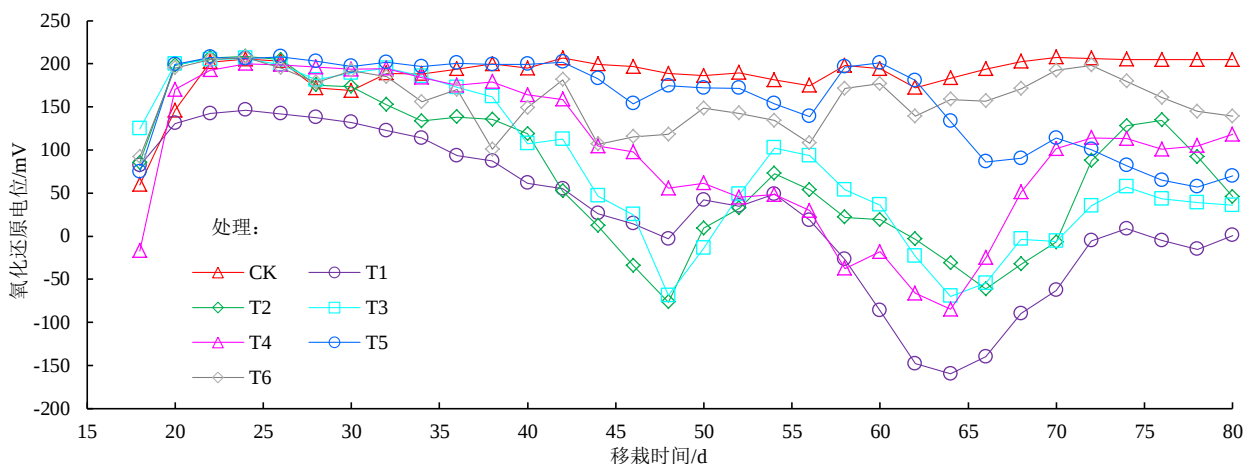


图 2 不同生育期水分管理土壤氧化还原电位

Fig.2 Effects of water management at different growth stages on soil redox potential

总体上看,淹水处理的 Eh 明显低于湿润灌溉处理。拔节期(移栽后 27 d)开始后,CK 的 Eh 均相对较高,平均值为 192.88 mV,最高至 207.60 mV,而 T1 处理 Eh 则相对较低,平均值为 9.37 mV,最低至 -159.78 mV, T2 处理的 Eh 平均值为 57.09 mV,最低至 -76.47 mV; 各处理的 Eh 均在对应时期开始淹水后迅速下降, T3 处理在孕穗期(移栽后 46 d)前 Eh 平均值为 150.20 mV,开始淹水后 Eh 平均值为 18.28 mV,最低至 -69.92 mV, T4 处理在抽穗扬花期(移栽后 59 d)前 Eh 平均值为 115.60 mV,开始淹水后 Eh 平均值为 46.26 mV,最低至 -84.90 mV, T5 处理在灌浆乳熟期(移栽后 63 d)前 Eh 平均值为 184.69 mV,开始淹水后 Eh 平均值为 88.61 mV,最低至 57.09 mV; T6 处理在蜡熟期(移栽后 73 d)前 Eh 平均值为 154.38 mV,开始淹水后 Eh 迅速降低,最低至 139.22 mV。

