

崔晓莹, 秦俊豪, 黎华寿. 不同水分管管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2177–2184.

CUI Xiao-ying, QIN Jun-hao, LI Hua-shou. Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2177–2184.

不同水分管管理模式对水稻生长及重金属迁移特性的影响

崔晓莹^{1,2}, 秦俊豪^{1,2}, 黎华寿^{1,2*}

(1. 华南农业大学农业部华南热带农业环境重点实验室, 广州 510642; 2. 广东省现代生态农业与循环农业工程技术研究中心, 广州 510642)

摘要: 通过水泥池小区试验, 研究了淹水(CF)和干湿交替(IF)两种水分管管理模式对常规稻(C)与杂交稻(H)生长及重金属 Pb、Cr、Cd 富集的影响。结果表明, 干湿交替(IF)处理能显著提高水稻的生物量及产量, 增强了 Pb、Cr、Cd 在土壤-水稻系统中的迁移能力, 并显著促进水稻根系对 Cd 的富集, 提高米粒中 Cr 的含量。研究结果还表明, 水分管管理对 Cr 在水稻体内的迁移特性的影响明显不同于 Pb 和 Cd。Pb、Cd 在水稻体内含量呈现根>茎叶>米粒, 而 Cr 则为米粒/茎叶>根, 且不同水分管管理模式对常规稻(C)米粒富集 Cr 的影响较杂交稻(H)大。可见, 干湿交替模式虽能促进水稻生长和增产, 同时却显著提高了 Cd 和 Cr 的生物有效性。因此, 在采取相应水分管管理模式降低重金属生物有效性时应充分考虑水稻对不同重金属类型的响应差异, 才能更有效地控制当前农田环境的重金属污染。

关键词: 水稻; 水分管管理; 重金属迁移特性

中图分类号: S511 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2017)11-2177-08 doi:10.11654/jaes.2017-0665

Effect of different water management modes on rice (*Oryza sativa* L.) growth and heavy metal transport characteristics

CUI Xiao-ying^{1,2}, QIN Jun-hao^{1,2}, LI Hua-shou^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Agro-Environment in the Tropics, Ministry of Agriculture, P.R. China, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; 2. Guangdong Engineering Research Center for Modern Eco-agriculture and Circular Agriculture, Guangzhou 510642, China)

Abstract: A pool experiment was conducted to study the effects of two water management modes as continuous flood (CF) and interval flood (IF) on the growth and Pb, Cd, and Cr accumulation of two kinds of *Oryza sativa* L. (conventional rice and hybrid rice) cultivars. The results showed that the irrigation mode of IF significantly increased the rice biomass and yield. However, this irrigation mode enhanced the mobilization of Pb, Cd, and Cr in the soil-rice system and significantly increased the accumulation of Cd in the roots and Cr in the grains. Furthermore, the transport characteristics of Cr were different from those of Pb and Cd in the rice system during the water management modes. The accumulation order of Pb and Cd in the rice was root>stem and leaf>grain, whereas grain/stem and leaf>root was the order for Cr. In addition, the water management modes had a greater impact on the accumulation of Cr in the grain of conventional rice than in the grain of hy-

收稿日期: 2017-05-07 录用日期: 2017-07-07

作者简介: 崔晓莹(1995—), 女, 广东番禺人, 本科生, 从事污染生态学研究。E-mail: y_cuixiaoying@163.com

* 通信作者: 黎华寿 E-mail: lihuashou@scau.edu.cn

基金项目: 国家高技术研究发展计划(“863 计划”)项目(2013AA102402); 国家自然科学基金资助项目(41271469); 广东省科技计划项目(2013B020303001, 2015B090903077)

Project supported: The National High Technology Research and Development Program of China(2013AA102402); The National Natural Science Foundation of China(41271469); The Science and Technology Planning Project of Guangdong Province, China(2013B020303001, 2015B090903077)

brid rice. Although the IF irrigation mode could significantly promote the growth of rice, it significantly increased the bioavailabilities of Cd and Cr as well. Therefore, the different responses of rice to different heavy metals should be considered when water management is conducted to reduce heavy metal bioavailability and heavy metal pollution, in order to effectively mitigate heavy metal pollution in farmland environment systems.

Keywords: rice (*Oryza sativa* L.); water management; heavy metal transport characteristics

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是我国种植面积大、总产量高的粮食作物之一,但稻田土壤重金属污染问题却十分严峻。2014 年环保部与国土资源部发布的《全国土壤污染状况调查公报》^[1]表明,耕地土壤点位超标率为 10.4%。从污染物超标情况看,重金属镉、铅、铬超标率分别为 7.0%(位居第一)、1.5%、1.1%。土壤重金属污染具有范围广、滞留时间长、毒性强、危害大、污染后难以修复的特点。农田重金属污染对作物生长、农产品质量与人体健康造成负面影响^[2-3]。土壤重金属污染已成为世界性的环境问题,因而成为当前国内外研究的热点课题^[4]。

