

吴 佳, 纪雄辉, 魏 维, 等. 水分状况对水稻镉砷吸收转运的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(7): 1427–1434.

WU Jia, JI Xiong-hui, WEI Wei, et al. Effect of water levels on cadmium and arsenic absorption and transportation in rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(7): 1427–1434.

水分状况对水稻镉砷吸收转运的影响

吴 佳¹, 纪雄辉^{2,3,4}, 魏 维^{2,3,4}, 谢运河^{2,3,4*}

(1.长沙民政职业技术学院, 长沙 410004; 2.湖南省农业环境生态研究所/农田土壤重金属污染防控与修复湖南省重点实验室, 长沙 410125; 3.南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410125; 4.农业部长江中游平原农业环境重点实验室, 长沙 410125)

摘 要:为探明不同水分状况下(淹水深度和潜水位高度)水稻对镉(Cd)、砷(As)吸收转运差异,采用盆栽试验,以湿润管理为对照,研究了3、6、9 cm的淹水深度和-3、-6、-9 cm潜水位高度下水稻对Cd、As吸收转运的影响。与湿润管理(CK)相比,淹水对水稻产量无显著影响,但低潜水位下的水稻产量比CK下降了21.06%~28.44%;淹水显著降低了水稻米、茎叶、根Cd含量,但促进了根As的积累,淹水的稻米Cd含量比CK下降了61.11%~69.43%;而低潜水位处理则显著增加了水稻对Cd的吸收,但显著抑制了对As的积累,低潜水位处理的稻米Cd含量比CK增加了4.08~4.48倍,而稻米As含量比CK降低了79.20%~81.96%。Cd、As在土壤-水稻系统的迁移转运过程中,不同水分状态下水稻对Cd、As的积累主要取决于土壤至根系的迁移转运环节,且米As含量还受As在根系、茎叶、稻米中转运分配的调节。不同淹水深度或不同潜水位高度对水稻米、茎叶、根的Cd含量或As含量影响皆不明显,水稻对Cd、As的吸收主要受限于淹水的状态;相关分析结果表明,不同水分管理模式下,水稻对Cd和As的吸收积累呈极显著负相关。因此,在Cd、As污染土壤的水分管理过程中,应结合土壤Cd、As污染程度制定适当的水分管理策略。

关键词:镉;砷;水分管理;吸收;转运

中图分类号:S156 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2018)07-1427-08 doi:10.11654/jaes.2018-0299

Effect of water levels on cadmium and arsenic absorption and transportation in rice

WU Jia¹, JI Xiong-hui^{2,3,4}, WEI Wei^{2,3,4}, XIE Yun-he^{2,3,4*}

(1.Changsha Social Work College, Changsha 410004, China; 2.Hunan Institute of Agro-Environment and Ecology/Key Lab of Prevention, Control and Remediation of Soil Heavy Metal Pollution in Hunan Province, Changsha 410125, China; 3.Southern Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, Changsha 410125, China; 4.Ministry of Agriculture Key Lab of Agri-Environment Institute in the Midstream of Yangtze River Plain, Changsha 410125, China)

Abstract: To investigate the effects of water levels (water depths and phreatic water levels) on arsenic (As) and cadmium (Cd) absorption and transportation in rice, pot experiments with water depths of 3, 6, 9 cm and phreatic water levels of -3, -6, -9 cm were carried out. The results showed that different water levels above ground had no significant impact on rice yield. However, groundwater levels decreased the yields by 21.06%~28.44% when compared to wetness as the control (CK). Regarding Cd and As absorption and transportation, water depth greatly decreased the Cd contents in grain, stem, and leaves but promoted As accumulation in roots. For example, Cd content in grain decreased by 61.11%~69.43% compared to that in CK. However, groundwater levels increased Cd content by 4.08~4.48 times in rice grain, whereas it decreased As content by 79.20%~81.96% compared to that in CK. Under different water regimes, As and Cd transportation from soil to roots played a determinant role in As and Cd accumulation in rice. As and Cd contents in rice grains were also regulated by the transportation and distribution of As and Cd levels in roots, stems, and leaves. No significant differences in As and Cd concentrations among

收稿日期:2018-03-06 录用日期:2018-06-07

作者简介:吴 佳(1982—),女,湖南沅江人,讲师,从事环境健康研究。E-mail:22328215@qq.com

*通信作者:谢运河 E-mail:yunhexie@163.com

基金项目:水利部公益性行业科研专项(201501019)

Project supported: The Special Scientific Research Fund of MWR Public Welfare Profession of China (201501019)

grain, stem, leaves, and roots were observed between different submergence depths or phreatic water levels. These results indicate that Cd and As absorption and accumulation were mainly limited by the two flooding forms. Correlation analysis revealed that there was a highly significant negative correlation between As and Cd levels in rice grain water depths. Thus, our results suggest that appropriate water management strategies should be used to combat high levels of As and Cd in rice grains from soil Cd and As pollution.

