

不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响

易镇邪, 苏雨婷, 谷子寒, 王元元, 屠乃美, 周文新

(湖南农业大学农学院, 南方粮油作物协同创新中心, 长沙 410128)

摘要: 为给镉污染稻区水稻合理灌溉提供理论与技术参考, 通过盆栽试验研究了不同生育阶段间歇灌溉对双季稻产量构成与镉累积的影响。结果表明: (1) 2季水稻总产以全生育期淹水灌溉处理最高, 其次是全生育期间歇灌溉与齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理, 孕穗至齐穗期间歇灌溉处理产量显著降低; 全生育期淹水灌溉处理有利于提高结实率, 而全生育期间歇灌溉与分蘖至孕穗期间歇灌溉处理有利于提高有效穗数。 (2) 灌水方式显著影响水稻各器官成熟期镉含量, 其中全生育期间歇灌溉有显著提高效果, 而全生育期淹水灌溉有降低效应。孕穗至齐穗、齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理早、晚稻籽粒镉含量显著低于其他生育阶段间歇灌溉处理。 (3) 地上部镉累积量以全生育期淹水灌溉处理最低, 全生育期间歇灌溉处理最高; 各间歇灌溉处理中, 孕穗至齐穗、齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理地上部镉累积量相对较低。综上所述, 为确保双季稻产量、降低稻米镉含量, 镉污染稻区最佳灌溉方式为全生育期淹水灌溉, 在水资源较紧张的情况下, 齐穗至灌浆中期可采取间歇灌溉方式。

关键词: 双季稻; 淹水灌溉; 间歇灌溉; 产量构成; 镉积累

中图分类号: S275.8

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)05-0364-05

DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2019.05.053

Effects of Intermittent Irrigation at Different Growth Stages on Yield Components and Cadmium Accumulation of Double-cropping Rice in Cd-contaminated Paddy Field

YI Zhenxie, SU Yuting, GU Zihan, WANG Yuanyuan, TU Naimei, ZHOU Wenxin

(South Regional Collaborative Innovation Center for Grain and Oil Crops in China, College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128)

Abstract: To provide the theoretical and technical references for rational irrigation of rice in cadmium (Cd) polluted rice area, effects of intermittent irrigation at different growth stages on yield component and Cd accumulation of double-cropping rice were studied by pot experiment. The results showed that: (1) The total yield of double-cropping rice in the treatment of flooded irrigation in whole growth duration (FWD) was the highest, and that of treatment of intermittent irrigation in whole growth duration (IWD) and intermittent irrigation at full heading to mid-filling stage (IHM) followed, and that of treatment of intermittent irrigation at booting to full heading stage (IBH) decreased significantly. FWD was beneficial to increase the seed setting rate, while IWD and treatment of intermittent irrigation at tillering to booting stage (ITB) was beneficial to increase effective panicles number. (2) Irrigation modes significantly affected the Cd content in all rice organs at maturity stage, in which IWD had a significant improvement effect, while FWD had a decrease effect. Cd content in grains of early and late rice treated with IBH and IHM was significantly lower than that of treatment of intermittent irrigation at others stages. (3) As for the Cd accumulation of aboveground of rice in the whole growth duration, FWD was the lowest, and IWD was the highest. In all treatments of intermittent irrigation, Cd accumulation in aboveground of rice was relatively lower in treatments of IBH and IHM. In conclusion, in order to ensure the yield of double-cropping rice and reduce the Cd content in rice grains, FWD was the best irrigation mode in Cd polluted rice area, while IHM was the optimal irrigation mode under condition of water resource shortage.