淹水灌溉为水稻种植的常规灌溉方式,但为了寻求更为节水的灌溉模式,人们开始探究不同水分管理的灌溉模式。近年来关于水分状况对水稻生长的影响与机理已有较多的报道^[5-7],而有关水分管理对水稻富集重金属的研究主要集中于 As、Cd。龙水波等^[8]研究表明,灌浆期后湿润灌溉、淹水与湿润交替能显著降低水稻茎叶、谷壳、糙米 As 含量和糙米无机 As 含量;Spanu 等^[9]研究表明,喷灌处理下水稻米粒 As 含量比淹水灌溉处理低约 50 多倍;李剑睿等^[10]研究表明,长期淹水栽培模式能显著降低水稻各部位的 Cd 含量。此外,Hu 等^[11]研究表明,在 As、Cd 复合污染下水分管理对水稻富集 As 与 Cd 的影响规律不同。

目前,关于水分管理对水稻 Pb、Cr 的富集及其在土壤-水稻系统中迁移转化的研究鲜有报道。本研究通过水泥池小区试验探究在重金属污染下,不同水分管理模式(淹水和干湿交替处理)对两个水稻品种(常规稻和杂交稻)的生长及其对重金属 Pb、Cr、Cd 在土壤-水稻系统中迁移特性的影响,旨在探明两种水分管理模式对重金属胁迫下土壤-水稻系统中 Pb、Cr、Cd 迁移特性的影响及其差异,为控制当前农田环境的重金属污染提供参考。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采集于华南农业大学生态学系农场,试验水泥池(长 1.0 m×宽 1.0 m×高 0.65 m)30~65 cm 深度填入农场水稻土 30~65 cm 土层土壤,5~30 cm 填入农场水稻土 0~25 cm 表层土壤。土壤质地类型为壤土,其基本化学性质见表 1。部分土壤采集后去除杂物,自然风干后过 2 mm 筛,采用土壤农化常规分析方法^[12]分析供试土壤 pH 及有机质、全 N、速效 P、速效 K 含量,并采用火焰原子吸收光谱仪(德国耶拿, ZEEnit[®] 700P)测定重金属铅、铬、镉含量。

1.1.2 供试品种

选取常规稻黄华占和杂交稻天优 122 两个水稻品种(广东省农科院水稻所提供)。种子用 30% H₂O₂ 浸泡 15 min,用去离子水完全洗净,置于潮湿的石英砂中培育。待水稻种子发芽后,转移至华南农业大学生态学农场(23°08'N, 113°15'E)育苗池的秧盘中生长。水稻育苗池覆盖一层保温薄膜(28±2℃),期间保持池内湿度。待培育至 4 叶期,筛选出长势一致的幼苗移栽至华南农业大学生态学系农场温室大棚内水泥池。

1.2 试验方法

1.2.1 水泥池小区试验设计

采用淹水(CF, continuous flood)和干湿交替(IF, interval flood)2 种水分管理模式。淹水模式:试验期间一直保持土壤表面有 2 cm 的水层;干湿交替模式:首先灌水至土壤表面有 2 cm 水层,待自然落干后再次加水至土壤表面保持 2 cm 的水层,如此循环。试验设置 4 个重复,共 16 个水泥池,每个池种植 12 株水稻。试验于 2013 年 9 月至 2014 年 1 月在华南农业大学

表 1 供试土壤的理化性质

Table 1 Physical-chemical properties of the experimental soil

pH 值	有机质 Organic matter/g·kg ⁻¹	全氮 Total N/g·kg ⁻¹	速效磷 Available P/mg·kg ⁻¹	速效钾 Available K/mg·kg ⁻¹	铅 Pb/mg·kg ⁻¹	铬 Cr/mg·kg ⁻¹	镉 Cd/mg·kg ⁻¹
6.70	44.89	1.89	194.9	606.88	38.33	0.045 6	0.60

生态学系农场进行,试验具体处理见表2。

表2 水泥池小区试验设计
Table 2 The design of pool experiment

处理 Treatment	水稻品种 Cultivar	水分管理模式 Water management mode
C-IF	常规稻(Conventional rice,C):黄华占	干湿交替(IF)
C-CF	常规稻(Conventional rice,C):黄华占	淹水(CF)
H-IF	杂交稻(Hybrid rice,H):天优 122	干湿交替(IF)
H-CF	杂交稻(Hybrid rice,H):天优 122	淹水(CF)

1.2.2 样品采集

水稻成熟后,先将水稻根系从土壤中取出,采用“五点取样法”分别采集附着在根系上的土壤(即为根际土壤,Rhizosphere soil,简写RS)与距离根系2 cm外土壤(即为非根际土壤,Bulk soil,简写BS);然后将整株水稻的地上部与地下部(根系)分开,用自来水冲洗干净;最后将采集的土壤样品及水稻植株编号后置于封口袋中带回实验室分析备用。

1.2.3 生物量测定方法

将水稻植株地上部与地下部(根系)依次用自来水、去离子水、超纯水完全洗净,再用吸水纸把水稻植株吸干,自然晾干后称鲜重。然后装入信封中,置于70 °C烘箱中烘干至恒重,称干重。