Keywords: cadmium; arsenic; water management; absorption; transportation

种植低吸收水稻品种、采用水肥管理的农艺调控、施用土壤调理剂的化学调控是当前修复治理重金属污染稻田的最常用方法。其中,水分管理调控主要通过影响土壤pH、土壤氧化还原电位(Eh)等土壤理化性质,并通过土壤铁、锰、硫的形态及含量影响土壤镉(Cd)、砷(As)活性。大量研究表明,较强的还原条件、较高的土壤pH值可增加铁锰氧化物活化度以及厌氧环境下形成CdS沉淀等皆可导致土壤Cd活性降低,减少水稻对Cd的吸收^[1-3];但强还原条件会导致As的溶解度增加,且土壤pH升高也会提高土壤As的有效性^[4-6];而在不同的土壤pH和Eh条件以及阴阳离子等配位离子的影响下,土壤水溶性有机碳对土壤中Cd、As的吸附具有增大和减小的双面影响^[7-8]。可见,不同水分条件对土壤中Cd、As活性的影响具有较大的不确定性,但整体上表现为淹水降低土壤Cd的活性、增加As的有效性,而干旱条件下则反之。目前,关于淹水对土壤Eh的影响^[9-10]以及Eh对水稻Cd或As的吸收积累研究较多^[11-12],刘昭兵等^[13-14]重点研究了不同淹水时间和水分管理方式对水稻Cd吸收积累的影响,但不同水分状况管理(不同淹水深度和潜水位高度)下同步研究水稻对Cd、As的吸收积累鲜见报道。为此,通过设置不同淹水深度和土层潜水位高度的盆栽试验,研究其对土壤Cd、As生物有效性以及水稻Cd、As吸收转运规律的影响,以期更好地为Cd、As污染稻田水分管理提供技术指导。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试土壤来源于湖南省长沙县北山镇荣合桥试验基地,为花岗岩发育的麻砂泥水稻土。土壤pH值为5.17,土壤全氮含量为 $2.75 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷含量为 $1.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $30.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质含量为 $30.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮含量为 $217 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷含量为 $29.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾含量为 $188 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。土壤全Cd含量为 $0.96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态Cd含量为 $0.34 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$;土壤全As含量为 $27.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,土壤有效态As含量为 $0.08 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,属于轻度Cd污染土壤。土壤

经风干后压碎,捡去石头、粗秸秆等杂质后过筛备用。

供试品种为两系杂交中熟早籼稻株两优819。

1.2 试验方法

采用盆栽试验,共设7个处理,3次重复。试验桶采用PVC管制成(图1),桶高60 cm,内径40 cm,每个桶分别在离顶端3、6、9、12、15、18 cm处开直径0.5 cm的水位控制孔,离顶端30 cm处开直径为1.0 cm的进水孔,所有孔用橡皮塞塞住;桶旁边固定贮水器用于补水,下端用软管与进水口联通,贮水器水位高度与水位控制孔高度相同,根据水位高度要求进行调整。每桶装供试土壤51 cm,土层表面距桶顶端9 cm,每桶栽秧苗4株。

分蘖盛期前全部采用湿润管理,分蘖盛期(8月20日)依次拔掉0、3、6、9、12、15、18 cm处水位控制孔的橡皮塞,即依次分别为T1、T2、T3、CK、T4、T5和T6处理。其中,CK为湿润管理对照,水位控制孔与土壤表层平齐,T1~T3为水层深度分别为9、6、3 cm的淹水处理;T4~T6为相对土壤表层潜水位高度分别为-3、-6、-9 cm的干旱胁迫处理。

2016年7月15日装土并加水平衡,确保土层高度为51 cm;7月23日每桶施入复合肥 $[\omega(\text{N}):\omega(\text{P}_2\text{O}_5):\omega(\text{K}_2\text{O})=15:15:15]$ 8 g,7月24日移栽水稻,8月5日每桶追施尿素2 g,期间保持湿润管理;8月20日开

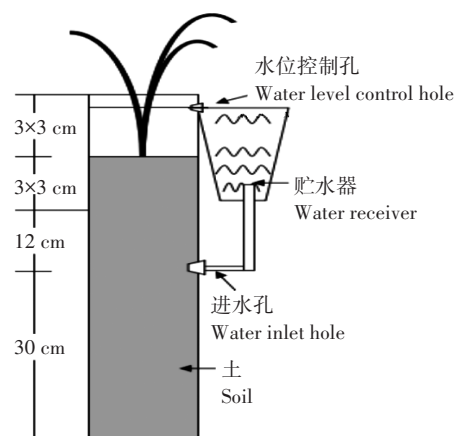


图1 不同水分状态的试验桶及补水装置示意图

Figure 1 Test bucket of different water conditions and the water refill schematic diagram

始进行不同水层深度管理,10月15日收割。期间于7月20日、8月5日、8月20日、9月5日、9月20日、10月5日测定土壤pH值和Eh,成熟期(10月12日)测定每桶水稻稻谷产量和地上部生物量,稻谷精米后粉碎备用,茎叶烘干后粉碎备用,根系清洗干净后用去离子水洗3遍,烘干后粉碎备用,测定稻米(精米)、茎叶、根的Cd、As含量;同时采用三点取样法用取样器每桶取20 cm深的土壤,风干后磨碎过20目筛备用,测定土壤有效态Cd、有效态As含量。

1.3 检测分析方法

土壤Eh测定采用Eh计(SX 712,上海仪电科学仪器股份有限公司)原位测定,将Eh电极插入土壤表层下2 cm,读数稳定后计数,每桶测定3次,取平均值;土壤pH值用酸度计(PHS-3C,雷磁)原位测定,读数稳定后计数,每桶测定3次,取平均值。

