

生物炭与水管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响

王义, 王勃然, 周文涛, 祝志娟, 刘莉, 祝博文, 傅志强

引用本文:

王义, 王勃然, 周文涛, 等. 生物炭与水管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1479-1485.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2019-1408>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

叶面喷施硅硒联合水管理对水稻镉吸收转运特征的影响

高敏, 周俊, 刘海龙, 胡远妹, 徐磊, 梁家妮, 黄贵凤, 周静

农业环境科学学报. 2018, 37(2): 215-222 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1201>

水管理、铁硅材料与生物炭对不同水稻品种吸收镉的影响及其机制

罗小丽, 鞠琳, 姚爱军, 刘冲, 杨燕花, 曹健, 汤叶涛, 仇荣亮

农业环境科学学报. 2019, 38(7): 1506-1513 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-1319>

水分状况对水稻镉吸收转运的影响

吴佳, 纪雄辉, 魏维, 谢运河

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1427-1434 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0299>

基施钢渣及生物炭结合水管理阻控水稻镉吸收研究

曹健, 陈喆, 吴箐, 吴灼浩, 董汉英, 姚爱军, 仇荣亮, 王诗忠, 何尔凯, 汤叶涛

农业环境科学学报. 2018, 37(7): 1475-1483 <https://doi.org/10.11654/jaes.2018-0719>

农艺调控措施对水稻镉积累的影响及其机理研究

沈欣, 朱奇宏, 朱捍华, 许超, 何演兵, 黄道友

农业环境科学学报. 2015, 34(8): 1449-1454 <https://doi.org/10.11654/jaes.2015.08.003>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

王 义, 王勃然, 周文涛, 等. 生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1479–1485.
WANG Yi, WANG Bo-ran, ZHOU Wen-tao, et al. Effects of biochar application and water management coupling on cadmium transfer and accumulation in late-season rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(7): 1479–1485.



开放科学 OSID

生物炭与水分管理耦合对晚稻镉迁移与积累的影响

王 义^{1,2}, 王勃然^{1,2}, 周文涛^{1,2}, 祝志娟^{1,2}, 刘 莉^{1,2}, 祝博文^{1,2}, 傅志强^{1,2*}

(1. 湖南农业大学农学院, 长沙 410128; 2. 农业农村部华中地区作物栽培科学观测实验站, 长沙 410128)

摘 要: 选择中度镉污染稻田, 以晚稻品种 H 优 518 为试验材料, 采用前干后淹(W1)、前淹后干(W2)、长期淹水(W3)、常规水分管理(W4)4种水分管理方式为主处理, 施用4个水平(C1-5 t·hm⁻²、C2-7.5 t·hm⁻²、C3-10 t·hm⁻²、C4-0 t·hm⁻²)的生物炭为副处理, 通过大田裂区试验研究生物炭与水分管理耦合对土壤 pH 以及晚稻镉吸收、迁移与积累的影响。结果表明: 16个处理的 pH 均有上升, 上升幅度在 0.65~1.37 个单位, W3-C3 上升幅度最大, 达到 1.37 个单位; 各处理中, W3-C3 对糙米镉含量降低效果最为明显, 与对照(W4-C4)相比, 糙米中镉含量降低了 59.10%, 含量为 0.18 mg·kg⁻¹, 同一主处理中, 各器官镉含量均呈现随着施炭量增加而下降的趋势; 各处理均能够减弱镉在水稻器官间的转运能力, 与对照相比, 水稻吸收的镉由根部向糙米、由茎叶向糙米的转运系数下降最多的处理分别为 W3-C3、W3-C2, 下降幅度分别为 38.48%、27.03%; 经过处理, 糙米镉积累量显著降低, 积累量最低的处理为 W3-C3, 与对照相比, 下降幅度为 53.44%。综上, 长期淹水与生物炭耦合能有效抑制晚稻对镉的吸收、迁移与积累, 在长期淹水条件下, 生物炭施用量为 10 t·hm⁻² 时降镉效果最为明显。

关键词: 水稻; 水分管理; 生物炭; 糙米镉含量; 转运系数

中图分类号: X503.231 文献标志码: A 文章编号: 1672-2043(2020)07-1479-07 doi:10.11654/jaes.2019-1408

Effects of biochar application and water management coupling on cadmium transfer and accumulation in late-season rice

WANG Yi^{1,2}, WANG Bo-ran^{1,2}, ZHOU Wen-tao^{1,2}, ZHU Zhi-juan^{1,2}, LIU Li^{1,2}, ZHU Bo-wen^{1,2}, FU Zhi-qiang^{1,2*}

(1. College of Agriculture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. Scientific Observation and Experiment Station of Crop Cultivation in Central China, Ministry of Agriculture and Rural Areas, Changsha 410128, China)