1.2.4 水泥池小区水稻理论产量分析方法

水稻成熟收获后,记录每个池水稻的穗重、有效穗数、千粒重、每穗粒数。每个水泥池理论产量=(有效穗数×每穗粒数)/1000×千粒重。

1.2.5 土壤中铅、铬、镉含量分析

准确称取0.15 g左右土样风干过筛(0.15 mm)放入聚四氟乙烯消解管中,加入6 mL优级纯HNO₃、2 mL优级纯HF、2 mL分析纯H₂O₂,加盖后放入微波加速反应系统中进行消解。消解程序如下:首先10 min程序升温到120 °C,并保持10 min;然后继续升温至150 °C,保持5 min;最后升温至190 °C,再保持20 min,待降温冷却至室温后取出,用超纯水稀释定容25 mL。并以试剂空白和国家土壤标准物质GBW07407(GSS-7)进行平行质控(Pb、Cd及Cr回收率均在80%以上)。采用火焰原子吸收光谱仪(德国耶拿,型号ZEEnit[®] 700P)测定稀释液中Pb、Cr、Cd浓度,并计算土壤中Pb、Cr、Cd含量。

1.2.6 水稻植株根茎叶及米粒中铅、铬、镉含量分析

将烘干后的水稻植株(根、茎叶)与米粒(晾干后脱壳)粉碎。准确称取水稻植株(根、茎叶)样品0.25 g

或米粒样品0.50 g放入聚四氟乙烯消解管中,加入8 mL优级纯HNO₃、2 mL分析纯H₂O₂。加盖后放入微波加速反应系统中进行消解。消解程序如下:首先10 min程序升温到120 °C,并保持10 min;然后继续升温至150 °C,再保持20 min,同上方法制样上机检测。同时以试剂空白和国家大米标准物质GBW(E)100349进行质量控制(Pb、Cd及Cr回收率均在80%以上)。

采用火焰原子吸收光谱仪(德国耶拿,型号ZEEnit[®] 700P)测定稀释液中Pb、Cr、Cd的浓度,并计算水稻植株及米粒中Pb、Cr、Cd的含量。

计算公式:某重金属元素转运系数=该元素在某一部位(土壤、根、茎叶或米粒)含量/该元素在另一部位含量。如:Pb从非根际土壤转运到根际土壤的转运系数=根际土壤中Pb含量(mg·kg⁻¹)/非根际土壤中Pb含量(mg·kg⁻¹)。

1.3 数据分析

试验结果用Excel 2013进行处理,利用SPSS 17.0中的单因素方差分析(One-way ANOVA)对每个测定项目统计结果进行显著性方差分析,并采用Origin 9.0对试验结果进行作图分析。

2 结果与分析

2.1 水分管理模式对水稻生长的影响

2.1.1 对水稻生物量的影响

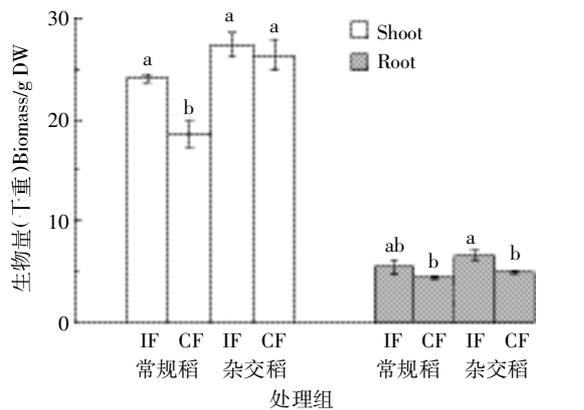
由图1可知,在淹水(CF)或干湿交替(IF)处理下杂交稻(H)地上部和地下部的生物量均高于常规稻(C),且在淹水(CF)条件下杂交稻(H)地上部生物量显著高于常规稻(C)。

而在干湿交替(IF)处理下两种水稻的生物量均明显高于淹水(CF)处理。与淹水(CF)处理相比,干湿交替(IF)处理下杂交稻(H)的地下部生物量与常规稻(C)的地上部生物量分别增加了31.3%和29.5%,且均达显著性差异水平。

2.1.2 对水稻穗部性状的影响

由表3结果可知,在淹水(CF)或干湿交替(IF)处理下常规稻(C)的产量均显著高于杂交稻(H),与生物量的规律相反。

干湿交替(IF)处理下两种水稻的产量均显著高于淹水(CF)处理。在干湿交替(IF)处理下,杂交稻(H)与常规稻(C)的产量分别达6 335.54、8 026.63 kg·hm⁻²,较淹水(CF)处理增加28.6%和18.5%,且均达显著性差异水平。就产量构成因素而言,淹水(CF)及干湿交



IF: 干湿交替处理; CF: 淹水处理。不同小写字母代表处理间差异显著 ($P < 0.05$)。下同

IF and CF represents interval flood and continuous flood, respectively. Different lowercase letters in the same column mean significant difference ($P < 0.05$) among treatments. The same below

图1 不同水分管理模式对水稻地上部和地下部生物量影响
Figure 1 Effect of different water management modes on the biomass (dry weight) of shoot and root of rice

替(IF)处理下水稻的穗重、每穗粒数、千粒重差异不显著,但干湿交替(IF)处理下两种水稻的有效穗数均高于淹水(CF)处理。

2.2 水分管理模式对水稻根际土壤中重金属 Pb、Cr、Cd 含量的影响

分析图 2 非根际土壤(BS)部分可知,淹水(CF)处理下两种水稻非根际土壤中 Pb、Cr 及 Cd 含量均高于干湿交替(IF)处理,其中杂交稻(H)非根际土壤中 Pb、Cd 含量分别较干湿交替(IF)处理高 21.1%和 85.1%;常规稻(C)非根际土壤中 Cr、Cd 含量分别较干湿交替(IF)处理高 15.7%和 40.0%。