2.2 根际土壤溶液中水溶性 Cd 质量分数的分析

土壤溶液中水溶性 Cd 质量分数是评估土壤中 Cd

生物有效性的有效指标。由图 3 可见, T1 和 T2 处理的平均水溶性 Cd 质量分数分别为 0.04 和 0.02 $\mu\text{g/L}$, CK 的平均水溶性 Cd 质量分数为 0.29 $\mu\text{g/L}$, T1、T2 处理的水溶性 Cd 质量分数明显低于 CK,淹水处理的水溶性 Cd 明显低于湿润灌溉处理。不同淹水处理的水溶性 Cd 质量分数均在对应时期进行淹水后下降。其中, T3 处理在孕穗期(移栽后 46 d)开始淹水前平均水溶性 Cd 质量分数为 0.12 $\mu\text{g/L}$,淹水后平均水溶性 Cd 质量分数为 0.03 $\mu\text{g/L}$,下降 75.0%; T4 处理在抽穗扬花期(移栽后 59 d)开始淹水前平均水溶性 Cd 质量分数为 0.09 $\mu\text{g/L}$,淹水后平均水溶性 Cd 质量分数为 0.04 $\mu\text{g/L}$,下降 55.5%; T5 处理在灌浆乳熟期(移栽后 63 d)开始淹水前平均水溶性 Cd 质量分数为 0.15 $\mu\text{g/L}$,淹水后平均水溶性 Cd 质量分数为 0.05 $\mu\text{g/L}$,下降 66.7%; T6 处理在蜡熟期(移栽后 73 d)开始淹水前平均水溶性 Cd 质量分数为 0.09 $\mu\text{g/L}$,淹水后平均水溶性 Cd 质量分数为 0.05 $\mu\text{g/L}$,下降 44.4%。

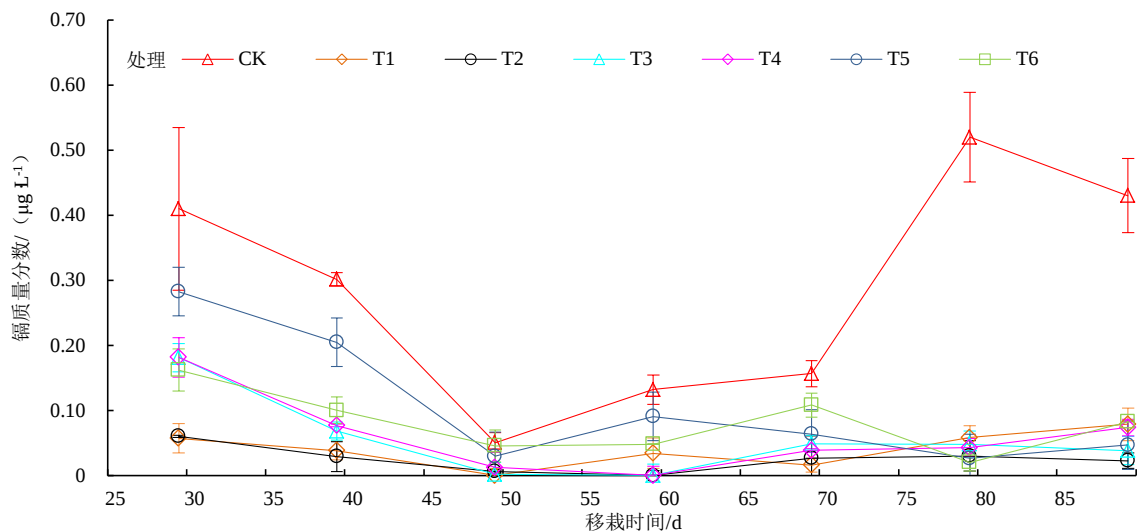
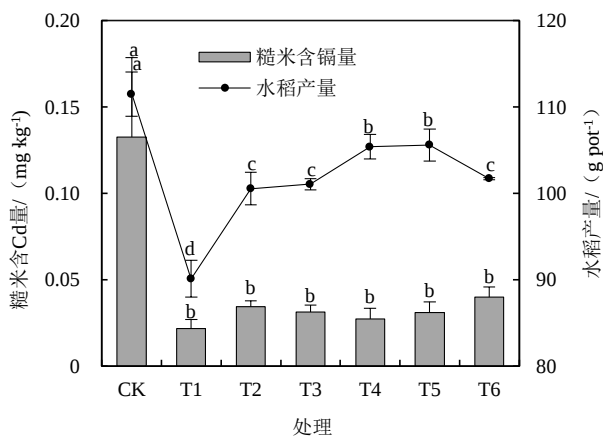