土壤有效Cd、有效As含量:称10.00 g土样,加入1 mol·L⁻¹的乙酸铵50 mL,25℃条件下180 r·min⁻¹振荡1 h后过滤,稀释20~100倍后用ICP-MS测定溶液Cd、As质量浓度。

土壤Cd、As全量:称过100目筛基础土样0.2 g于消煮管中,采用HNO₃-H₂O₂-HF微波消煮混合液,定容后过滤,稀释20~100倍后用ICP-MS测定溶液Cd、As质量浓度。

植株Cd、As含量:称粉碎样0.3 g于消煮管中,采用HNO₃-H₂O₂微波消煮混合液,定容后过滤,稀释20~100倍后用ICP-MS测定溶液Cd、As质量浓度。

采用SPSS 17.0及Microsoft Excel 2003进行数据的统计分析。

2 结果与讨论

2.1 不同水分状态对水稻产量及生物量的影响

测定成熟期水稻产量和生物量,结果如表1所示。从表1可看出,T1、T2和T3处理的稻谷产量、茎叶干质量以及地上部生物量皆与CK无显著差异;但

T4、T5和T6处理的水稻产量、茎叶干质量、地上部生物量皆显著低于CK。T4、T5和T6处理的稻谷产量分别比CK减少了26.04%、21.06%、28.44%,地上部生物量则分别比CK降低了26.25%、21.58%和27.42%。可见,淹水深度对水稻产量无显著影响,但较低的土壤水位高度限制了水稻对水分的吸收,可能是土壤低潜水位管理引起的水分胁迫,并通过减少有效穗数、降低千粒重等导致水稻严重减产^[15-17]。

2.2 不同水分状态对土壤pH值和Eh的动态影响

从图2可看出,不同淹水深度和水位高度对土壤pH值皆无显著影响。土壤初始pH值在5.26左右,8月5日测定的土壤pH值略有上升,平均达到5.58左右,之后土壤pH值又下降至初始水平,并在5.0~5.5之间波动。8月5日土壤pH值上升可能是受施肥的影响。

水稻分蘖盛期(8月20日)之后,T1、T2和T3处理土壤pH值略高于T4、T5和T6处理,可能是因为土壤淹水还原是一个消耗H⁺的过程,而H⁺的大量消耗会导致土壤pH值的增加,但随着土壤中可分解的有机物质的不断消耗、渍水条件下产生的中间产物有机酸以及终端产物CO₂形成的碳酸的综合作用,使土壤

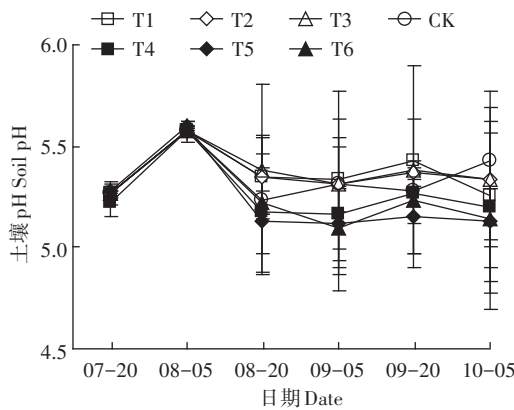


图2 不同水分状态下的土壤pH变化动态

Figure 2 The soil pH dynamics under different water conditions

表1 不同水分状态下的水稻产量及生物量(g·桶⁻¹)

Table 1 The rice yields and biomass under different water conditions(g·bucket⁻¹)

处理 Treatment	CK	T1	T2	T3	T4	T5	T6
稻谷产量 Yield of rice	73.02a	69.28a	71.26a	78.26a	54.00b	57.64b	52.25b
茎叶干质量 Dry weight of stem	76.93a	71.83a	74.26a	76.92a	56.58b	59.95b	58.15b
地上部生物量 Total biomass overground	149.95a	141.12a	145.52a	155.18a	110.58b	117.59b	108.84b

注:表中不同小写字母表示处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different letters indicate significant differences among the treatments(P<0.05). The same below.

pH 逐渐回落^[18]。因此,在水稻进行不同水管理下,T1、T2和T3处理土壤pH值略高于T4、T5和T6处理。

从图3可看出,CK的土壤Eh从初始的313 mV逐渐下降,最终在-100 mV和100 mV之间波动;T1、T2和T3处理的土壤Eh随时间的延长逐渐下降,最终稳定在-300 mV至-400 mV之间,显著低于CK,但T1、T2和T3处理间无明显差异;T4、T5和T6处理的Eh一直稳定在200 mV至400 mV之间,远高于CK,但T4、T5和T6处理间也无明显差异。可见,淹水可显著降低土壤Eh,低水位管理则显著提高土壤Eh,但土壤Eh受淹水深度或水位高度的影响不明显,仅取决于淹水的状态;而湿润管理(CK)则受水稻生长过程中水分消耗、外界温湿度等气候环境的影响,其土壤Eh在氧化态和还原态之间波动。

2.3 不同水分状态对水稻Cd、As含量及土壤有效态Cd、As含量的影响

测定成熟期水稻Cd、As含量及土壤有效态Cd、As含量,结果见表2。从表2可看出,T1、T2和T3处理的稻米、茎叶、根中Cd含量显著低于CK,但T4、T5和T6处理则显著高于CK。与CK相比,T1、T2和T3