分析根际土壤(RS)重金属含量可知(图 2),淹水(CF)及干湿交替(IF)处理下两种水稻根际土壤中 Cr、Cd 含量均差异不显著。但在淹水(CF)处理下,杂

交稻(H)根际土壤中 Pb 含量明显高于干湿交替(IF)处理,而常规稻(C)根际土壤中 Pb 含量却明显低于干湿交替(IF)处理。

2.3 水分管理模式对水稻器官富集重金属 Pb、Cr、Cd 的影响

由表 4 结果可知,在同一水分管理模式下杂交稻(H)与常规稻(C)的根和米粒富集 Pb、Cd 的差异不显著。但在淹水(CF)或干湿交替(IF)处理下,常规稻(C)茎叶与米粒中 Cr 含量均明显高于杂交稻(H)。其中,在干湿交替(IF)处理下常规稻(C)中米粒 Cr 含量显著高于杂交稻(H)。

进一步分析可知,淹水(CF)及干湿交替(IF)处理下两种水稻茎叶中 Pb、Cr 及 Cd 的含量差异不显著。但在干湿交替(IF)处理下,两种水稻的根与米粒中 Pb、Cr、Cd 含量均略高于淹水(CF)处理。其中在干湿交替(IF)处理下,杂交稻(H)与常规稻(C)根中 Cd 含量分别较淹水(CF)处理高 91.9%和 44.0%,均达显著差异水平;米粒中 Cr 含量分别较淹水(CF)处理高 10.3%和 53.5%。

此外,在两种水分管理模式下,杂交稻(H)与常规稻(C)对 Pb、Cd 的富集均呈现根>茎叶>米粒,而杂交稻(H)对 Cr 的富集呈现米粒>根>茎叶。但在淹水(CF)处理下常规稻(C)对 Cr 的富集表现为茎叶>米粒>根,干湿交替(IF)处理下则呈现米粒>茎叶>根。

2.4 水分管理模式对重金属 Pb、Cr、Cd 在土壤-水稻系统中迁移的影响

分析表 5 可知,干湿交替(IF)处理下,Pb、Cr、Cd 从非根际土壤到根际土壤的转运系数明显高于淹水(CF)处理。其中 C-IF 处理组的 Cr 从非根际土壤到根际土壤的转运系数显著高于 C-CF 处理组;H-IF 处理组的 Cd 从非根际土壤到根际土壤的转运系数为 H-CF 处理组的 2 倍多,达显著差异水平。

干湿交替(IF)处理下,Cr 从根际土壤到根的转运

表 3 不同水分管理模式对水稻穗部性状的影响

Table 3 Effect of different water management modes on panicle traits of grain

处理 Treatment	每公顷产量 Grain yield/kg·hm ⁻²	穗重 Panicle weight/g	有效穗数 No. of fertile panicles	每穗粒数 Spikelets per panicle	千粒重 1000-grain weight/g
C-IF	8 026.63±425.28a	209.94±10.31a	68.75±1.31a	131.75±4.27a	22.15±0.41a
C-CF	6 773.47±343.38b	222.26±32.10a	59.50±2.87a	132.25±1.65a	21.58±0.90a
H-IF	6 335.54±387.99b	202.60±5.63a	55.50±4.37b	126.75±4.33a	22.66±0.51a
H-CF	4 926.50±294.51c	193.02±3.89a	43.25±2.78c	127.00±2.35a	22.48±0.83a

注:同列数据后的不同小写字母表示各处理间差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters within a column indicate significant difference between treatments. The same below.

系数明显高于淹水(CF)处理。其中 H-IF 处理组的 Cr 从根际土壤到根的转运系数较 H-CF 处理组高 54.1%,达显著差异水平;而干湿交替(IF)处理下常规稻(C)及杂交稻(H)Cd 从根际土壤到根的转运系数均略高于淹水(CF)处理,但差异不显著。

进一步分析可知,在淹水(CF)或干湿交替(IF)处理下,Cr 从根到茎叶的转运系数常规稻(C)显著高于杂交稻(H),而 Cr 从茎叶到米粒的转运系数则呈相反规律。其中,常规稻(C)Cr 从根到茎叶及杂交稻(H)Cr 从茎叶到米粒的转运系数均大于 10,明显高于