图 3 土壤水溶性 Cd 质量分数变化

Fig.3 The change of the concentration of water-soluble Cd



注 不同小写字母表示不同处理差异显著 ($p < 0.05$)。下同。

图 4 水稻糙米含镉量及水稻产量分布

Fig.4 Cadmium concentration and yield of brown rice

2.3 稻米含镉量及水稻产量的分析

不同水管理模式下水稻糙米含 Cd 量及水稻产量如图 4 所示。不同水管理模式下水稻糙米含 Cd 量均未超过食品安全国家标准规定的限量值 0.2 mg/kg ^[18], 这可能与供试水稻土为轻度污染土壤、供试水稻品种为稻米镉低积累品种有关。其中,与 CK 相比,淹水处理最高降低稻米含 Cd 量 76.9%, CK 糙米含镉量显著高于其他处理,而其余处理之间差异不显著。

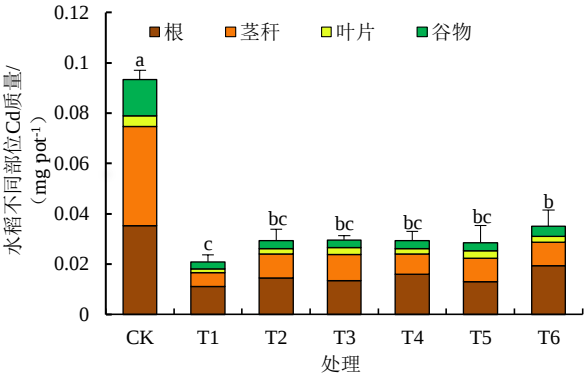
各处理水稻产量从高到低的顺序为:CK 处理>T5 处理>T4 处理>T6 处理>T3 处理>T2 处理>T1 处理,变化范围在 90.1~111.5 g/pot, CK 处理水稻产量显著高于其他处理,淹水时间越长水稻产量越低,最高减产 19.2%。其中, T4、T5 处理的水稻产量显著高于

T1、T2、T3 和 T6 处理。由此推断 T4 处理和 T5 处理可能是适合浙东地区镉轻度污染青紫泥田的最佳水分管理方式，但抽穗扬花期持续时间短，与灌浆乳熟期的时间接近甚至重合，为了便于农民实际生产中准确判断水稻生育期，维持较高水稻产量，并同时保证水稻糙米镉低积累，实现镉轻度污染稻田安全生产的推荐田间水分管理方式为从抽穗扬花期开始淹水至收获前 1 周。

2.4 水稻各部位镉分配的分析

由表 1 可见，不同水稻器官含镉量表现为：根>茎秆>叶片>谷壳>糙米。与 CK 相比，不同时期淹水处理水稻糙米、谷壳、根、茎秆和叶片等各部位的含镉量均有显著降低，但不同生育期淹水处理(T1—T6)之间水稻各部位含镉量却并没有显著差异。由图 5 可见，淹水处理的水稻镉质量明显低于 CK，在本试验水稻稻米的含镉量不超标的情况下，通过进一步分析水稻各个器官 Cd 质量分配，发现不同生育期淹水处理对水稻不同器官 Cd 积累有显著影响。不同水稻器官累积镉的质量表现为：根>茎秆>谷物>叶片。与 CK 相比，T1—T6 处理的根系镉质量占比分别高出 13.4%、10.7%、6.8%、14.9%、6.2%和 15.2%，这可能是因为淹水处理的水溶性 Cd 明显低于 CK；CK 中茎秆的镉质量占比高达 42.1%，T1—T6 处理茎秆镉质量占比较 CK 分别低 12.9%、8.0%、5.7%、11.9%、8.5%和 13.0%，由此可见，淹水明显抑制镉从水稻根系向地上部分转移并且可以降低水稻茎秆中镉的积累。不同处理水稻叶片镉质量占比变化范围为 3.7%~8.7%，不同处理谷物镉质量占比变化范围为 8.6%~12.9%。与