处理的稻米中Cd含量分别降低了66.76%、69.43%和61.11%,茎叶中Cd含量分别降低了65.89%、67.92%和66.95%,根中Cd含量也分别降低了76.02%、76.70%和75.51%;T4、T5和T6处理的稻米中Cd含量分别为CK的5.48、5.15和5.08倍,茎叶中Cd含量分别为CK的5.16、6.74、6.72倍,而根中Cd含量也分别为CK的2.46、4.17和3.77倍。T1、T2和T3处理的稻米、茎叶中As含量与CK无显著差异,根中As含量则显著高于CK且随淹水深度的增加而降低;T4、T5和T6处理的稻米、茎叶、根中As含量皆显著低于CK,处理间差异也不明显。与CK相比,T4、T5和T6处理稻米中As含量分别降低了79.84%、79.20%和81.96%;茎叶中As含量分别降低了87.31%、92.34%和93.26%;根中As含量则分别降低了94.64%、95.87%和97.01%。不同淹水深度、水位高度皆对土壤有效态Cd含量无显著影响。与CK相比,T1、T2和T3处理或T4、T5和T6处理的土壤有效态Cd、有效态As含量皆与CK无显著差异,但T1、T2和T3处理土壤有效态As含量显著高于T4、T5和T6处理。可见,与湿润管理相比,淹水可大幅度降低水稻对Cd的吸收积累,而干旱胁迫下水稻对Cd的吸收积累能力成倍增长,但不同淹水层深度或水位高度皆对水稻Cd吸收的影响不明显,水稻对Cd的吸收主要受限于淹水状态;水分充足的淹水管理和湿润管理明显促进了水稻对As的吸收,而水分供应受限的干旱胁迫处理则显著抑制了水稻对As的积累;不同淹水深度和水位高度对土壤有效态Cd含量皆无显著影响,但水分供应充足时土壤As活性高,而水分供应受限时土壤As活性低。

水稻对Cd、As的积累与土壤Cd、As的有效态含量相关,调控土壤Cd、As形态的变化可改变其在土壤中的生物有效性^[19-20]。由于土壤中As主要以阴离子形式存在,Cd则主要以阳离子形式存在,因此土壤中

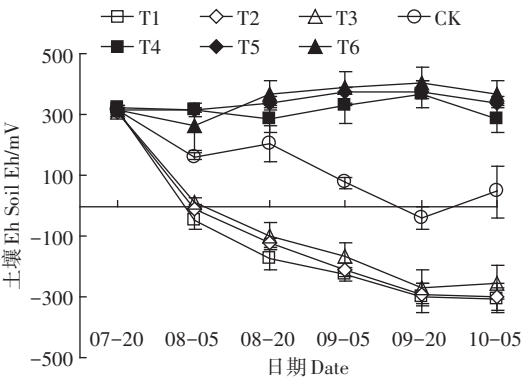


图3 不同水分状态下的土壤Eh动态变化

Figure 3 The soil Eh dynamics under different water condition

表2 不同水分状态的水稻Cd、As含量及土壤有效态Cd、As含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 The contents of rice Cd and As and soil available Cd and As under different water conditions(mg·kg⁻¹)

处理 Treatment	稻米 Rice		茎叶 Stem		根 Root		土壤有效态 Soil available content	
	Cd	As	Cd	As	Cd	As	Cd	As
CK	0.40b	0.66a	1.64c	16.14a	9.28c	165.06c	0.17a	0.06ab
T1	0.13c	0.57a	0.56d	16.59a	2.23d	335.98a	0.22a	0.08a
T2	0.12c	0.63a	0.53d	16.32a	2.16d	326.14a	0.20a	0.07a
T3	0.15c	0.67a	0.54d	17.65a	2.27d	266.99b	0.17a	0.07a
T4	2.18a	0.13b	8.47b	2.05b	22.86b	8.85d	0.17a	0.03b
T5	2.05a	0.14b	11.06a	1.24b	38.74a	6.81d	0.21a	0.04b
T6	2.02a	0.12b	11.02a	1.09b	35.02a	4.94d	0.17a	0.03b

As、Cd的吸附、溶解以及被水稻吸收富集等方面具有相反的性质^[21]。而土壤pH和Eh是表征土壤环境的重要因子,通过影响土壤中Cd、As的溶解度进而影响其迁移转运能力^[22-24]。大量研究表明,土壤Cd的有效性与土壤pH值呈极显著负相关^[25-27],但在本研究中,由于不同水分管理状况下的土壤pH处理间差异不明显,因此本研究中土壤Cd、As有效性更主要受土壤Eh的影响。不同的水分管理下,土壤Cd形态的变化与还原条件下CdS的形成以及氧化铁活性有关,氧化条件下的Cd比在还原条件下更易转化为有效态,其原因可能是淹水还原条件下,一方面土壤中的 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,而Cd具有很强的亲硫性,易与 S^{2-} 共沉淀,从而降低Cd的有效性^[28-29];另一方面,淹水后晶型氧化铁也表现出对Cd的专性吸附,并促进了土壤有机质对Cd的固定作用,使交换态Cd向有机结合态Cd转化,从而降低了Cd的生物有效性^[30]。但由于稻田厌氧的特殊化学性质和水稻髓腔中空的特殊解剖结构,稻米中的As含量要远远高于旱作农作物^[31]。水稻为适应生活环境而在根系表面形成不均匀分布的根表铁膜,其对As(V)有很强的亲和能力,阻碍As进入根系^[32-33]。本研究表明,在淹水还原条件下,土壤有效态As含量,水稻稻米、茎叶、根系中的As含量皆显著高于氧化条件的低潜水位处理,表明淹水显著提升了As的生物有效性^[25]。其原因可能是在淹水情况下,土壤胶体中的铁氧化物被还原成低价态的 Fe^{2+} 进入到溶液中,随之吸附态As(V)也会因还原作用而释放到溶液中,且主要以As(III)形式存在,而As(V)比As(III)易被土壤胶体吸附固持,造成土壤As的移动性增强^[34-35],从而提升了As的生物有效性。