Abstract: In the present study, rice fields with moderate cadmium pollution were selected and the late-rice variety 'H You 518' was used as test material to explore the effects of biochar and water management coupling on soil pH and cadmium absorption. Cadmium migration and accumulation in late rice were studied through field split-plot experiments. Four water management methods, namely pre-dry and post-flood (W1), pre-flood and post-dry (W2), long-term flood (W3), and conventional water management (W4), were the main treatments, and biochar with four gradients (C1-5 t·hm⁻², C2-7.5 t·hm⁻², C3-10 t·hm⁻², and C4-0 t·hm⁻²) was used as the secondary treatments. The results showed that the pH values of all 16 treatments increased with 0.65~1.37 units, and the increase in W3-C3 was the largest, reaching 1.37 units. In each treatment, W3-C3 had the greatest effect on reducing the cadmium content in brown rice: Compared with the control (W4-C4), the cadmium content in brown rice was reduced by 59.10%, with a content of 0.18 mg·kg⁻¹. In the same main treatment, the cadmium content in each organ showed a decreasing trend with increased carbon application. Each treatment could reduce the transport capacity of cadmium between rice organs. Compared with the control, the treatments with the largest decrease in the transport coef-

收稿日期: 2019-12-22 录用日期: 2020-03-31

作者简介: 王 义(1995—), 男, 湖南武冈人, 硕士研究生, 主要从事水稻重金属污染防控研究。E-mail: 2672362526@qq.com

*通信作者: 傅志强 E-mail: zqf_cis@126.com

基金项目: 湘北水稻生态优质技术集成与示范(2019YFD0301003); 稻田生态种养产业化关键技术研究示范(2017NK2281)

Project supported: The Integration and Demonstration of Rice Ecological Quality Technology in Northern Hunan Province (2019YFD0301003); The Research and Demonstration of Key Technologies of Rice Ecological Cultivation Industrialization (2017NK2281)

efficient of cadmium absorbed by rice from root to brown rice and from stem and leaf to brown rice were W3-C3 and W3-C2, with decreases of 38.48% and 27.03%, respectively. After treatment, cadmium accumulation in brown rice decreased significantly, and the lowest accumulation was recorded for W3-C3, with a decrease of 53.44% compared with that of the control. In summary, the coupling of long-term flooding and biochar could effectively inhibit the absorption, migration, and accumulation of cadmium in late rice. Under long-term flooding, the effect of reducing cadmium was most obvious when the biochar application amount was $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$.

Keywords: rice; water management; biochar; cadmium content in brown rice; transport coefficient

镉是自然界中广泛存在的一种人体非必需重金属元素,在环境中具有化学活性强、移动性大、毒性持久(半衰期超过 20 a)、隐秘性强等特点^[1]。相关研究表明,在土壤可溶性镉含量达到 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻减产 10%,当含量为 $8.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,水稻减产达 25%,并且,稻米的氨基酸、支链淀粉和直链淀粉比例发生改变,水稻品质变差;当镉元素通过食物链的富集作用进入人体,会对人类自身的健康造成伤害^[2-4]。因此,如何安全有效地修复镉污染农田、降低镉污染地区稻米镉含量,成为了一个亟须解决的技术难题^[5]。

已有研究表明,水稻全生育期淹水是一种低成本、操作便利的降镉手段,淹水条件下水稻籽粒中镉含量能够大幅降低^[6]。有研究认为,长期淹水能够更好地改善土壤氧化还原环境,改变土壤中变价元素如铁、锰、硫的价位及存在形式,进而改变镉的存在形式,影响其生物有效性^[7-8];生物炭是指生物有机质在缺氧或低氧环境下经过裂解形成的固体产物^[9]。常用的生物炭有稻壳炭、竹炭等,其具有较大的孔隙度和比表面积,具有负电荷多、离子交换能力强、吸附性能优异等特点,其表现出对重金属阳离子较强的吸附能力,在提高重金属稳定性、控制污染和修复土壤等方面具有非常广阔的应用前景^[10-13]。在中重度污染区域,采用单一技术很难达到理想的效果,因此,需要采用联合修复技术。有研究表明,优化水分管理方式与施用生石灰相结合一方面能够降低土壤有效镉含量,另一方面能够显著降低镉活性,进而达到降低稻谷镉总积累量的目的^[14]。李剑睿^[15]研究发现,通过长期淹水联合生物炭复配有机肥对水稻土镉污染进行修复,能够有效提高土壤 pH,促使土壤镉形态由交换态向铁锰氧化物结合态转化,同时能够降低土壤氧化还原电位,降低水稻根系镉含量,减少糙米镉含量。目前,针对联合修复技术的研究基础较为薄弱,考虑到实际生产过程中外界条件的多变性,大多研究采用盆栽的方式进行,着重探索其作用机制,而实际用于田间生产不多。以探索实际操作中的降镉效果为目的,本研究选择湖南中度镉污染稻田为试验地点,将

施用生物炭与水分管理两种措施相结合,研究两种技术联合对水稻镉吸收、迁移与积累的影响,以期降低稻米镉含量提供参考依据。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于 2018 年 7—11 月在湖南省长沙县北山镇荣合桥社区镉污染稻田区进行。试验田块地处湖南省东部偏北,东经 $112^{\circ}56'15''$,北纬 $27^{\circ}54'55''$ 。该地位于东亚季风区,属于亚热带季风湿润气候。春季 $15\sim 25^{\circ}\text{C}$,夏季 $18\sim 36^{\circ}\text{C}$,冬季 $5\sim 15^{\circ}\text{C}$ 。常年降雨量 $1\ 000\sim 1\ 200 \text{ mm}$ 。供试土壤为花岗岩发育的麻砂泥水稻土,其基本理化性质为:pH 5.3,全氮 $3.08 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.92 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $29.8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $107 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $30.8 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $125 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有机质 $30.7 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,阳离子交换量 $10.8 \text{ cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$,全镉 $0.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效镉 $0.22 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 试验设计