CK 相比，T5 处理叶片镉质量占比增加 5.0%，T3 处理谷物镉质量占比降低 4.3%，这说明淹水可以抑制镉从水稻叶片向谷物转移。



注 不同小写字母表示不同处理差异显著 ($p<0.05$)。

图 5 水稻不同部位 Cd 质量分布

Fig.5 Distribution of cadmium mass in rice organs

与 CK 相比，T6 处理水稻茎叶的镉质量占比下降 11.0%，这说明在成熟期淹水减少水稻茎叶镉积累。与 T6 处理相比，T5 处理根系镉质量占比下降 9.0%，这意味着灌浆乳熟期淹水可以降低根系镉吸收。总体上看，T2、T3、T4 和 T5 处理水稻累积总镉质量没有明显差异，这表明从水稻拔节期到灌浆乳熟期，淹水时间长短对水稻植株镉积累没有明显差异，但 T4 处理水稻根系镉质量占比为 46.5%，高于 T2、T3 和 T5 处理，表明抽穗扬花期开始持续淹水可以抑制镉从水稻地下部分向水稻地上部分转移；与 T2 处理相比，T1 处理水稻植株累积镉质量下降 27.9%，这说明分蘖期保持淹水可以降低水稻镉积累。

表 1 不同水分管理模式下水稻不同器官的含 Cd 量

Table 1 Cd concentration in different organs of rice under different water management modes					mg/kg
处理	糙米	谷壳	根	茎秆	叶片
CK	0.13±0.023 a	0.19±0.025 a	1.43±0.046 a	0.83±0.079 a	0.14±0.015 a
T1	0.03±0.001 b	0.02±0.004 b	0.57±0.156 b	0.12±0.001 b	0.05±0.004 c
T2	0.03±0.002 b	0.05±0.011 b	0.78±0.053 b	0.22±0.008 b	0.08±0.005 bc
T3	0.03±0.005 b	0.04±0.006 b	0.63±0.037 b	0.23±0.014 b	0.09±0.005 b
T4	0.03±0.003 b	0.04±0.017 b	0.71±0.025 b	0.19±0.015 b	0.07±0.005 bc
T5	0.03±0.003 b	0.03±0.005 b	0.63±0.068 b	0.21±0.021 b	0.10±0.009 b
T6	0.04±0.003 b	0.04±0.010 b	0.88±0.186 ab	0.21±0.020 b	0.08±0.008 bc

注 不同小写字母表示同一列不同处理间差异显著 ($p<0.05$)，下同。

3 讨论

3.1 氧化还原电位 Eh 与土壤溶液水溶性 Cd 的关系

本研究中，淹水后土壤的氧化还原电位显著降低，淹水时间越长的处理氧化还原电位越低，土壤还原性越强，这与 Wang 等^[19]研究结果保持一致，这可能是因为土壤水分饱和或有水层时，铁锰氧化物等在还原

过程中消耗大量电子，土壤的 Eh 显著下降^[20-21]。本研究中淹水处理能够明显减少根际土壤溶液中水溶性 Cd，这可能是由于土壤在淹水条件下处于较强的还原状态， SO_4^{2-} 被还原为 S^{2-} ^[22]， Cd^{2+} 与 S^{2-} 形成 CdS 沉淀，或者是淹水后的稀释效果。其中 CK 的水溶性 Cd 在孕穗期后大幅下降，这可能与该时期 CK 氧化还原电位下降有关，经过相关分析得到 Pearson 相关系

数为 0.560 ($p < 0.01$), 二者极显著正相关, 这与人研究结论一致^[23-24]。研究还发现整个生育期中同一处理土壤溶液水溶性 Cd 变化较大, Honma 等^[14]研究同样发现, 在水稻中期排水后, 溶解性 Cd 浓度显著增加, 再灌溉后迅速降低, 因此水溶性 Cd 的变化直接受土壤淹水情况的影响。