2.4 不同水分状态对水稻Cd、As转运的影响

Cd、As在土壤-水稻系统各个部位之间的迁移情况用转移系数(TF)表示,即 $\text{TF}_{x/y} = C_y/C_x$,式中:TF_{x/y}代

表Cd、As从x到y之间的转移系数;x和y分别代表土壤-水稻系统的某一部位,如土壤、茎、米; C_x 、 C_y 分别代表2个部位中Cd、As含量(土壤中以有效态Cd含量和有效态As含量进行计算)。

计算Cd、As在土壤-水稻系统中的转移系数,结果如表3所示。由表3可知,Cd和As在土壤-水稻系统中转运系数处理间的差异以 $\text{TF}_{\text{根/土}} > \text{TF}_{\text{茎/根}} > \text{TF}_{\text{米/茎}}$ 。在土壤-水稻系统的转运中,T1、T2和T3处理Cd、As的 $\text{TF}_{\text{米/茎}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 与CK皆无显著差异;而T4、T5和T6处理As的 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 显著高于CK,表明低水位的干旱胁迫增加了根As向茎的转运。而通过土壤有效态Cd、有效态As计算土壤Cd、As向水稻根的转运结果表明,T1、T2和T3处理Cd的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 显著低于CK,T4、T5和T6处理Cd的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 显著高于CK,而As与之相反,表明不同水分状态下Cd、As在水稻根系-土壤界面中的迁移转运能力正好相反。

与CK相比,T1、T2和T3处理Cd的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 显著低于CK,而T4、T5和T6处理Cd的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{米/土}}$ 皆显著高于CK,也高于T1、T2和T3处理;T1、T2和T3处理As的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{米/土}}$ 转运系数与CK皆无显著差异,但T4、T5和T6处理As的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{茎/土}}$ 、 $\text{TF}_{\text{米/土}}$ 转运系数皆显著高于CK以及T1、T2和T3处理。可见,与CK相比,低潜水位管理显著促进Cd向根系及地上部的转运,并显著抑制As向根系及地上部的转移,淹水状态下则反之。在土壤-水稻系统Cd的转运中,与T1、T2和T3处理相比,T4、T5和T6处理的 $\text{TF}_{\text{米/茎}}$ 和 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 皆无明显差异,但T4、T5和T6处理的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 显著高于T1、T2和T3处理;而在As的转运中,与T1、T2和T3处理相比,T4、T5和T6处理的 $\text{TF}_{\text{米/茎}}$ 和 $\text{TF}_{\text{茎/根}}$ 皆显著高于T1、T2和T3,但T4、T5和T6处理的 $\text{TF}_{\text{根/土}}$ 显著低于T1、T2和T3处理。表明不同水分管理模式下水稻对Cd、As的积累主要由土壤

表3 不同水分状态下Cd、As在土壤-水稻系统中的转移系数

Table 3 The Cd and As transfer coefficients in soil-rice system under different water conditions

处理 Treatment	TF _{米/茎} TF _{rice/stem}		TF _{茎/根} TF _{stem/root}		TF _{根/土} TF _{root/soil}		TF _{米/土} TF _{rice/soil}		TF _{茎/土} TF _{stem/soil}	
	Cd	As	Cd	As	Cd	As	Cd	As	Cd	As
CK	0.26a	0.04b	0.18b	0.10b	48.61c	3 082.75a	2.08b	12.19a	8.76c	309.60a
T1	0.23a	0.03b	0.23ab	0.05b	10.65d	4 222.33a	0.52b	6.54a	2.46c	204.31a
T2	0.30a	0.04b	0.24ab	0.05b	9.99d	3 769.60a	0.66b	6.60a	2.42c	186.09a
T3	0.34a	0.03b	0.24ab	0.07b	13.98d	4 333.55a	1.03b	9.95a	3.18c	304.56a
T4	0.27a	0.05ab	0.38a	0.26a	148.96b	268.00b	13.71a	3.21b	50.52b	68.26b
T5	0.22a	0.09a	0.27ab	0.20a	222.41ab	189.99b	12.90a	3.73b	59.31b	38.34b
T6	0.18a	0.09a	0.32ab	0.26a	220.30a	151.07b	12.08a	3.81b	68.44a	38.95b