试验地前茬为空闲。供试材料为 H 优 518,该品种属籼型三系杂交水稻,全生育期平均 112.9 d,重金属吸收能力较强。试验采用裂区设计,以水分管理模式为主处理(W),设 4 个水平:W1 为水稻灌浆期前干后淹,开花前与常规水分管理相同,开花后 3~5 d,田间排水,保持 7 d,然后再灌水深 3 cm,直至成熟;W2 为灌浆期前淹后干,开花前与常规水分管理相同,开花后 3~5 d,田间水深 3 cm,保持 7 d,然后排水落干,直至成熟;W3 为全生育期淹水灌溉,田间一直保持水深 3 cm;W4 为常规管理,前期浅水分蘖,水深 3 cm,分蘖盛期排水晒田,孕穗抽穗期灌浅水,灌浆后期干湿交替直到蜡熟期,黄熟期排水,直至收获。施生物炭为副处理(C),设 4 个水平,分别为 C1: $5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、C2: $7.5 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、C3: $10 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 、C4: $0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。主副处理两两组合,共 16 个处理,按随机区组排列,3 次重复,副区面积 $35 \text{ m}^2(5 \text{ m} \times 7 \text{ m})$,小区间用铺塑料薄膜的田埂隔开。

2018 年 6 月 22 日播种,7 月 26 日移栽,移栽规格为 $17 \text{ cm} \times 23 \text{ cm}$,10 月 20 日收获。N、 P_2O_5 、 K_2O 施肥量分

别为150、75、120 kg·hm⁻²。施肥时期及比例为:移栽前基肥,N-60%、P₂O₅-100%、K₂O-60%;分蘖肥 N-30%;穗肥,N-10%、K₂O-40%。其余病虫害管理按当地高产栽培技术措施进行。

1.3 观测指标与方法

水稻收获后取样,采用水浸提法测定土壤 pH^[16],水稻糙米及植株镉含量采用微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定^[17]。

水稻成熟期取植株样品,分离各部位,置于80℃烘干箱中烘干,称质量测定其生物量。

1.4 数据处理

植株镉积累量=植株镉含量×每平方米植株生物量;镉从根系向茎叶的转运系数(TF_{茎叶/根})=水稻茎叶镉含量/水稻根系镉含量×100%;镉从根系向糙米的转运系数(TF_{糙米/根})=水稻糙米镉含量/水稻根系镉含量×100%;镉从茎叶向糙米的转运系数(TF_{糙米/茎叶})=水稻糙米镉含量/水稻茎叶镉含量×100%^[18]。

试验数据采用 Microsoft Excel 2016 和 SPSS 22.0 统计软件进行差异显著性分析和相关分析。

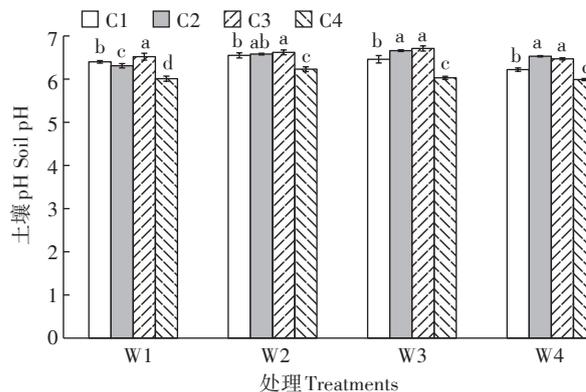
2 结果与分析

2.1 水炭耦合对土壤 pH 的影响

由图1可知,不同水分管理方式与生物炭结合处理对土壤的 pH 具有显著影响,较试验前土壤 pH,经各组合处理之后的土壤 pH 均有明显增高,差值在0.65~1.37。在未施用生物炭(C4)的情况下,W4 增长幅度最小,其他3种模式排序为 W2>W3>W1。在施用生物炭的情况下,W1 水分管理模式下,施炭量不同的4个小区 pH 差异显著,表现为 W3>W1>W2>W4;W2 水分管理模式下,C2 与 C3、C1 差异不显著,其他各小区有显著差异,具体表现为 C3>C2>C1>C4;在 W3 控水模式下,C2 与 C3 没有显著差异,其他各小区差异显著,具体为 C3>C2>C1>C4;在 W4 常规控水情况下,C2 与 C3 没有显著差异,其他各小区差异显著,具体为 C2>C3>C1>C4;总体来说,在4种水分管理模式下,pH 增长幅度大致排序为 C3>C2>C1>C4,在16个处理中,增幅最高的处理为 W3-C3,增幅达到1.37个单位。