3.2 水分管理与水稻镉积累和水稻产量的关系

本研究中, 不同生育期淹水对水稻不同器官镉积累的影响不同。成熟期淹水主要降低水稻茎叶向稻米中转运 Cd, 这与史磊等^[8]研究结果一致。在水稻总镉质量相近的情况下, T4 处理水稻根系镉质量占比低于其他处理, 抑制镉从水稻地下部分向地上部分转移, 这与陈光辉等^[25]研究发现抽穗扬花期土壤脱水的糙米含镉量最高, 与其他时期脱水处理相比对稻米含镉量影响最大的结果一致。T2 处理水稻植株积累镉质量高于 T1 处理, 分蘖期淹水可以降低水稻镉积累, 这与刘昭兵等^[10]研究发现水稻在分蘖期晒田比长期淹水积累更多 Cd 的结论相似。

淹水时间较长的处理水稻产量较低, 其中 T1 处理的水稻产量最低, 这可能是因为全生育期淹水处理土壤的透气性差造成水稻根系发育较差^[26], 水稻养分吸收率、水分利用效率低以及水稻无效分蘖偏多^[27], 而间歇灌溉可以减少水稻无效分蘖, 增加有效穗数^[28]。T6 处理水稻产量显著低于 T4 和 T5 处理, 这可能是因为 T6 处理在水稻抽穗扬花期和灌浆乳熟期湿润灌溉, 造成水稻相对缺水, 影响水稻籽粒灌浆, 造成水稻结实率和千粒重降低, 这与已有研究发现抽穗扬花期水分胁迫产量下降最严重^[25, 29]结论一致。虽然现在有部分研究持相反观点, 刘昭兵等^[10]、高敏等^[30]认为与湿润灌溉以及旱作处理相比, 稻田长期淹水会增加水稻产量。但总而言之, 适当的透气和淹水更有利于水稻产量的形成^[31], 长期淹水导致水稻无效分蘖, 有效穗减少和产量下降是较为普遍的现象^[32]。

4 结 论

1) 水稻土氧化还原电位与根际土壤溶液中水溶性 Cd 质量分数呈极显著正相关。土壤淹水后氧化还原电位迅速下降, 还原性增强。淹水后根际土壤溶液中水溶性 Cd 质量分数也迅速下降, T3 处理淹水后最多下降 75.0%。

2) 淹水抑制镉从水稻根系向地上部分转移, 降低水稻茎秆的镉积累, 抑制镉从水稻叶片向谷物部分的转移来降低稻米镉积累。

3) 淹水处理显著降低糙米含镉量, 与 CK 相比, T1 处理降低稻米含镉量 76.9%, 但长时间淹水造成水稻产量下降, 最高减产 19.2%。综合考虑以上因素以

及稻田管理实际, 从抽穗扬花期开始淹水至收获前一周淹水有助于实现水稻降镉稳产的双赢。

参考文献:

- [1] 李春芳, 曹见飞, 吕建树, 等. 不同土地利用类型土壤重金属生态风险与人体健康风险[J]. 环境科学, 2018, 39(12): 5 628-5 638.
LI Chunfang, CAO Jianfei, LYU Jianshu, et al. Ecological risk assessment of soil heavy metals for different types of land use and evaluation of human health[J]. Environmental Science, 2018, 39(12): 5 628-5 638.
- [2] 任真, 赵金凤, 张瑶, 等. 钙离子在镉诱导的肾毒性中的作用机理[J]. 生物技术进展, 2019, 9(5): 476-482.
REN Zhen, ZHAO Jingfeng, ZHANG Yao, et al. Mechanism of Ca^{2+} in cadmium induced nephrotoxicity[J]. Current Biotechnology, 2019, 9(5): 476-482.
- [3] UETANI M, KOBAYASHI E, SUWAZONO Y, et al. Tissue cadmium (Cd) concentrations of people living in a Cd polluted area, Japan[J]. Biometals, 2006, 19(5): 521-525.
- [4] YE Xinxin, MA Yibing, SUN Bo. Influence of soil type and genotype on Cd bioavailability and uptake by rice and implications for food safety[J]. Journal of Environmental Sciences, 2012, 24(9): 1 647-1 654.
- [5] 环境保护部, 国土资源部. 全国土壤污染状况调查公报[J]. 中国环保产业, 2014(5): 10-11.
- [6] 张丽娜, 宗良纲, 付世景, 等. 水分管理方式对水稻在 Cd 污染土壤上生长及其吸收 Cd 的影响[J]. 安全与环境学报, 2006, 6(5): 49-53.
ZHANG Lina, ZONG Linggang, FU Shijing, et al. Effects of water control on rice growth and its intake of cadmium on Cd contaminated soil[J]. Journal of Safety and Environment, 2006, 6(5): 49-53.
- [7] 杨定清, 雷绍荣, 李霞, 等. 大田水分管理对控制稻米镉含量的技术研究[J]. 中国农学通报, 2016, 32(18): 11-16.
YANG Dingqing, LEI Shaorong, LI Xia, et al. Controlling cadmium concentration in rice by field water management technology[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2016, 32(18): 11-16.
- [8] 史磊, 郭朝晖, 梁芳, 等. 水分管理和施用石灰对水稻镉吸收与运移的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(24): 111-117.
SHI Lei, GUO Zhaohui, LIANG Fang, et al. Effects of lime and water management on uptake and translocation of cadmium in rice[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(24): 111-117.
- [9] 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.
- [10] 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, 6(5): 908-914.
LIU Zhaobing, JI Xionghui, 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, 6(5): 908-914.
- [11] 张雪霞, 张晓霞, 郑煜基, 等. 水分管理对硫铁镉在水稻根区变化规律及其在水稻中积累的影响[J]. 环境科学, 2013, 34(7): 2 837-2 846.
- ZHANG Xuexia, ZHANG Xiaoxia, ZHENG Yuji, et al. Accumulation of S, Fe and Cd in rhizosphere of rice and their uptake in rice with different water managements[J]. Environmental Science, 2013, 34(7): 2 837-2 846.
- [12] PORTER Spencer K, SCHECKEL Kirk G, IMPELLITTERI Christopher A, et al. Toxic Metals in the Environment: Thermodynamic Considerations for Possible Immobilization Strategies for Pb, Cd, As, and Hg[J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 2004, 34(6): 495-604.
- [13] WAN Y, CAMARA AY, YU Y, et al. Cadmium dynamics in soil pore water and uptake by rice: Influences of soil-applied selenite with different water managements[J]. Environmental Pollution, 2018(240): 523-533.
- [14] HONMA T, OHBA H, KANEKO Kadokura A, et al. Optimal soil Eh, pH, and water management for simultaneously minimizing arsenic and cadmium concentrations in rice grains[J]. Environmental Science and Technology, 2016, 50(8): 4 178-4 185.
- [15] 龚子同, 张甘霖, 陈志诚, 等. 土壤发生与系统分类[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- GONG Zitong, ZHANG Ganlin, CHEN Zhicheng, et al. Pedogenesis and Soil Taxonomy[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [16] 生态环境部. 土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准 (试行) GB 15618—2018[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- Ministry of Ecological Environment. Soil environmental quality risk control standard for contamination of agricultural land (Trial) GB 15618—2018[S]. Beijing: China Standards Press, 2018.
- [17] 浙江省农业农村厅. 浙江省中轻度污染耕地水稻安全利用技术指南 (试行)(浙耕肥发(2020)15号)[EB/OL]. (2020-07-16) [2020-07-28]. http://www.xiaoshan.gov.cn/art/2020/7/16/art_1229133851_51150837.html
- [18] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会. 食品安全国家标准 食品中污染物限量 (GB 2762—2017)[S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- National Health and Family Planning Commission of PRC. National Food Safety Standard Limits of Contaminants in Food(GB 2762—2017)[S]. Beijing: China Standards Press, 2017.