转运至根系所决定,Cd、As 主要富集在水稻根部,仅有极少一部分转运至茎叶和稻米中,这主要是因为根系的根表铁膜是阻控水稻吸收积累 Cd、As 的天然屏障^[36],而淹水与低潜水位管理对 Cd 在水稻体内向上部的转运无明显影响;而与低潜水位管理相比,淹水更易促进水稻根系对土壤 As 的吸收,而低水位管理则降低了根系对土壤 As 的吸收,但增大了水稻体内 As 向茎叶和稻米中的分配比例。刘昭兵^[14]、史磊^[37]等也研究发现,淹水能在一定程度上抑制 Cd 由茎叶向糙米的转运,并显著影响水稻茎叶和糙米对土壤 Cd 的富集能力;陈丽娜^[38]也研究发现不同水分管理下水稻不同部位间 As 的转运也存在较大差异。

2.5 稻米 Cd、As 含量与土壤性质及 Cd、As 在水稻-土壤系统转运的相关性

分析稻米 Cd、As 含量之间的相关性,结果见表 4。由表 4 可知,稻米含 Cd 量和含 As 量呈极显著负相关,表明不同水分管理模式下水稻对 Cd、As 的吸收效果相反,降低稻米 Cd 含量势必增加稻米 As 含量。

分析稻米 Cd、As 含量与成熟期(10月5日)土壤 pH 和 Eh 之间的相关性,结果见表 4。由表 4 可知,稻米 Cd 含量与土壤 pH 负相关,但相关不显著,而与土壤 Eh 极显著正相关;稻米 As 含量则与土壤 pH 显著正相关,与土壤 Eh 极显著负相关;土壤 Eh 对稻米 Cd、As 含量的影响作用大于土壤 pH 的影响。可见,不同水层深度和水位高度管理下,土壤 Eh 的变化是影响水稻 Cd、As 吸收的一个关键因素。

稻米 Cd 含量与土壤有效态 Cd 含量相关不明显,而稻米 As 含量与土壤有效态 As 含量呈极显著正相关,这主要是不同淹水深度和水位高度对土壤有效态 Cd 含量的影响不明显,而淹水则可显著增加土壤有效态 As 含量所致。

稻米 Cd 含量与 Cd 的 $TF_{米/茎}$ 相关不明显,而与 Cd 的 $TF_{茎/根}$ 、 $TF_{根/土}$ 、 $TF_{米/土}$ 、 $TF_{茎/土}$ 皆极显著正相关,其相

关系数为 $TF_{米/土} > TF_{茎/土} > TF_{根/土} > TF_{茎/根} > TF_{米/茎}$,而稻米 As 含量则与之皆呈极显著负相关;稻米 As 含量与 As 的 $TF_{米/茎}$ 、 $TF_{茎/根}$ 皆呈极显著负相关,但与 $TF_{米/土}$ 、 $TF_{茎/土}$ 、 $TF_{根/土}$ 皆呈极显著正相关,而稻米 Cd 含量则与之相反。可见,不同水分状态管理下,稻米 Cd 含量与 Cd 由土壤向地上部转运能力正相关,向上转运的越多,稻米 Cd 含量越高,其关键转运节点为 Cd 在土壤至根系、根系至茎叶的转运环节,且主要由土壤至根系的环节所决定。而稻米 As 含量与土壤 As 向水稻根系及地上部的转运正相关,但水稻根系、茎叶 As 含量越高,As 由该器官向上部器官中转运的能力越低,表明稻米 As 含量受土壤 As 向根系及地上部转运的主导,并受 As 在根系、茎叶、稻米中分配的调节。水稻对 Cd 的吸收与对 As 的积累呈显著负相关。

3 结论

(1)淹水深度对水稻生长及产量无显著影响,但潜水位管理下的水稻产量和生物量皆显著下降。

(2)不同水分状态管理对土壤 pH 值的影响不明显,但淹水处理的土壤 pH 值略高于潜水位管理处理;而不同水分状态下土壤 Eh 差异明显,淹水处理的土壤 Eh 随淹水时间的延长,逐渐在 -300 mV 至 -400 mV 之间稳定,而潜水位管理下的土壤 Eh 则在 200 mV 至 400 mV 之间波动。

(3)淹水可显著降低水稻对 Cd 的吸收,而潜水位管理下水稻对 Cd 的积累能力成倍增长,水稻对 Cd 的吸收主要受限于淹水状态。水分供应充足增加了土壤 As 活性,显著促进水稻对 As 的吸收;而水分供应受限降低了土壤 As 活性,并显著抑制水稻对 As 的积累。

(4)不同水分状态管理下,水稻对 Cd、As 的积累主要由土壤转运至根系的环节所决定,不同水分管理对 Cd 在水稻体内向上部的转运无明显影响,但淹水

表 4 稻米 Cd、As 量与土壤性质及 Cd、As 在水稻-土壤系统转运间的相关系数

Table 4 Correlations between Cd and As contents in rice and their transfer coefficients in soil-rice system

项目 Item	米 Cd 含量	土壤 Soil		土壤有效态 Soil available content		$TF_{米/茎}$ $TF_{rice/stem}$		$TF_{茎/根}$ $TF_{stem/root}$		$TF_{根/土}$ $TF_{root/soil}$		$TF_{米/土}$ $TF_{rice/soil}$		$TF_{茎/土}$ $TF_{stem/soil}$	
		pH Eh		Cd As		Cd As		Cd As		Cd As		Cd As		Cd As	
米 Cd 含量 Cd content of rice	1	-0.285	0.924**	-0.163	-0.747**	-0.208	0.749**	0.598**	0.875**	0.905**	-0.897**	0.978**	-0.666**	0.962**	-0.818**
米 As 含量 As content of rice	-0.928**	0.456*	-0.838**	0.098	0.667**	0.35	-0.674**	-0.657**	-0.803**	-0.870**	0.861**	-0.911**	0.807**	-0.931**	0.834**

注: *为 0.05 水平上显著相关; **为 0.01 水平上显著相关。

Note: *indicates the correlated significance at 5% level, **indicates the correlated significance at 1% level.