2.2 水炭耦合对水稻各部位镉含量的影响

由表1可知,水分管理和生物炭均对水稻成熟期根系、茎叶、糙米的镉含量影响达到极显著水平,水分管理与生物炭耦合对根系、糙米镉含量的影响达到极显著水平,对茎叶镉含量的影响未达到显著



不同字母表示同一水分管理模式下不同施炭处理间差异显著 (W为主处理,C为副处理, $P<0.05$)

Different letters indicate the significant difference between different carbon application treatments under the same water management mode (W is the main treatment, C is the secondary treatment, $P<0.05$)

图1 相同水分管理模式下不同施炭量对土壤 pH 的影响
Figure 1 Effects of different carbon application rates on soil pH under the same water management model

水平。由表中根系镉含量可知,在未施用生物炭(副处理为 C4)的情况下,W4 根部镉含量最高,W3 含量最低,与 CK(W4-C4)相比,W1、W2、W3 镉含量分别降低了12.83%、24.46%、28.09%。在施用生物炭的情况下,根系镉含量最低的处理为 W3-C1,与 CK 相比其下降了48.67%。由表中茎叶镉含量可知,在未施用生物炭的情况下,W4 茎叶部分镉含量最高,W3 含量最低,4种模式对比,茎叶部镉含量由高到低依次为 W4>W2>W1>W3,与 CK 相比,W1、W2、W3 分别降低了21.51%、18.82%、43.01%。在施用生物炭的情况下,茎叶镉含量最低的处理为 W3-C3,其含量较 CK 下降了51.63%。由表中糙米镉含量可知,在未施用生物炭的情况下,糙米镉含量最高的为 W4,W3 镉含量最低,与 CK 对比,W1、W2、W3 分别降低了18.18%、6.82%、38.64%。在施用生物炭的情况下,糙米镉含量最低的处理为 W3-C3,其含量低于国家稻米镉含量标准,较 CK 降低了59.10%。

2.3 水炭耦合对水稻各部位镉积累量的影响

由表2可知,水分管理对水稻各部位镉积累量都具有极显著的影响,生物炭对成熟期水稻根与糙米镉积累量的影响达到极显著水平,对茎叶的积累量影响显著,水分管理与生物炭耦合对水稻根与糙米的积累量影响水平达到极显著,对茎叶的积累量影响未达到显著水平。由表中成熟期根部镉积累量可知,未施用生物炭时,W4 积累量最高,W3 积累量最低,相较于 CK,W1、W2、W3 分别降低了3.10%、23.50%、26.53%。在

表1 植株各部位镉含量($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)Table 1 Cadmium content in various parts during maturity ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

处理 Treatments	根 Root	茎叶 Stem and leaves	糙米 Brown rice	
W1	C1	3.56±0.43a	1.29±0.14a	0.28±0.08b
	C2	2.44±0.35b	1.06±0.08b	0.23±0.07c
	C3	3.35±0.23a	0.93±0.04b	0.24±0.10bc
	C4	3.60±0.32a	1.46±0.12a	0.36±0.12a
W2	C1	3.26±0.44a	1.41±0.02b	0.42±0.21a
	C2	2.52±0.13b	1.68±0.42a	0.38±0.05ab
	C3	2.17±0.10b	1.16±0.34c	0.33±0.04b
	C4	3.12±0.13a	1.51±0.12ab	0.41±0.13a
W3	C1	2.12±0.06b	1.02±0.11a	0.26±0.11a
	C2	2.85±0.71a	1.10±0.10a	0.21±0.05b
	C3	2.81±0.07a	0.90±0.09a	0.18±0.06b
	C4	2.97±0.17a	1.06±0.07a	0.27±0.15a
W4	C1	3.78±0.45a	1.53±0.04b	0.24±0.12b
	C2	3.04±0.27b	1.59±0.05b	0.36±0.14b
	C3	2.54±0.11b	1.22±0.19b	0.35±0.08b
	C4	4.13±0.22a	1.86±0.17a	0.44±0.10a
水分管理	15.60**	28.65**	199.98**	
生物炭	13.90**	12.98**	8.23**	
水分管理 + 生物炭	6.30**	1.94	4.59**	

注:不同字母表示同一水分管理模式下不同施炭处理间差异显著($P<0.05$)。*在0.05水平上显著相关;**在0.01水平上极显著相关。下同。

Note: different letters indicate the significant difference between different carbon application treatments under the same water management mode ($P<0.05$). *Significant correlation at the 0.05 level; ** Significant correlation at the 0.01 level. The same below.