- [19] WANG Jinjin, LI Dongqin, LU Qin, et al. Effect of water-driven changes in rice rhizosphere on Cd lability in three soils with different pH[J]. Journal of Environmental Sciences, 2019, 87: 82-92.
- [20] 丁昌璞, 徐仁扣. 土壤的氧化还原过程及其研究法[M]. 北京: 科学出版社, 2011.
- DING Changpu, XU Renkou. Oxidation-reduction processes of soils and their research methods[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [21] 甄博, 郭相平, 陆红飞, 等. 旱涝交替胁迫对拔节期水稻生长和土壤氧化还原电位的影响[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(10): 42-47.
- ZHEN Bo, GUO Xiangping, LU Hongfei, et al. Response of rice growth and soil redox potential to alternate drought and waterlogging stresses at the jointing stage[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(10): 42-47.
- [22] 于天仁. 水稻土的物理化学[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 121-122.
- YU Tianren. Physical chemistry of paddy soils[M]. Beijing: Science Press, 1983: 121-122.
- [23] 关天霞, 何红波, 张旭东, 等. 土壤中重金属元素形态分析及形态分布的影响因素[J]. 土壤通报, 2011, 42(2): 503-512.
- GUAN Tianxia, HE Hongbo, ZHANG Xudong, et al. The methodology of fractionation analysis and the factors affecting the species of heavy metals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2011, 42(2): 503-512.
- [24] 郭京霞, 冯莲莲, 张起佳, 等. 不同钙质钝化剂对稻田土壤水溶态镉动态变化的影响[C]//中国土壤学会土壤环境专业委员会第十九次会议暨“农田土壤污染与修复研讨会”第二届山东省土壤污染防治与修复技术研讨会摘要集. 2017.
- GUO Jingxia, FENG Lianlian, ZHANG Qijia, et al. Effects of different cadmium passivators on the dynamic changes of water-soluble cadmium in paddy soil[C]// The 19th Meeting of the Soil Environment Professional Committee of the Chinese Soil Society and “Seminar on Soil Pollution and Remediation of Farmland”. 2017.
- [25] 陈光辉, 周森林, 易亚科, 等. 不同生育期脱水对稻米镉含量的影响[J]. 中国农学通报, 2018, 34(3): 1-5.
- CHEN Guanghui, ZHOU Senlin, Yi Yake, et al. Effects of drought stress in different growth stages on grain cadmium content of rice[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2018, 34(3): 1-5.
- [26] 刘艳, 孙文涛, 宫亮, 等. 水分调控对水稻根际土壤及产量的影响[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(2): 98-100.
- LIU Yan, SUN Wentao, GONG Liang, et al. Effects of water regulation on rhizosphere soils and yield of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2014, 33(2): 98-100.
- [27] 吴汉, 柯健, 何海兵, 等. 不同间歇时间灌溉对水稻产量及水分利用效率的影响[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(1): 37-44.
- WU Han, KE Jian, HE Haibing, et al. Experimental study on the effects of different intermittent irrigations on yield and water use efficiency of rice[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(1): 37-44.
- [28] 赵宏亮, 王麒, 孙羽, 等. 秸秆还田下灌溉方式对水稻产量及水分利用率的影响[J]. 核农学报, 2018(5): 959-969.
- ZHAO Hongliang, WANG Qi, SUN Yu, et al. Effect of different irrigation regimes on rice yield and water use efficiency under straw returning to field[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2018(5): 959-969.
- [29] 蔡昆争, 吴学祝, 骆世明. 不同生育时期土壤干旱后复水对水稻生长发育的补偿效应[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(5): 34-36.
- CAI Kunzheng, WU Xuezhu, LUO Shiming. Compensatory effects of re-watering after soil drying on rice growth and development[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(5): 34-36.
- [30] 高敏, 周俊, 刘海龙, 等. 叶面喷施硅硼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 Min, ZHOU Jun, LIU Hailong, et al. 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.
- [31] 杨文新, 王文君. 不同灌排模式下水稻水分利用效率分析[J]. 灌溉排水学报, 2018, 37(Supp.2): 40-44.
- YANG Wenxin, WANG Wenjun. Analysis of water use efficiency under different irrigation and drainage modes[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2018, 37(Supp.2): 40-44.
- [32] 褚光, 展明飞, 朱宽宇, 等. 干湿交替灌溉对水稻产量与水分利用效率的影响[J]. 作物学报, 2016, 42(7): 1 026-1 036.
- CHU Guang, ZHAN Mingfei, ZHU Kuanyu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. Acta Agronomica Sinica, 2016, 42(7): 1 026-1 036.