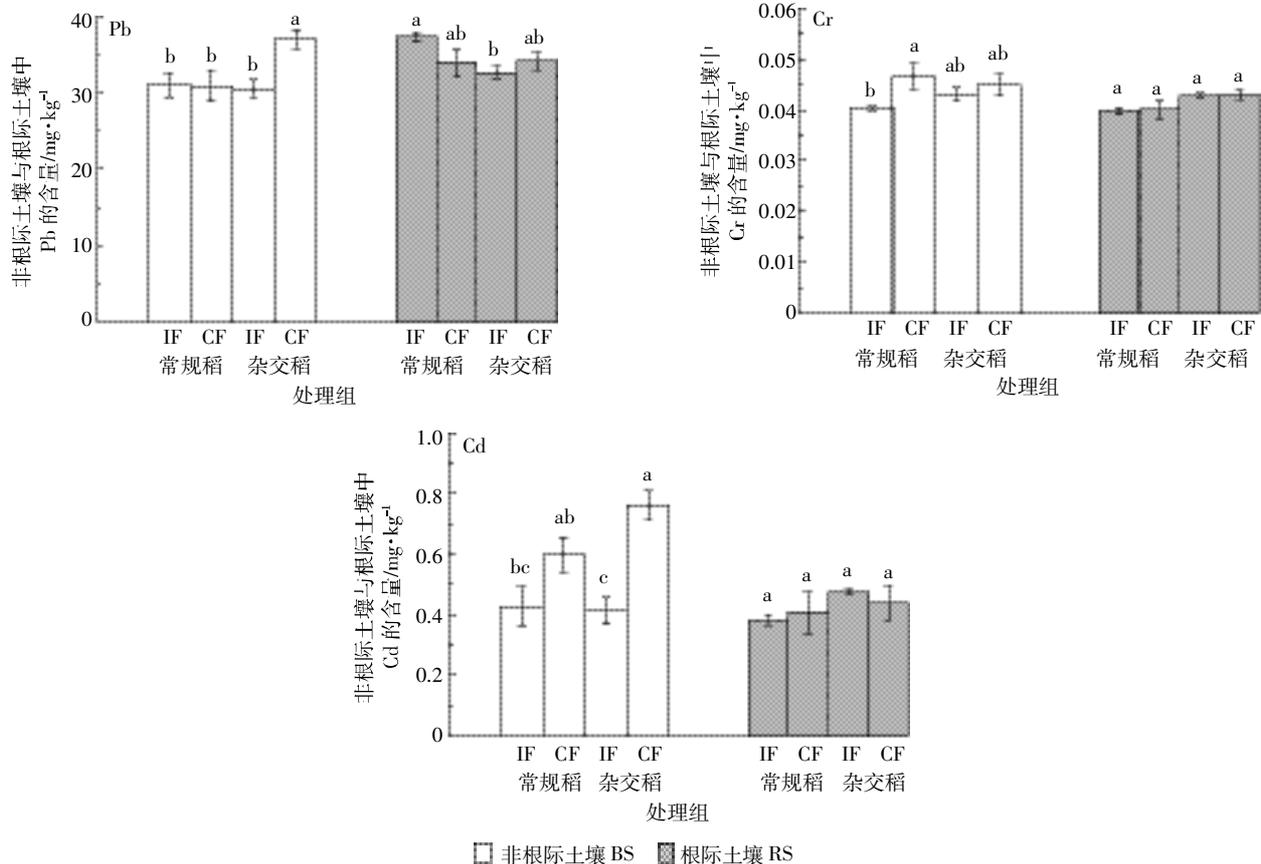


图 2 不同水分管理模式对水稻非根际土壤和根际土壤富集 Pb、Cr 和 Cd 的影响

Figure 2 Effect of different water management modes on concentration of Pb, Cr and Cd in bulk soil and rhizosphere soil

表 4 不同水分管理模式下水稻根、茎叶和谷粒中重金属 Pb、Cr、Cd 的含量差异

Table 4 Concentration of Pb, Cr and Cd in the root, stem and leaf, grain tissues of the rice plants under different water management modes

重金属 Heavy metal	处理 Treatments	根 Roots/mg·kg ⁻¹	茎叶 Stems and leaves/mg·kg ⁻¹	米粒 Grains/mg·kg ⁻¹
Pb	C-IF	4.188 2±0.483 7a	0.003 5±0.000 2b	0.001 2±0.000 1a
	C-CF	4.413 2±0.281 0a	0.003 9±0.000 1b	0.001 0±0.000 0a
	H-IF	5.400 4±0.718 6a	1.407 5±0.114 5a	0.001 1±0.000 0a
	H-CF	3.976 0±0.186 7a	1.427 5±0.122 1a	0.001 1±0.000 1a
Cr	C-IF	0.027 9±0.002 1a	0.329 4±0.031 1a	0.390 6±0.084 7a
	C-CF	0.027 5±0.001 2a	0.385 9±0.024 9a	0.254 5±0.013 9b
	H-IF	0.038 4±0.007 2a	0.013 8±0.000 6b	0.249 4±0.013 0b
	H-CF	0.025 2±0.003 8a	0.011 8±0.000 5b	0.226 2±0.010 7b
Cd	C-IF	0.203 5±0.020 6a	0.035 5±0.004 6a	0.015 7±0.004 7a
	C-CF	0.141 2±0.015 8ab	0.028 5±0.003 1a	0.009 8±0.001 7a
	H-IF	0.197 5±0.030 5a	0.045 1±0.006 0a	0.009 8±0.000 8a
	H-CF	0.102 9±0.011 5b	0.042 0±0.007 3a	0.008 5±0.001 8a

表5 不同水分管理模式下根际土壤和水稻根、茎叶和谷粒的重金属 Pb、Cr、Cd 的转运系数

Table 5 Transfer coefficient of Pb, Cr and Cd in rhizosphere soil, root, stem, leaf and grain tissues of the rice plants under different water management modes