会促进水稻根系对土壤As的吸收,而潜水位管理则降低了根系对土壤As的吸收,但潜水位管理增加了水稻体内As向茎叶和稻米中的转运。相关分析表明,不同水分管理模式下,水稻对Cd和As的吸收积累呈极显著负相关。因此,在Cd、As污染土壤的水分管理过程中,应结合土壤Cd、As污染程度,适当制定水分管理策略。

参考文献:

- [1] Comu J Y, Denaix L, Schneider A, et al. Temporal evolution of redox processes and free Cd dynamics in a metal-contaminated soil after re-wetting[J]. *Chemosphere*, 2007, 70(2):306-314.
- [2] Maes A, Vanthuyne M, Cauwenberg P, et al. Metal partitioning in a sulfidic canal sediment: Metal solubility as a function of pH combined with EDTA extraction in anoxic conditions[J]. *Science of the Total Environment*, 2003, 312(1/2/3):181-193.
- [3] 李义纯, 葛 滢. 淹水土壤中镉活性变化及其制约机理[J]. 土壤学报, 2011, 48(4):840-846.
LI Yi-chun, GE Ying. Variation of cadmium activity in flooded soils and its controlling mechanisms[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(4):840-846.
- [4] 陈同斌. 土壤溶液中的砷及其与水稻生长效应的关系[J]. 生态学报, 1996, 16(2):147-153.
CHEN Tong-bin. Arsenic in soil solution and its effect on the growth of rice(*Oryza Sativa* L.)[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(2):147-153.
- [5] 杨文捷, 刘更另. 磷和硫对空心菜吸收砷的影响[J]. 环境化学, 1996, 15(1):374-379.
YANG Wen-jie, LIU Geng-ling. Influence of phosphate and sulphate on the yield and arsenic accumulation of swamp-cabbage[J]. *Environmental Chemistry*, 1996, 15(1):374-379.
- [6] 雷 梅, 陈同斌, 范稚连, 等. 磷对土壤中砷吸附的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 14(11):89-92.
LEI Mei, CHEN Tong-bin, FAN Zhi-lian, et al. Effect of phosphorus on arsenic adsorption by three different soils[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2003, 14(11):89-92.
- [7] Moore T R, Souza W D, Koprivnjak J F. Control on the sorption of dissolved organic carbon by soil[J]. *Soil Science*, 1992, 154(2):120-129.
- [8] Chubin R G, Street J J. Adsorption of cadmium on soil constituents in the presence of complexing ligands[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1981, 10(2):225-228.
- [9] 王 明, 张晴雯, 杨正礼, 等. 宁夏引黄灌区干湿交替过程中土壤Eh的动态变化及影响因素[J]. 灌溉排水学报, 2014, 33(3):47-51.
WANG Ming, ZHANG Qing-wen, YANG Zheng-li, et al. Dynamic change and influence factors of soil Eh in the paddy field during the drying and rewetting cycles in Yellow River irrigation area of Ningxia Autonomous Region[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2014, 33(3):47-51.
- [10] 杨 丹, 刘鸣达, 姜 峰, 等. 酸性和中性水田土壤施用硅肥的效应研究 I. 对土壤pH、Eh及硅动态的影响[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(4):757-763.
YANG Dan, LIU Ming-da, JIANG Feng, et al. Effect of silicon fertilizer in acid and neutral paddy field soils I. Effect on dynamic changes of pH, Eh and Si in soil solution[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(4):757-763.
- [11] 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]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2017, 38(1):343-351.
- [12] 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. Effects of different water managements and soil Eh on migration and accumulation of Cd in rice[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2017, 38(6):2530-2537.
- [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] 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.
- [15] 王成媛, 王伯伦, 张文香, 等. 土壤水分胁迫对水稻产量和品质的影响[J]. 作物学报, 2006, 32(1):131-137.
WANG Cheng-ai, WANG Bo-lun, ZHANG Wen-xiang, et al. Effects of water stress of soil on rice yield and quality[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(1):131-137.
- [16] 程建平, 曹凑贵, 潘圣刚, 等. 不同灌溉方式下水稻产量性状相关性 & 通径分析[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(6):96-99.
CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, PAN Sheng-gang, et al. Correlation and path analysis on the yield characters of paddy rice under different irrigation modes[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2008, 27(6):96-99.
- [17] 程建平, 曹凑贵, 蔡明历, 等. 不同灌溉方式对水稻产量和水分生产率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12):28-33.
CHENG Jian-ping, CAO Cou-gui, CAI Ming-li, Effects of different irrigation modes on the yield and water productivity of rice[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22(12):28-33.
- [18] 胡 坤, 喻 华, 冯文强, 等. 淹水条件下不同中微量元素及有益元素对土壤pH和Cd有效性的影响[J]. 西南农业学报, 2010, 23(4):1188-1193.
HU Kun, YU Hua, FENG Wen-qiang, et al. Effect of different fertilizers of secondary micro- and beneficial elements on soil pH and Cd availability under waterlogged condition[J]. *Southwest China Journal*