Keywords: double-cropping rice; flooded irrigation; intermittent irrigation; yield component; cadmium accumulation

水稻是我国最重要的粮食作物之一^[1]。但随着我国工业化与社会经济的发展,重金属污染(特别是镉污染)问题日益严重,对水稻的安全生产极为不利^[2-3]。水稻镉污染已成为一个备受社会关注的严峻问题。

前人就水稻镉污染防控开展了大量研究,其中有关水分管理对水稻镉累积的影响研究越来越多。纪雄辉等^[4]通过盆栽试验发现,水分管理对水稻镉积累影响显著,长期淹水处理水稻根、茎、叶、糙米 Cd 含量均极显著低于湿润灌溉处理,2 种不同土壤长期淹水的糙米平均 Cd 含量比间歇灌溉的下降 41.3%,比湿润灌溉的下降 70.7% ($p < 0.01$)。刘昭兵等^[5]在 Cd 污染红黄泥和潮泥田上开展试验,比较全生育期淹水(WF)、分蘖期晒田(TP)、乳熟期晒田(MP)、分蘖—乳熟期 2 次晒田(TMP)、湿润灌溉(WI)等处理的水稻产量与糙米镉含量,发现产量以全生育期淹水处理较高;糙米 Cd 含量顺序为 $WF < MP < TP < WI < TMP$,说明全生育期淹水处理是在保证产量的前提下降低 Cd 污染稻田水稻吸收累积 Cd 最行之有效的措施之一。陈喆等^[6]研究了水分管理对稻米镉污染阻控效果,发现全生育期淹水管理对籽粒的降 Cd 效果最佳。

可见,全生育期淹水管理对水稻的控镉效果已得到大家公认。但是,我国水资源十分紧张,水稻生产面临用水紧张的形势;同时,很多地方农田水利设施老化,要做到稻田长期淹水是有困难的。研发既能保证较高水稻产量,又能降低稻谷镉含量,还能节约灌溉用水的灌溉技术,是非常必要的。本研究以盆栽试验方式在湖南湘潭县开展了不同生育阶段间歇灌溉对镉污染稻田双季稻产量构成与镉累积的影响,以期对镉污染稻区水稻合理灌溉提供理论与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验设计

盆栽试验地点为湖南省湘潭县易俗河镇镉污染大田,盆栽场上方搭建透明防雨大棚,水稻干物质积累测定、产量构成因素考察与植株镉含量测定在湖南农业大学作物生理与分子生物学教育部重点实验室进行。

早稻品种为“陵两优 211”,2016 年 3 月 24 日播种,4 月 24 日移栽。晚稻品种“威优 46”,2016 年 6 月 12 日播种,7 月 11 日移栽。供试塑料盆上内径 32 cm,下内径 24 cm,深度 25 cm;供试土壤取自当地水稻田 0—20 cm 土壤(多点取样),取回摊开风干,干燥后捶碎、过 3 mm 筛,混匀后装土,每盆装 11 kg,之后使用当地灌溉水将之泡湿 30 天以上。供试土壤 pH 为 6.06,全 Cd 和有效态 Cd 含量分别为 1.232 7,0.490 0 mg/kg。

水分处理从水稻拔节初期(分蘖末期)开始,之前各处理均保持淹水状态。6 个处理为:

处理 1:全生育期淹水灌溉(10 cm);

处理 2:全生育期间歇灌溉,即灌溉—自然落干—再灌溉;

处理 3:拔节孕穗期间(分蘖末期至 80% 剑叶全展)为间歇灌溉,从孕穗期(80% 剑叶全展)至成熟为淹水灌溉;

处理 4:从孕穗期(80% 剑叶全展)至齐穗期(80% 抽穗)为间歇灌溉,其余生育阶段淹水灌溉;

处理 5:从齐穗期至灌浆中期(早稻齐穗后 12 天,晚稻齐穗后 15 天)为间歇灌溉,其余生育阶段淹水灌溉;

处理 6:从灌浆中期至成熟期为间歇灌溉,其余生育阶段为淹水灌溉。

处理 1 至处理 6 分别记为 S1、S2、S3、S4、S5 与 S6。每个处理 10 盆,共 60 盆。每盆种植水稻 3 穴,每穴 3 株秧苗。各盆施氮肥一致(尿素 4 g),按蘖肥:穗肥:粒肥为 5:2:1 施用。其他管理措施与常规水稻栽培管理措施一致。