施用生物炭的情况下,对比各控水模式中各处理的积累量,积累量最小的处理为W2-C3,积累量最大的处理为W4-C1,相较于CK其分别降低了56.12%、-5.10%。由表中水稻成熟期茎叶部位的镉积累量可知,在未施用生物炭时,积累量最小的控水模式为W3,积累量最高的模式为W4,相较于CK, W1、W2、W3分别降低了35.12%、3.68%、47.16%。在施用生物炭的情况下,控水模式中各处理相比,积累量最低的为W3-C3,积累量最高的处理为W4-C1。由表中糙米部位镉积累量可知,在未施用生物炭的情况下,W3模式镉积累量最低,最高的模式为W2,相较于CK, W1、W2、W3分别降低了0.01%、-8.62%、17.24%。在施用生物炭的情况下,积累量最高的处理为W2-C2,积累量最低的处理为W3-C3,相较于CK其分别降低了-8.62%、53.44%。

2.4 水炭耦合对水稻植株各部位镉转运系数的影响

由表3可知,水分管理对 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{糙米/根}}$ 的影响

表2 水稻植株各部位镉积累量($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)Table 2 Cadmium accumulation in various parts of rice at maturity stage ($\text{mg}\cdot\text{m}^{-2}$)

处理 Treatments	根 Root	茎叶 Stem and leaves	糙米 Brown rice	
W1	C1	0.66±0.09b	2.09±0.48a	0.39±0.07b
	C2	0.52±0.08c	1.72±0.55ab	0.43±0.03b
	C3	0.71±0.05b	1.34±0.19b	0.40±0.05b
	C4	0.95±0.08a	1.94±0.13a	0.58±0.02a
W2	C1	0.92±0.12a	2.24±0.30b	0.59±0.10a
	C2	0.57±0.01c	2.31±0.51ab	0.61±0.09a
	C3	0.43±0.01d	2.09±0.36b	0.49±0.07b
	C4	0.75±0.03b	2.88±0.26a	0.63±0.09a
W3	C1	0.47±0.01c	1.18±0.21a	0.47±0.02a
	C2	0.64±0.16ab	1.78±0.58a	0.28±0.06b
	C3	0.55±0.01bc	1.16±0.15a	0.27±0.02b
	C4	0.72±0.02a	1.58±0.01a	0.48±0.05a
W4	C1	1.03±0.12a	2.51±0.17ab	0.45±0.05b
	C2	0.68±0.06b	1.91±0.07b	0.56±0.04ab
	C3	0.73±0.01b	2.23±1.10ab	0.47±0.05ab
	C4	0.98±0.09a	2.99±0.05a	0.58±0.07a
水分管理	31.10**	92.02**	219.73**	
生物炭	29.49**	4.54*	9.66**	
水分管理 + 生物炭	9.60**	1.30	3.67**	

达到了极显著水平,对 $\text{TF}_{\text{糙米/茎叶}}$ 影响显著;生物炭处理对 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 的影响达到显著水平,对 $\text{TF}_{\text{糙米/根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{糙米/茎叶}}$ 的影响未达到显著水平;水分管理与生物炭耦合对 $\text{TF}_{\text{糙米/根}}$ 达到了极显著水平,对 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 、 $\text{TF}_{\text{糙米/茎叶}}$ 影响不显著。由表中 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 的数值可以看出,在未施用生物炭的情况下, $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 由高到低为W2>W4>W1>W3,在施用生物炭的情况下,4种控水模式中各处理间差异大部分呈现不显著水平,转运系数最高的处理为W2-C2,最低的为W1-C3。由表中 $\text{TF}_{\text{糙米/根}}$ 可知,在未施用生物炭的情况下, $\text{TF}_{\text{糙米/根}}$ 由高到低依次为W2>W4>W1>W3。在施用生物炭的情况下,转运系数最高的处理为W2-C2,最低的处理为W3-C3。由表中 $\text{TF}_{\text{糙米/茎叶}}$ 可以看出,在未施用生物炭的情况下, $\text{TF}_{\text{糙米/茎叶}}$ 由高到低依次为W3>W1>W2>W4。在施用生物炭的情况下,各处理差异大多呈不显著水平,转运系数最高的处理为W2-C3,最小的处理为W3-C2。

2.5 糙米镉含量与相关指标间的关系

由表4可知,水稻成熟期糙米的镉含量与土壤的pH呈显著负相关关系,与根系镉含量、 $\text{TF}_{\text{茎叶/根}}$ 呈显著正相关关系,其相关系数分别为-0.52、0.56、0.70;糙

米镉含量与茎叶镉含量、根系镉积累量、茎叶镉积累量、糙米镉积累量、TF_{糙米/根}、TF_{糙米/茎叶}呈极显著正相关关系,其相关系数分别为0.91、0.89、0.91、0.76、0.95、0.94。由此可知,随着根系以及茎叶部位镉含量及积累量的增加,糙米的镉含量会增长,糙米镉含量的增长对糙米镉积累也具有极大的影响,同时也将对糙米与其他部位的转运系数造成极大的影响。

3 讨论

土壤pH是影响土壤中重金属溶解度及生物有效性的主要因素之一,根本原因在于其影响土壤中镉的吸附-解吸、溶解-沉淀,进而影响土壤中镉的生物有效性,土壤pH为4.5~7.2时,介质中水溶性镉含量与pH呈显著负相关,当pH为4时,镉的溶出率为50%,pH为7.5时将很难溶出^[19-20]。谢运河等^[21]和王蜜安^[22]研究发现,通常田间作物镉含量与土壤的pH呈负相关关系,即土壤pH越低,镉活性越强,越容易被作物吸收,糙米镉含量就越高,这与本试验结果一致。试验中,在施用生物炭的情况下,土壤pH提升幅度较大,且呈现出随施炭量增加而趋向中性的趋势,但未施用生物炭的情况下pH变化较小,且与同一水分管