- of *Agricultural Sciences*, 2010, 23(4):1188-1193.
- [19] 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.
- [20] Reddy C N, Patrick W H. Effect of redox potential and pH on the uptake of cadmium and lead by rice plants[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1977, 6(3):259-262.
- [21] 钟倩云, 曾敏, 廖柏寒, 等. 碳酸钙对水稻吸收重金属(Pb、Cd、Zn)和As的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(4):1242-1248.
ZHONG Qian-yun, ZENG Min, LIAO Bo-han, et al. Effects of CaCO_3 addition on uptake of heavy metals and arsenic in paddy fields[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(4):1242-1248.
- [22] 李其林, 魏朝富, 王定勇, 等. 重金属在土壤载体中的行为和环境响应[J]. *土壤通报*, 2008, 39(2):441-447.
LI Qi-lin, WEI Chao-fu, WANG Ding-yong, et al. Environmental response and behavior of heavy metal in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39(2):441-447.
- [23] Davranche M, Bollinger J C. Heavy metals desorption from synthesized and natural iron and manganese oxyhydroxides: Effect of reductive conditions[J]. *J Colloid Interface Sci*, 2000, 227(2):531-539.
- [24] 邓林, 李柱, 吴龙华, 等. 水分及干燥过程对土壤重金属有效性的影响[J]. *土壤*, 2014, 46(6):1045-1051.
DENG Lin, LI Zhu, WU Long-hua, et al. Influence of moisture and drying process on soil heavy metal availability[J]. *Soil*, 2014, 46(6):1045-1051.
- [25] 张燕, 铁柏清, 刘孝利, 等. 玉米秸秆生物炭对稻田土壤砷、镉形态的影响[J]. *环境科学学报*, 2018, 38(2):715-721.
ZHANG Yan, TIE Bo-qing, LIU Xiao-li, et al. Effects of waterlogging and application of bio-carbon from corn stalks on the physico-chemical properties and the forms of arsenic and cadmium in arsenic and cadmium-contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(2):715-721.
- [26] 张振兴, 纪雄辉, 谢运河, 等. 水稻不同生育期施用生石灰对稻米镉含量的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2016, 35(10):1867-1872.
ZHANG Zheng-xing, JI Xiong-hui, XIE Yun-he, et al. Effects of quicklime application at different rice growing stage on the cadmium contents in rice grain[J]. *Journal of Agro-environment Science*, 2016, 35(10):1867-1872.
- [27] 谢运河, 纪雄辉, 田发祥, 等. 不同Cd污染特征稻田施用钝化剂对水稻吸收积累Cd的影响[J]. *环境工程学报*, 2017, 11(2):1242-1250.
XIE Yun-he, JI Xiong-hui, TIAN Fa-xiang, et al. Effect of passivator on Cd uptaking of rice in different Cd pollution characteristics paddy soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2017, 11(2):1242-1250.
- [28] 李元, 祖艳群. 重金属污染生态与生态修复[M]. 北京: 科学出版社, 2016:213-220.
LI Yuan, ZU Yan-qun. Heavy metal pollution ecology and ecological remediation[M]. Beijing: Science Press, 2016:213-220.
- [29] 苏玲, 章永松, 林咸永, 等. 维管植物的镉毒和耐性机制[J]. *植物营养与肥料学报*, 2000, 6(1):106-112.
SU Ling, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong, et al. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1):106-112.
- [30] 郑绍建, 胡霁堂. 淹水对污染土壤镉形态转化的影响[J]. *环境科学学报*, 1995, 15(2):142-147.
ZHENG Shao-jian, HU Ai-tang. Effects of flooding on the transformation of cadmium fractions in contaminated soils[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1995, 15(2):142-147.
- [31] Williams P N, Villada A, Deacon C, et al. Greatly enhanced arsenic shoot assimilation in rice leads to elevated grain levels compared to wheat and barley[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, 41(19):6854-6859.
- [32] Liu W J, Zhu Y G, Smith F A, et al. Do iron plaque and genotypes affect arsenate uptake and translocation by rice seedlings (*Oryza sativa* L.) grown in solution culture? [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2004, 55(403):1707-1713.
- [33] Chen Z, Zhu Y G, Liu W J, et al. Direct evidence showing the effect of root surface iron plaque on arsenite and arsenate uptake into rice (*Oryza sativa*) roots[J]. *New Phytologist*, 2005, 165(1):91-97.
- [34] Mcgeehan S L, Naylor D V. Sorption and redox transformation of arsenite and arsenate in two flooded soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1994, 58(2):337-342.
- [35] Onken B M, Hossner L R. Determination of arsenic species in soil solution under flooded conditions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60(5):1385-1392.
- [36] Li H, Luo N, Li Y W, et al. Cadmium in rice: Transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224:622-630.
- [37] 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 Zhao-hui, 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.
- [38] 陈丽娜. 不同水分管理模式下水砷在土壤-水稻体系中的时空动态规律研究[D]. 保定: 河北农业大学, 2009.
CHEN Li-na. Temporal and spatial dynamics of As in the soil-rice system under different water regimes[D]. Baoding: Hebei Agriculture University, 2009.