1.2 测定项目与方法

生育时期:观察记录水稻分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆中期、成熟期等生育时期的具体日期。

干物重:于分蘖盛期、孕穗期、齐穗期、灌浆中期、成熟期取水稻植株样,每时期取样 1 盆,将植株洗净,然后用 0.1 mol/L 盐酸浸泡根系 15 min,去掉根表面吸附的镉,用自来水冲洗 3 遍,再用去离子水冲洗 3 遍,吸干表面水分后,将各处理植株分为根、茎、叶、穗等部分,放入烘箱 105 °C 杀青 0.5 h,80 °C 烘干至恒重后称重。

产量构成因素:成熟期 5 盆水稻均用于测定水稻产量构成因素,包括有效穗数、每穗总粒数、每穗实粒数、结实率、千粒重,计算单穴产量。

根、茎、叶、穗、谷镉含量:用不锈钢植物样品粉碎机粉碎成熟期干物重考察的根、茎、叶、穗(进一步分为枝梗、空粒、实粒)样品,过 100 目筛备用。样品经硝酸—高氯酸高温消解,使用石墨炉原子吸收光谱仪测定消化液中镉含量^[7]。每个处理重复 3 次。

稻谷各部分镉含量:成熟期留存部分稻谷,储存 3 个月后采用小型糙米机将稻谷分为糙米与谷壳,收集所有谷壳,烘干、称重后粉碎装袋并留样;继续使用小型精米机将一定量的糙米碾成精米,收集所有精米与糠层,烘干、称重后粉碎装袋并留样。各样品用硝酸—高氯酸高温消解方法,使用石墨炉原子吸收光谱仪测定消化液中镉含量^[7]。

1.3 数据处理

试验数据均采用 Excel 2013 和 SPSS 22.0 统计软件进行分析。

2 结果与分析

2.1 灌溉方式对水稻产量及产量构成的影响

由表 1 可知,早稻单穴产量表现 $S1>S2>S5>S6>S3>S4$,其中 S1 与 S3、S4 差异显著,比 S3、S4 分别高出 10.72%,12.61%。有效穗数以处理 S2 最高,与除 S3 外的其他处理差异显著;处理间每穗粒数、千粒重差异不显著;结实率以 S1 最高,显著高于 S3 和 S4。晚稻各处理产量从高到低依次为 $S2>S1>S5>S3>S6>S4$,其中 S1、S2、S3、S5、S6 与 S4 差异显著。有效穗数以处理 S2 和 S3 较高,二者显著高于其他处理;每穗粒数以处理 S5 最高,S3 最低;S1 和 S3 结实率较高,显著高于 S2 和 S4;千粒重以处理 S6 最高,显著高于处理 S1、S2。

从 2 季总产来看,各处理表现 $S1>S2>S5>S3>S6>S4$ 。可见,灌水方式对双季稻产量及构成因素有显著影响,全生育期淹水灌溉处理产量最高,全生育期间歇灌溉与齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理居其次,而孕穗至齐穗间歇灌溉处理对高产最为不利。

表 1 灌溉方式对水稻产量及产量构成因素的影响

季别	处理	有效穗数/ (穗·穴 ⁻¹)	每穗粒数/ (粒·穗 ⁻¹)	结实率/ %	千粒重/ g	产量/ (g·穴 ⁻¹)
早稻	S1	10.22c	87a	57.75a	26.75a	13.22a
	S2	11.00a	89a	50.50bc	26.58a	12.99ab
	S3	10.78ab	86a	48.79c	26.41a	11.94bc
	S4	10.33bc	91a	47.86c	26.32a	11.74c
	S5	10.11c	92a	50.77bc	26.82a	12.62abc
	S6	10.33bc	88a	50.83bc	26.54a	12.18abc
晚稻	S1	9.78bc	121ab	80.40a	26.97b	25.49a
	S2	10.89a	117bc	74.06c	27.08b	25.57a
	S3	10.67a	111c	78.53ab	27.38ab	25.42a
	S4	10.00b	114bc	73.67c	27.41ab	23.04b
	S5	9.78bc	126a	76.13bc	27.23ab	25.43a
	S6	10.11b	116bc	76.62bc	27.73a	24.88a