表3 水稻植株各部位的转运系数

Table 3 Transfer coefficients of various parts of rice at maturity stage

处理 Treatments		TF _{茎叶/根}	TF _{糙米/根}	TF _{糙米/茎叶}
		TF _{Stem and leaves/Root}	TF _{Brown rice/Root}	TF _{Brown rice/Stem and leaves}
W1	C1	40.14±3.38a	8.92±2.73ab	22.21±6.25a
	C2	43.81±3.11a	9.38±0.74ab	21.39±0.32a
	C3	27.81±3.02b	7.10±0.40b	25.83±4.28a
	C4	40.66±4.10a	10.08±1.17a	24.79±2.68a
W2	C1	43.68±5.28b	13.19±3.96bc	29.75±5.39ab
	C2	66.44±16.04a	17.73±2.36a	27.72±7.79ab
	C3	53.07±14.73b	15.21±2.53ab	31.22±14.0a
	C4	48.66±5.72b	11.43±1.50c	23.72±4.21b
W3	C1	48.19±1.77a	12.29±0.80a	25.49±0.73a
	C2	40.91±14.46ab	7.18±3.17b	17.14±2.63b
	C3	31.65±2.46b	6.81±0.62b	21.71±3.68ab
	C4	35.59±2.97ab	9.99±1.20ab	28.08±2.26a
W4	C1	40.97±5.95a	7.27±1.28b	17.78±2.11b
	C2	52.31±2.92a	11.11±0.77a	21.25±1.24ab
	C3	51.12±7.83a	13.76±1.25a	27.09±1.89a
	C4	47.01±6.77a	11.07±1.86ab	23.49±0.62ab
水分管理		19.87**	48.88**	3.35*
生物炭		3.40*	0.49	2.10
水分管理+生物炭		2.09	5.21**	1.80

表4 糙米镉含量与其他变量之间的相关性

Table 4 Correlation between brown rice cadmium content and other variables

指标 Variables	相关系数 Correlation coefficient
土壤pH Soil pH	-0.52*
根镉含量 Root Cd content	0.56*
茎叶镉含量 Stem and leaves Cd content	0.91**
根系镉积累量 Root Cd accumulation	0.89**
茎叶镉积累量 Stem and leaves Cd accumulation	0.91**
糙米镉积累量 Brown rice Cd accumulation	0.76**
TF _{茎叶/根} TF _{Stem and leaves/Root}	0.70*
TF _{糙米/根} TF _{Brown rice/Root}	0.95**
TF _{糙米/茎叶} TF _{Brown rice/Stem and leaves}	0.94**

理模式下其他施炭处理的差异显著(图1),这可能是由于生物炭原料中含有钙、镁、钾、钠等离子,其在热解过程中转化成金属氧化物、氢氧化物或碳酸盐等^[23],施加到土壤中后会中和土壤的酸度,从而使土壤pH提高^[24],而在未施用生物炭的情况下,淹水造成土壤中有有机厌氧分解生成有机酸,从而导致pH变化较小^[25]。在未施用生物炭的情况下,单一的长期淹水处理、两种湿润灌溉处理下土壤pH较试验前仍有小幅度提升,可能是由于当地自然环境改善,自然雨水与灌溉用水较土壤本身酸碱度偏中性,日常降水以及灌溉水下渗导致。

水稻各部位对镉的吸收、积累与转运是决定稻米中镉含量的关键。镉在水稻中的转运是一个由下往上的过程,水稻根系、茎叶部分镉浓度及积累量直接影响到稻米中镉含量的多少。李园星露等^[26]通过盆栽试验研究了生物炭耦合水分管理对稻米镉积累的影响,结果显示添加生物炭与长期淹水管理能够有效降低土壤中镉的生物有效性,降低稻米镉含量,减少糙米镉积累量,这与本试验结果一致。这可能是因为生物炭自身多孔径的结构以及自身强大的吸附能力,能够与土壤中重金属结合形成沉淀,从而降低了土壤中镉的生物有效性,减少土壤有效镉含量。张振宇^[27]认为,生物炭施入土中,也可以增加水稻镉库的相对容量,从而使籽粒镉含量下降。同时长期淹水能够降低土壤氧化还原电位,从而增加土壤中还原态铁、锰等阳离子和硫等阴离子含量,而施入生物炭后,pH上升,加剧了还原态阳离子与镉离子的竞争吸附以及还原态阴离子的共沉淀作用,从而降低土壤中镉的生物有效性^[28]。谷学佳等^[29]研究发现,随着施炭量的增加,糙米镉含量呈现降低的趋势,这与本试验结果相

一致。试验中,分别对比不施用生物炭时4种水分管理模式以及常规水分管理模式下不同施炭量处理的糙米镉含量(表1),单一水分管理中下降最多的处理为长期淹水,糙米镉含量较常规水分管理下降38.64%,在常规水分管理中,仅考虑生物炭的影响情况下,单一生物炭处理中下降幅度最大的为施用量 $5\text{ t}\cdot\text{hm}^{-2}$,相较于对照糙米镉含量下降45.45%,将两项单一处理与联合处理中降幅最大的处理相比较,其下降幅度分别减少20.46%、13.65%。由此可知,复合处理较单一处理具有一定的优势,通过试验中单一处理之间的比较情况,长期淹水的下降幅度小于生物炭处理的下降幅度,但考虑到两者作用机制不尽相同,以及水分管理受到外界影响的因素较多,所以很难在组合处理的情况下辨别两种手段的主次地位。