重金属 Heavy metal	处理 Treatments	根际土壤/非根际土壤 RS/BS	根/根际土壤 Roots/RS	茎叶/根 Stems and leaves/Roots	米粒/茎叶 Grains/Stems and leaves
Pb	C-IF	1.212 4±0.076 0a	0.112 96±0.014 56b	0.000 88±0.000 14b	0.355 87±0.019 55a
	C-CF	1.119 4±0.124 3ab	0.132 17±0.014 14ab	0.000 91±0.000 08b	0.263 62±0.013 50b
	H-IF	1.071 0±0.028 8ab	0.164 65±0.020 33a	0.285 43±0.064 37a	0.000 83±0.000 08c
	H-CF	0.922 5±0.021 2b	0.117 09±0.007 23ab	0.359 32±0.028 12a	0.000 77±0.000 09c
Cr	C-IF	0.989 1±0.012 1a	0.699 57±0.047 30ab	12.242 54±2.011 69a	1.212 77±0.247 84b
	C-CF	0.859 8±0.007 7b	0.687 73±0.014 77ab	14.020 32±0.733 28a	0.666 48±0.047 67b
	H-IF	1.000 3±0.025 7a	0.893 10±0.162 95a	0.418 71±0.110 45b	18.071 58±0.543 81a
	H-CF	0.965 7±0.055 8a	0.579 52±0.077 26b	0.515 46±0.108 10b	19.282 12±1.258 79a
Cd	C-IF	0.812 7±0.099 2b	0.430 55±0.112 96a	0.176 71±0.020 64b	0.449 36±0.105 85a
	C-CF	0.768 9±0.099 2b	0.397 16±0.115 56a	0.209 12±0.032 69b	0.376 43±0.116 02a
	H-IF	1.237 7±0.189 5a	0.333 77±0.051 14a	0.247 48±0.058 79ab	0.222 12±0.017 06a
	H-CF	0.592 0±0.098 6b	0.243 31±0.035 22a	0.443 38±0.115 29a	0.198 06±0.008 90a

Pb、Cd 的转运系数。

3 讨论

3.1 不同水分管理模式对水稻生长影响的差异分析

本研究结果表明干湿交替模式能显著提高水稻的地上部和地下部生物量(尤其是地下部生物量)及产量,促进了水稻的生长。其原因在于干湿交替处理能有效改良土壤的氧化还原性和通透性,一方面有利于土壤微生物和水稻根系的生长,进而促进有机质分解和养分的吸收^[13-15],提高水稻的生物量;另一方面土壤微生物能促进水稻分蘖发生^[16],提高了单位面积的有效穗数,从而提高水稻产量。此外,干湿交替还有利于刺激水稻生长,徐芬芬等^[17]研究表明,水稻旱后复水会存在一定的补偿性效应,一定程度的水分亏缺可提高水稻产量。因此,干湿交替模式有利于改善水稻生长的土壤环境,从而促进了水稻的生长。

3.2 不同水分管理模式对土壤-水稻系统中重金属迁移特性的差异分析

本研究结果表明淹水模式下,非根际土壤的 Pb、Cr、Cd 含量明显高于干湿交替模式,且根际土壤的富集系数明显低于淹水模式。这说明淹水模式下土壤中 Pb、Cr、Cd 的迁移能力明显弱于干湿交替模式。其原因在于,一方面淹水模式下氧化还原电位(Eh)和土壤氢离子(H⁺)浓度降低^[18-19],氢氧根(OH⁻)浓度增加,造成有效态 Pb、Cd 形成氢氧化物沉淀,并使大量 Cr(VI)被还原成 Cr(III)并以 Cr(OH)₃ 的形态存在于土壤中^[20-22];同时,H⁺竞争作用减弱,有机结合态、铁锰氧

化物结合态 Pb、Cd、Cr 与其载体结合更牢固,从而显著降低非根际土壤中 Pb、Cd、Cr 的活性^[19,21-22]。然而,干湿交替处理却能够提高水田土壤细菌的数量和细菌的多样性^[15,23-24]。程东祥等^[25]研究表明,土壤微生物结构能反映重金属在土壤中的活性,土壤中非残渣态 Pb、Cd 含量与土壤中细菌的数量呈正相关。因此,干湿交替模式通过提高 Pb、Cr、Cd 在土壤中的活性,增强 Pb、Cr、Cd 从非根际土壤往根际土壤迁移,增加了水稻富集 Pb、Cr、Cd 的风险。

进一步研究发现,干湿交替模式会提高水稻对 Cd 的吸收,并显著提高水稻根系对 Cd 的富集。干湿交替模式下 Cd 在土壤-水稻系统内的迁移能力强于淹水模式,表现为水稻根、茎叶及米粒中 Cd 含量均高于淹水处理,且水稻根部中 Cd 含量显著高于淹水处理。前人研究也表明,淹水模式能显著降低水稻对 Cd 的吸收和米粒对 Cd 的富集^[26-27]。其原因在于淹水模式能使土壤中 Cd 的生物有效性明显降低^[20],从而降低水稻对 Cd 的吸收。也有研究表明,水稻根表铁膜对介质中 Cd 的吸收及其在水稻体内的富集起重要作用^[20,26],而干湿交替能促进一定量的根表铁膜的形成^[28],在一定程度内根表铁膜数量的增加对水稻吸收 Cd 有促进作用^[29]。