注:不同小写字母表示早稻或晚稻同列数据差异显著($p<0.05$)。下同。

2.2 灌溉方式对水稻成熟期营养器官镉含量的影响

由表 2 可知,早稻茎镉含量以处理 S2 最高,显著高于其他处理,其他处理间差异不显著;早稻叶镉含量也以 S2 最高,S1 其次、S6 最低。晚稻根镉含量以处理 S2 最高,显著高于其他处理,其次是 S5,S1 最低,S3、S4 和 S6 处理间无显著差异;茎镉含量以处理 S2 最高,S3 和 S6 次之,S4 和 S5 再次,S1 最低;叶镉含量以 S6 和 S2 较高,显著高于其他处理,S1 最低,显著低于其他处

理。可见,灌水方式对水稻营养器官成熟期镉含量具有显著影响,全生育期间歇灌溉使水稻营养器官镉含量显著提高,而全生育期淹水灌溉有降低水稻营养器官镉含量的趋势,尤其晚稻表现明显。

表 2 灌溉方式对水稻营养器官镉含量的影响

		单位:mg/kg					
季别	器官	S1	S2	S3	S4	S5	S6
早稻	根	—	—	—	—	—	—
	茎	0.58b	1.74a	0.45c	0.45c	0.50bc	0.45c
	叶	0.38ab	0.42a	0.33bc	0.31c	0.34bc	0.29c
晚稻	根	1.69d	9.58a	4.68c	4.41c	7.41b	4.58c
	茎	0.61d	3.38a	3.22b	1.70c	1.31c	3.08b
	叶	1.04c	2.67a	2.04b	1.74b	1.80b	2.88a

注:—表示未检测。下同。

2.3 灌溉方式对水稻穗与籽粒各部位镉含量的影响

由表 3 可知,早稻穗及籽粒各部位镉含量一般表现为枝梗>糠层>谷壳>空粒>精米。各处理精米镉含量均未超出国家标准(0.2 mg/kg)^[8]。处理 S2 稻穗及籽粒各部位镉含量均显著高于其他处理。晚稻穗及籽粒各部位镉含量以枝梗最高,其次是空粒和糠层,精米最低。各处理糙米镉含量均超出了国家标准^[8]。处理 S1 稻穗及籽粒各部位镉含量均显著低于其他处理;S2、S4 和 S5 枝梗、空粒镉含量较高,但糙米和精米镉含量较低,说明 S2、S4 和 S5 处理下,镉在枝梗—精米间的迁移能力较小。

综合早晚稻来看,全生育期间歇灌溉使水稻稻穗与籽粒各部位镉含量提高,全生育期淹水灌溉可显著降低稻穗与籽粒各部位镉含量;各间歇灌溉处理中,孕穗至齐穗、齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理早、晚稻籽粒镉含量显著低于其他生育阶段间歇灌溉处理。

2.4 灌溉方式对水稻成熟期植株各部位镉累积量的影响

由表 4 可知,早晚稻地上部镉累积量主要来源于茎,其贡献率为 28.70%~63.43%(均值 48.17%),其次来源于叶。早稻地上部镉累积量以 S2 最大,显著高于其他处理,S4、S5 与 S6 较低,整体表现出 $S2>S1>S3>S4>S6>S5$ 的趋势。茎、空粒、谷壳、糠层、精米镉累积量均以处理 S2 最高,显著高于其他处理,S1、S4、S5、S6 较低。晚稻地上部镉累积量处理间表现 $S2>S6>S3>S4>S5>S1$,其茎、叶、糙米镉累积量表现出大致相同的趋势。处理 S1 成熟期各器官(部位)的镉累积量均显著低于其他各处理。可见,全生育期淹水灌溉可大幅度降低水稻地上部镉累积量,不同生育阶段间歇灌溉处理间水稻地上部镉累积量也有显著差异,其中以全生育期间歇灌溉处理最高,孕穗至齐穗、齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理较低。