水稻从土壤中吸收镉总量不变的情况下,各器官间对镉的转运能力强弱是影响稻米中镉含量的重要因素之一。通过比较不同处理下水稻各器官间转运系数的差异表明,经过水分管理与生物炭耦合处理的水稻各器官间转运能力较对照大致呈现减弱的趋势(表3),此结果与杨定清等^[30]的研究结果一致,转运能力的减弱使镉从根系、茎叶等部位向水稻籽粒的转运减少。但总体看来,转运能力的变化并无明显规律,甚至出现增强的现象,这可能是由于水分管理与生物炭耦合不会阻碍水稻自下而上的镉运输过程,而只是通过减少水稻从土壤中摄取镉的总量来影响水稻器官的镉含量与积累量^[31]。

4 结论

(1)联合降镉技术相对单一手段降镉效果更加突出。联合处理中,长期淹水与生物炭耦合对水稻镉吸收、迁移及积累的抑制效果更强,对镉污染地区种植水稻是一种值得推荐的降镉方式。

(2)长期淹水模式降镉效果显著,水资源丰富地区,考虑到生物炭成本的情况下,选用长期淹水模式种植水稻对镉污染地区水稻降镉具有巨大的参考价值,在水资源缺乏地区,则应该重视生物炭等钝化剂及其他降镉措施的应用。

参考文献:

[1] 李婧,周艳文,陈森,等.我国土壤镉污染现状、危害及其治理方法综述[J].安徽农学通报,2015,21(24):104-107.
LI Jing, ZHOU Yan-wen, CHEN Sen, et al. Actualities, damage and management of soil cadmium pollution in China[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2015, 21(24):104-107.

[2] Johannes G, Franziska S, Christian G S. The toxicity of cadmium and resulting hazards for human health[J]. *Journal of Occupational Medicine and Toxicology*, 2006, 1:22.
[3] 崔玉静,赵中秋,刘文菊,等.镉在土壤-植物-人体系统中迁移积累及其影响因素[J].生态学报,2003,23(10):2133-2143.
CUI Yu-jing, ZHAO Zhong-qiu, LIU Wen-ju, et al. Transfer of cadmium through soil-plant-human continuum and its affecting factors[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(10):2133-2143.
[4] Méndes-Armenta M, Ríos C. Cadmium neurotoxicity[J]. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 2007, 23(3):350-358.
[5] 赵秀红. Cd污染稻田修复体系实施效果[J].现代农业科技,2017(9):204-208.
ZHAO Xiu-hong. Application effect of remediation system of rice field contaminated by Cd[J]. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2017(9):204-208.
[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):49-52.
ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, FU Shi-jing, 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):49-52.
[7] 王惠明,林小兵,黄欠如,等.不同灌溉模式对稻田土壤及糙米重金属积累的影响[J].生态科学,2019,38(3):152-158.
WANG Hui-ming, LIN Xiao-bing, HUANG Qian-ru, et al. Effects of different irrigation modes on heavy metal accumulation in paddy soil and brown rice[J]. *Ecological Science*, 2019, 38(3):152-158.
[8] 陈温福,张伟明,孟军,等.生物炭应用技术研究[J].中国工程科学,2011,13(2):83-87.
CHEN Wen-fu, ZHANG Wei-ming, MENG Jun, et al. Researches on biochar application technology[J]. *Engineering Sciences*, 2011, 13(2):83-87.
[9] 袁金华,徐仁扣.生物质炭的性质及其对土壤环境功能影响的研究进展[J].生态环境学报,2011,20(4):779-785.
YUAN Jin-hua, XU Ren-kou. Progress of the research on the properties of biochars and their influence on soil environmental functions[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2011, 20(4):779-785.
[10] Pena J M, Allen N S, Edge M, et al. Analysis of radical content on carbon black pigments by electron spin resonance: Influence of functionality, thermal treatment and adsorption of acidic and basic probes[J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2000, 71(1):153-170.
[11] 张阿娇,潘根兴,李恋卿.生物黑炭及其增汇减排与改良土壤意义[J].农业环境科学学报,2009,28(12):2459-2463.
ZHANG A-jiao, PAN Gen-xing, LI Lian-qing. Biochar and the effect on C stock enhancement, emission reduction of greenhouse gases and soil reclamation[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(12):2459-2463.
[12] Braida W J, Pignatello J J, Lu Y F, et al. Sorption hysteresis of benzene in charcoal particles[J]. *Environmental Science & Technology*, 2003, 37(2):409-417.
[13] Kramer R W, Kujawinski E B, Hatcher P G. Identification of black carbon derived structures in a volcanic ash soil humic acid by Fourier transform ion cyclotron resonance mass spectrometry[J]. *Environmen-*

tal Science and Technology, 2004, 38(12):3387-3395.