此外,Cr 在水稻中的富集特点与 Pb、Cd 有所不同:Pb、Cd 在水稻中的富集为根>茎叶>米粒,而 Cr 在水稻中的富集为米粒/茎叶>根。与 Pb、Cd 相比,Cr 在水稻地上部的迁移能力较强,两种水分管理下水稻茎叶和米粒富集 Cr 的系数均远大于 1。在淹水处理下

常规稻对 Cr 的富集呈现茎叶>米粒,但在干湿交替处理下却呈现米粒>茎叶。可见,干湿交替模式明显促进 Cr 在土壤-水稻系统中的迁移,并显著提高米粒对 Cr 的富集。研究认为水稻对 Cr(VI)的吸收强于 Cr(III)^[30],而干湿交替模式增加了土壤中 Cr(VI)含量、提高了土壤中 Cr 的有效性^[18],从而显著增加水稻对 Cr 的吸收。同时,由于 Cr 往水稻地上部迁移的能力较强,干湿交替模式提高了 Cr 往水稻地上部迁移及米粒中 Cr 的浓度。

4 结论

不同水分管管理模式对水稻生长及重金属 Pb、Cr、Cd 在土壤-水稻系统中的迁移作用影响显著。干湿交替模式显著提高水稻的生物量及产量,促进水稻的生长,但却增强了重金属 Pb、Cr、Cd 在土壤-水稻系统的迁移能力,同时促进了水稻根系对 Cd 的富集,并显著提高米粒中 Cr 的含量。进一步研究发现,干湿交替模式下重金属 Cr 往水稻地上部迁移能力较强,其富集在茎叶、米粒中浓度均明显高于同组织下的 Pb、Cd。因此,在采取相应水分管管理模式降低重金属生物有效性时应充分考虑水稻对不同重金属类型的响应差异,才能更有效地控制当前农田环境的重金属污染。

参考文献:

- [1] 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.
Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. Soil pollution condition communique[J]. *China Environmental Protection Industry*, 2014, 5:10-11.
- [2] Jiang Y X, Chao S H, Liu J W, et al. Source apportionment and health risk assessment of heavy metals in soil for a township in Jiangsu Province, China[J]. *Chemosphere*, 2017, 16:1658-1668.
- [3] Xue S G, Shi L Z, Wu C, et al. Cadmium, lead, and arsenic contamination in paddy soils of a mining area and their exposure effects on human HEPG2 and keratinocyte cell-lines[J]. *Environmental Research*, 2017, 156:23-30.
- [4] 尚二萍,张红旗,杨小唤,等. 我国南方四省集中连片水稻田土壤重金属污染评估研究[J]. 环境科学学报, 2017, 37(4):1469-1478.
SHANG Er-ping, ZHANG Hong-qi, YANG Xiao-huan, et al. Assessment of soil heavy metal of paddy field in four provinces in southern China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2017, 37(4):1469-1478.
- [5] 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):1026-1036.
CHU Guang, ZHAN Ming-fei, ZHU Kuan-yu, et al. Effects of alternate wetting and drying irrigation on yield and water use efficiency of rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2016, 42(7):1026-1036.
- [6] 周峥嵘,傅志强. 不同水分管管理方式对水稻生长及产量的影响[J]. 作物研究, 2012, 26(b11):5-8.
ZHOU Zheng-rong, FU Zhi-qiang. Effect of different water managements on the growth and grain yield of rice[J]. *Crop Research*, 2012, 26(b11):5-8.
- [7] 张慎凤. 干湿交替灌溉对水稻生长发育、产量与品质的影响[D]. 扬州:扬州大学, 2009.
ZHANG Shen-feng. Effect of alternate wetting and drying on the growth and development, grain yield and quality of rice[D]. Yangzhou: Yangzhou University, 2009.
- [8] 龙水波,曾敏,周航,等. 不同水分管管理模式对水稻吸收土壤砷的影响[J]. 环境科学学报, 2014, 34(4):1003-1008.
LONG Shui-bo, ZENG Min, ZHOU Hang, et al. Effects of different water management modes on soil arsenic uptake by rice plants[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, 34(4):1003-1008.
- [9] Spanu A, Daga L, Orlandoni A M, et al. The role of irrigation techniques in arsenic bioaccumulation in rice (*Oryza sativa* L.)[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(15):8333-8340.
- [10] 李剑睿,徐应明,林大松,等. 水分调控和钝化剂处理对水稻土镉的钝化效应及其机理[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(7):1316-1321.
LI Jian-rui, XU Ying-ming, LIN Da-song, et al. Immobilization of cadmium in a paddy soil using moisture management and amendments[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(7):1316-1321.
- [11] Hu P, Huang J, Ouyang Y, et al. Water management affects arsenic and cadmium accumulation in different rice cultivars[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2013, 35(6):767-778.
- [12] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京:中国农业出版社, 2000:106.
BAO Shi-dan. Soil agriculture chemistry analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000:106.
- [13] 张静,刘娟,陈浩,等. 干湿交替条件下稻田土壤氧气和水分变化规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2014, 22(4):408-413.
ZHANG Jing, LIU Juan, CHEN Hao, et al. Change in soil oxygen and water contents under alternate wetting and drying in paddy fields[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2014, 22(4):408-413.
- [14] 王婷婷,祝贞科,朱捍华,等. 施氮和水分管管理对光合碳在土壤-水稻系统间分配的量化研究[J]. 环境科学, 2017, 38(3):1227-1234.
WANG Ting-ting, ZHU Zhen-ke, ZHU Han-hua, et al. Input and distribution of photosynthesized carbon in soil-rice system affected by water management and nitrogen fertilization[J]. *Environmental Science*, 2017, 38(3):1227-1234.
- [15] 侯海军,张文钊,沈建林,等. 水分管管理对稻田细菌丰度与群落结构的影响[J]. 生态环境学报, 2016, 25(9):1431-1438.
HOU Hai-jun, ZHANG Wen-zhao, SHEN Jian-lin, et al. Effect of water management on soil bacterial abundance and community in the rice paddy field[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2016, 25(9):1431-1438.
- [16] Ikenaga M, Asakawa S, Muraoka Y, et al. Bacterial communities associated with nodal roots of rice plants along with the growth stages: Estimation by PCR-DGGE and sequence analyses[J]. *Soil Science and*