3 讨论

3.1 灌溉方式对水稻产量及产量构成的影响

关于灌溉方式对水稻产量及产量构成的影响,已有研究^[9-12]表明,与水稻全生育期淹水处理相比,水稻生长中后期干湿交替灌溉有利于提高产量,其原因在于干湿交替灌溉改善了根系与地上部植株的生理功能,从而提高了有效穗数、结实率、每穗粒数和千粒重。但也有研究结果与此不同,纪雄辉等^[4]、苏雨婷等^[13]认为全生育期淹水灌溉处理产量高于间歇灌溉处理。本研究通过盆栽试验研究了不同生育阶段间歇灌溉对早、晚稻的产量构成的影响,发现灌溉方式对双季稻产量有显著影响,全生育期淹水灌溉处理产量最高,其次是全生育期间歇灌溉与齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理,而孕穗至齐穗期间歇灌溉处理产量最低。可见,关于淹水灌溉对水稻产量影响的结果尚不

一致,原因可能与供试土壤特性、天气条件和品种特性不同有关,对此还有待深入分析和研究。

表 3 灌溉方式对水稻成熟期穗及籽粒各部位镉含量的影响

单位:mg/kg							
季别	处理	枝梗	空粒	谷壳	糙米	糠层	精米
早稻	S1	0.22b	0.09b	0.11c	—	0.13b	0.03c
	S2	0.75a	0.32a	0.28a	—	0.33a	0.10a
	S3	0.24b	0.08bc	0.15b	—	0.11b	0.07b
	S4	0.18b	0.09b	0.14b	—	0.11b	0.03c
	S5	0.22b	0.06c	0.09c	—	0.10b	0.02c
	S6	0.23b	0.05c	0.07c	—	0.11b	0.02c
晚稻	S1	0.57d	0.66f	0.21d	0.22d	0.36d	0.15d
	S2	4.05a	2.39c	0.69a	0.54b	0.98a	0.44b
	S3	1.86c	1.35e	0.57b	0.78a	0.95a	0.56a
	S4	3.63b	2.83a	0.49b	0.38c	0.62c	0.31c
	S5	3.62b	2.61b	0.36c	0.48bc	0.62c	0.28c
	S6	1.94c	1.90d	0.53b	0.70a	0.84b	0.58a

表 4 灌溉方式对水稻成熟期植株各部位镉累积量的影响

季别	处理	茎	叶	枝梗	空粒	谷壳	糠层	精米	糙米	地上部
早稻	S1	9.17b	4.52a	0.44b	0.76c	0.81bc	0.30b	0.82c	—	16.82b
	S2	24.86a	4.12ab	1.46a	3.31a	2.26a	0.83a	2.35a	—	39.19a
	S3	7.32b	3.99b	0.42b	0.57d	1.04b	0.27bc	1.47b	—	15.08b
	S4	6.68b	3.28c	0.37b	0.89b	1.07b	0.19c	0.66d	—	13.14c
	S5	6.97b	3.31c	0.45b	0.63d	0.67c	0.25bc	0.51e	—	12.79c
	S6	7.48b	3.43c	0.46b	0.30e	0.55c	0.21c	0.51e	—	12.94c
晚稻	S1	21.83c	24.32d	2.08d	2.22d	2.75d	—	—	11.75d	64.95c
	S2	106.68a	60.29ab	15.77a	19.32a	9.11a	—	—	28.66b	239.83a
	S3	98.65a	50.82b	6.78c	8.05c	7.26b	—	—	41.54a	213.10a
	S4	46.81b	39.11c	12.29a	21.02a	5.64c	—	—	18.35c	143.22b
	S5	40.87bc	41.95c	12.46a	17.15a	4.64c	—	—	25.33b	142.40b
	S6	93.57a	66.14a	8.56b	11.43b	7.05b	—	—	35.91a	222.66a