- [14] 谢敏,黎良平,戴典,等. VIP+n技术对重金属污染土壤和稻谷降镉效果研究[J]. 吉林农业, 2017(8):75-77.
XIE min, LI Liang-ping, DAI Dian, et al. Study on the effect of VIP + n technology on reducing cadmium in heavy metal polluted soil and rice[J]. *Agricultural of Jilin*, 2017(8):75-77.
- [15] 李剑睿. 农艺措施联合钝化技术对水稻土镉污染修复效应研究[D]. 北京:中国农业科学院, 2015.
LI Jian-rui. Study on the remediation effect of agricultural measures combined with passivation technology on cadmium pollution in paddy soil[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015.
- [16] 刘芬. 株洲地区土壤pH值测定方法研究[J]. 农业环境保护, 1998, 17(2):84-85, 88.
LIU Fen. Determination method of soil pH value in Zhuzhou area[J]. *Agro-environmental Protection*, 1998, 17(2):84-85, 88.
- [17] 罗艳玲,张玉萍. 微波消解-石墨炉原子吸收光谱法测定稻谷中镉的含量[J]. 粮食与饲料工业, 2012(10):61-64.
LUO Yan-ling, ZHANG Yu-ping. Determination of cadmium in rice by microwave digestion-atomic absorption spectrometry[J]. *Cereal & Feed Industry*, 2012(10):61-64.
- [18] 胡莹,黄益宗,段桂兰,等. 镉对不同生态型水稻的毒性及其在水稻体内迁移转运[J]. 生态毒理学报, 2012, 7(6):664-670.
HU Ying, HUANG Yi-zong, DUAN Gui-lan, et al. Cadmium toxicity and its translocation in two ecotype rice cultivars[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2012, 7(6):664-670.
- [19] 曾翔. 水稻镉积累和耐性机理及其品种间差异研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2006.
ZENG Xiang. Mechanism of cadmium accumulation and tolerance in rice and differences among varieties[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2006.
- [20] 刘文菊,张西科,尹君,等. 镉在水稻根际的生物有效性[J]. 农业环境保护, 2000, 19(3):184-187.
LIU Wen-ju, ZHANG Xi-ke, YIN Jun, et al. Cadmium bioavailability in rhizosphere of paddy soil[J]. *Agro-environmental Protection*, 2000, 19(3):184-187.
- [21] 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.
- [22] 王蜜安. 水稻镉吸收与积累稳定性研究[D]. 长沙:湖南农业大学, 2015.
WANG mi-an. Study on the stability of cadmium absorption and accumulation in rice[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2015.
- [23] Houben D, Evrard L, Sonnet P. Mobility, bio-availability and pH-dependent leaching of cadmium, zinc and lead in a contaminated soil amended with bio-char[J]. *Chemosphere*, 2013, 92(11):1450-1457.
- [24] Novak J M, Busscher W J, Laird D L, et al. Impact of bio-char amendment on fertility of a southeastern coastal plain soil[J]. *Soil Science*, 2009, 174(2):105-112.
- [25] 罗小丽,鞠琳,姚爱军,等. 水分管理、铁硅材料与生物炭对不同水稻品种吸收镉的影响及其机制[J]. 农业环境科学学报, 2019, 38(7):1506-1513.
LUO Xiao-li, JU Lin, YAO Ai-jun, et al. Effects of water management and amendments with iron and silicon-rich material and biochar on cadmium uptake of different rice varieties and their preliminary mechanisms[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2019, 38(7):1506-1513.
- [26] 李园星露,叶长城,刘玉玲,等. 生物炭耦合水分管理对稻田土壤As-Cd生物有效性及稻米累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(4):696-704.
LI Yuan-xing-lu, YE Chang-cheng, LIU Yu-ling, et al. Bioavailability of arsenic and cadmium, and their cumulative control in rice grown on arsenic-cadmium-contaminated paddy soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(4):696-704.
- [27] 张振宇. 生物炭对稻田土壤镉生物有效性的影响研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2013.
ZHANG Zhen-yu. Effect of bio-char on bio-availability of cadmium in paddy soil[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2013.
- [28] 陈喆,铁柏清,刘孝利,等. 改良-农艺综合措施对水稻吸收积累镉的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(7):1302-1308.
CHEN Zhe, TIE Bai-qing, LIU Xiao-li, et al. Impacts of optimized agronomic regulation management on cadmium absorption and accumulation by late rice[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(7):1302-1308.
- [29] 谷学佳,王玉峰,张磊. 生物炭对水稻镉吸收的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2019(6):47-49.
GU Xue-jia, WANG Yu-feng, ZHANG Lei. Effects of biochar on Cd absorption in rice[J]. *Heilongjiang Agricultural Sciences*, 2019(6):47-49.
- [30] 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 Ding-qing, LEI Shao-rong, LI Xia, et al. Controlling cadmium concentration in rice by field water management technology[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2016, 32(18):11-16.
- [31] 鄂洋. 生物炭表面有机小分子及其活性研究[D]. 沈阳:沈阳农业大学, 2015.
E Yang. Study on the surface organic molecules and their activities of biochar[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2015.