Improving Water Management to Reduce Cd Accumulation in Rice in Lightly Cd-Polluted Paddy Soils

GE Ying^{1,2}, MA Jinchuan², ZOU Ping², PAN Jianqing³, CHEN Lifan⁴, SHI Qiwei⁵, MA Junwei^{2*}

(1. School of Environmental and Resource Sciences, Zhejiang A & F University, Hangzhou 311300, China; 2. Institute of Environment, Resource, Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China; 3. Agriculture and Rural Affairs Bureau of Changxing County, Changxing 313100, China; 4. Agriculture and Rural Affairs Bureau, Liandu District, Lishui City, Lishui 323000, China; 5. Agricultural Technology Extension Center of Keqiao District, Shaoxing City, Shaoxing 312030, China)

Abstract: 【Background】 Soil pollution by cadmium has become an increasing concern not only because of its toxicity after entering the food chain but also due to its detrimental impact on soil quality and developing sustainable agriculture. As all biogeochemical processes controlling Cd bioavailability in soil are modulated by soil moisture, we conjecture that improving water management should be able to immobilize Cd and reduce its root uptake and translocation in crop. 【Objective】 The purpose of this paper is to experimentally explore the appropriate water management to reduce Cd uptake and translocation in rice grown in lightly Cd-polluted paddy soils. 【Method】 The experiment was conducted in pots and consisted of seven treatments: Keeping the soil moist at a predefined level during the whole growth season (CK); keeping the pot flooded during the whole growth season (T1), flooding from the stem elongation stage onwards (T2), flooding from the panicle initiation to booting stage onwards (T3), flooding from the heading and flowering stage onwards (T4), flooding from milk grain stage onwards (T5), and flooding from dough grain stage onwards (T6). All treatments were drained one week before harvest. In each treatment, we measured Cd accumulation in different plant tissues, as well as the changes in redox potential and soluble Cd in the rhizosphere. 【Result】 Both redox potential and soluble Cd in soil were positively correlated at significant level ($p < 0.01$). Both redox potential and soluble Cd in soil dropped steadily after flooding, making the soil more reductive. The longer the flooding lasted, the lower the redox potential was. The redox potential in T1 could drop as low as -159.78 mV, and T3 reduced the soluble Cd in the rhizosphere by 75.0%. The cadmium content in the rice grains did not exceed the criterion set in the national food safety standard (GB2762—2017) regardless of the treatments. Compared with CK, T1 reduced Cd content in the rice by 76.9% while in the meantime increasing rice yield by 19.2%. T6 impeded Cd translocation from the roots to the shoots, by increasing the Cd fraction in the roots by 15.2% and reducing the Cd accumulation in the stems by 13.0%. On average, flooding impeded Cd translocation from leaves to grains. Compared with CK, T5 increased the fraction of Cd in leaves by 5.0% while T3 reduced the fraction of Cd in grains by 4.3%. 【Conclusion】 Considering the balance of yield, Cd content in grain and ease of implementation, the best water management for the lightly Cd-contaminated paddy soils was to flood the fields from the heading and flowering stage until one week prior to the harvest.

Key words: water management; rice growth stage; cadmium; redox potential; rhizosphere; soluble Cd

责任编辑: 韩 洋