本试验发现,全生育期淹水灌溉处理水稻结实率显著高于其他各处理,全生育期间歇灌溉与分蘖盛期至孕穗期间歇灌溉处理明显增加了水稻有效穗数,这可能是其产量较高的原因。本研究还发现,早稻各处理间千粒重差异不明显,晚稻生育中后期间歇灌溉处理的千粒重略高,与前人^[9-10]研究结果一致。

综上所述,有关灌溉方式对水稻产量及产量构成因素的影响,目前还存在不同意见,这可能与试验品种、土壤条件以及天气条件有关,对此各地应因地制宜开展研究,以筛选出适宜的灌溉方式。

3.2 灌溉方式对水稻植株镉含量的影响

关于灌溉方式对稻米镉含量的影响,大量研究^[4-6,14-15]认为,淹水可以显著降低水稻糙米镉含量。Kashem 等^[16]也发现,淹水较不淹水处理显著降低水稻对镉的吸收。张丽娜等^[11]通过盆栽试验发现,全生育期淹水处理水稻糙米镉含量最低。胡坤^[17]、纪雄辉等^[4]研究表明,长期淹水灌溉处理稻米镉含量较

湿润灌溉处理显著降低。以上结果与本研究结果相似。可见全生育期淹水灌溉处理能降低稻米镉含量已成为共识。

从节约水资源的角度出发,本研究比较了不同生育阶段间歇灌溉处理对稻米镉含量的影响,发现不同生育阶段间歇灌溉处理间稻米镉含量差异显著,以孕穗至齐穗间歇灌溉和齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理糙米与精米镉含量较低,说明在水稻孕穗至灌浆中期进行间歇灌溉处理(其他生育时期淹水),有利于降低稻米镉含量。黄冬芬等^[18]研究表明,水稻抽穗后 7 天至成熟期轻干—湿交替灌溉可以增加产量,并可不增加甚至降低籽粒镉含量,与本研究结果相似。但也有研究^[19]认为,水稻孕穗期至灌浆前期淹水处理能有效降低稻米镉含量,与本研究结果不一致。

关于不同灌溉方式影响水稻镉吸收的原因,纪雄辉等^[4]、胡坤^[17]认为,水稻全生育期淹水状态可降低污染土壤中镉的活性,能使还原过程产生的 S²⁻ 与

Cd²⁺ 结合,形成 CdS 沉淀,减少水稻植株对重金属镉的吸收,继而控制镉在土壤—植物间的迁移;刘建国^[20]认为,水稻植株蒸腾强度与镉含量呈显著正相关关系;土壤落干期叶片气孔导度显著下降,从而导致蒸腾强度降低^[21-22],而蒸腾强度降低,减少了镉向地上部的运输,也在一定程度上抑制了根对镉的吸收,两者的综合结果使镉在根部累积,而地上部器官特别是茎叶的镉累积相对减少。但是,本研究发现,全生育期间歇灌溉使水稻营养器官镉含量显著提高,而全生育期淹水灌溉有降低水稻营养器官镉含量的趋势,尤其晚稻表现明显。同时,本试验中,晚稻成熟期根系镉含量以齐穗至灌浆中期间歇灌溉处理较高,而茎叶中的镉含量相对较低,似乎印证了前人^[20]研究结果。但本研究没有测定不同灌溉方式下的水稻蒸腾速率,因而无法验证前人结果,对此还有待进一步研究。