- Plant Nutrition*, 2003, 49(4):591-602.
- [17] 徐芬芬, 曾晓春, 石庆华, 等. 干湿交替灌溉方式下水稻节水增产机理研究[J]. 杂交水稻, 2009, 24(3):72-75.
XU Fen-fen, ZENG Xiao-chun, SHI Qing-hua, et al. Studies of yield-increasing effects of intermittent irrigation and its physiological mechanism in rice[J]. *Hybrid Rice*, 2009, 24(3):72-75.
- [18] 狄广娟. 水分管理对四个水芹品种吸收积累镉的影响[D]. 南京: 南京林业大学, 2013.
DI Guang-juan. The influence of water management on growth and cadmium uptake of water dropwort[D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2013.
- [19] 肖文丹. 典型土壤中铬迁移转化规律和污染诊断指标[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
XIAO Wen-dan. Transformation and movement characterization and diagnostic index of chromium pollution in representative Chinese soils [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [20] 纪雄辉, 梁永超, 鲁艳红, 等. 污染稻田水分管理对水稻吸收积累镉的影响及其作用机理[J]. 生态学报, 2007, 27(9):3930-3939.
JI Xiong-hui, LIANG Yong-chao, LU Yan-hong, et al. The effect of water management on the mechanism and rate of uptake and accumulation of cadmium by rice growing in polluted paddy soil[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(9):3930-3939.
- [21] 王凯荣, 张玉焯, 胡荣桂. 不同土壤改良剂对降低重金属污染土壤上水稻糙米铅镉含量的作用[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(2):476-481.
WANG Kai-rong, ZHANG Yu-zhu, HU Rong-gui. Effects of different types of soil amelioration materials on reducing concentrations of Pb and Cd in brown rice in heavy metal polluted paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(2):476-481.
- [22] 刘雪, 王兴润, 张增强. pH和有机质对铬渣污染土壤中Cr赋存形态的影响[J]. 环境工程学报, 2010(6):1436-1440.
LIU Xue, WANG Xing-run, ZHANG Zeng-qiang. Potential influences of pH and organic matter on the occurrence forms of chromium in chromium-contaminated soils[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2010(6):1436-1440.
- [23] Bastida F, Torres I F, Romero T C, et al. Combined effects of reduced irrigation and water quality on the soil microbial community of a citrus orchard under semi-arid conditions[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2016, 104:226-237.
- [24] Somenahally A C, Hollister E B, Wen G Y, et al. Water management impacts on arsenic speciation and iron-reducing bacteria in contrasting rice-rhizosphere compartments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19):8328-8335.
- [25] 程东祥, 张玉川, 马小凡, 等. 长春市土壤重金属化学形态与土壤微生物群落结构的关系[J]. 生态环境学报, 2009, 18(4):1279-1285.
CHENG Dong-xiang, ZHANG Yu-chuan, MA Xiao-fan, et al. Relationship between chemical forms of some heavy metals and the microbial community structure in soil in Changchun urban[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(4):1279-1285.
- [26] 李鹏. 水分管理对不同积累特性水稻镉吸收转运的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2011.
LI Peng. Effects of different water management methods on cadmium uptake and translocation by rice with different grain accumulation characteristics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2011.
- [27] Sun L, Zheng M, Liu H, et al. Water management practices affect arsenic and cadmium accumulation in rice grains[J]. *Scientific World Journal*. doi.org/10.1155/2014/596438.
- [28] 傅友强, 于晓莉, 杨旭健, 等. 干湿交替诱导水稻根表铁膜形成的基因表达谱分析[J]. 中国水稻科学, 2017, 31(2):133-148.
FU You-qiang, YU Xiao-li, YANG Xu-jian, et al. Gene expression profile analysis for alternate wetting and drying induced formation of iron plaque on root surface of rice seedlings[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2017, 31(2):133-148.
- [29] 刘文菊, 张西科, 张福锁. 根表铁氧化物和缺铁根分泌物对水稻吸收镉的影响[J]. 土壤学报, 1999, 36(4):463-469.
LIU Wen-ju, ZHANG Xi-ke, ZHANG Fu-suo. Effects of iron oxides and root exudates on cadmium uptake by rice[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1999, 36(4):463-469.
- [30] Chen Y X, Zhu Z X, He Z Y. Mechanisms of chromium transformations in soils and its effect on rice growth[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1994, 20(1):1-7.