籽粒镉主要来自 2 个方面:一是根系从土壤中吸收的镉;二是累积在茎叶中的镉。枝梗向籽粒运输镉的多少同样关系到稻米镉含量的高低。本试验中,全生育期间歇灌溉、孕穗—齐穗间歇灌溉与齐穗—灌浆中期间歇灌溉处理的晚稻枝梗镉含量较高,但糙米与精米镉含量较低,说明这 3 个处理稻米镉含量较低是镉在枝梗—精米间的迁移能力较低所致。对此也有待进一步研究证实。

4 结 论

为确保水稻产量并降低稻米镉含量,镉污染稻区水稻宜采用全生育期淹水灌溉方式,但在水资源较紧张的情况下,可在齐穗至灌浆中期采取间歇灌溉方式。

参考文献:

[1] 唐绍清.稻米蒸煮和营养品质性状的 QTL 定位[D].杭州:浙江大学,2007.

[2] 赵雄,李福燕,张冬明,等.水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究[J].农业环境科学学报,2009,28(11):2236-2240.

[3] 肖相芬,张经廷,周丽丽,等.中国水稻重金属镉与铅污染 GAP 栽培控制关键点分析[J].中国农学通报,2009,25(21):130-136.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 陈喆,张森,叶长城,等.富硅肥料和水分管理对稻米镉污染阻控效果研究[J].环境科学学报,2015,35(12):4003-4011.

[7] 罗惠莉,王宇霖,周思,等.生物炭基调理剂对水稻镉吸收的影响[J].环境工程学报,2018,12(4):1190-1197.

[8] 中华人民共和国国家卫生和计划生育委员会,国家食品药品监督管理总局.GB 2762—2017 食品安全国家标准—食品中污染物限量[S].北京:中国标准出版社,2017.

[9] 许振柱,于振文,张永丽,等.灌溉条件对小麦籽粒蛋白质组积分累及其品质的影响[J].作物学报,2003,29(5):682-687.

[10] 付景,刘洁,杨建昌,等.结实期干湿交替灌溉对 2 个超级稻品种结实率和粒重的影响[J].作物学报,2014,40(6):1056-1065.

[11] 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):49-52.

[12] 邵玺文,刘红丹,杜震宇,等.不同时期水分处理对水稻生长及产量的影响[J].水土保持学报,2007,21(1):193-196.

[13] 苏雨婷,赵英杰,谷子寒,等.灌溉方式对土壤有效镉含量与双季稻产量形成及镉累积分配的影响[J].作物研究,2018,32(3):180-187.

[14] Takijima Y, Katsumi F, Takerawak K. Cadmium contamination of soils and rice. Plants caused by zinc mining[J].Soil Science and Plant Nutrition,1973,19:173-182.

[15] Imura K. Heavy metal Problems in Paddy Soil [C]//Kitagishi K, Yamane I. Heavy Metal Pollution in Soil of Japan. Tokyo: Japan Scientific Societies Press,1981.

[16] Kashem M A, Singh B R. Metal availability in contaminated soils: II.Uptake of Cd, Ni and Zn in rice plants grown under flooded culture with organic matter addition [J]. Nutrient Cycling Agroecosystems, 2001, 61(3):257-266.

[17] 胡坤.淹水条件下不同中、微量元素和有益元素对土壤镉有效性和水稻吸收镉的影响[D].四川 雅安:四川农业大学,2010.

[18] 黄冬芬,奚岭林,王志琴,等.结实期灌溉方式对水稻品质 and 不同器官镉浓度与分配的影响[J].作物学报,2008,34(3):456-464.

[19] 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.

[20] 刘建国.水稻品种对土壤重金属镉铅吸收分配的差异及其机理[D].江苏 扬州:扬州大学,2004.

[21] Yang J, Zhang J, Wang Z, et al. Postanthesis water deficit enhance grain filling in two-line hybrid rice [J]. Crop Science,2003,43:2099-2108.

[22] Ben-Asher J, Tsuyuki I, Bravdo B A, et al. Irrigation of grapevines with saline water: I. Leaf area index, stomatal conductance, transpiration and photosynthesis [J]. Agri-cultural Water Management, 2006,83:13-21.