

氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥对水稻中镉含量及分布规律的影响

魏祥东¹ 邹慧玲^{1,2} 方雅瑜¹ 尹晓辉¹ 杨登¹ 陈楠¹ 张昊¹

(¹ 湖南农业大学资源环境学院/湖南农业大学南方稻田重金属污染防治协同创新中心, 长沙 410128; ² 湖南农业大学图书馆, 长沙 410128; 第一作者: xiangdongw@126.com)

摘 要:通过室内盆栽试验,分析了施用氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥对水稻体内镉含量及分布规律的影响,探索利用氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 及赤泥治理稻米 Cd 污染的可行性。结果表明,添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥后,水稻株高及产量增加,根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量显著降低,Cd 含量降低幅度由高到低依次为赤泥+氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施处理>赤泥单施处理>氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施处理,降低幅度最大的处理为 R2T2。单施赤泥时,随着添加量增加,稻米 Cd 含量先降低后升高;氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施及其与赤泥配施时,随着添加量增加,稻米 Cd 含量无显著变化。虽然添加赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 能显著降低糙米 Cd 含量,但由于土壤中重金属污染严重,糙米中 Cd 含量仍超过国家限量标准。可见,在重度 Cd 污染土壤中,利用赤泥、氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 及其配施很难实现稻米安全生产的目的。

关键词:氧化亚铁硫杆菌 QBS-01; 赤泥; 水稻; 镉; 添加方式; 添加量

中图分类号:S511.062 **文献标识码:**A **文章编号:**1006-8082(2018)01-0068-06

近年来,我国“镉米”事件频发,成为危害居民身体健康、影响社会稳定、导致群体性事件的重大环境问题。因此,开展稻米镉污染防治已成为当前我国急需解决的重大战略需求^[1-3]。解决稻米镉污染的关键是弄清稻米镉污染来源及其吸收、转运与积累机理。研究发现,镉是通过茎迁移转运并积累至稻米中,且镉的转运途径有两条,即“根→茎→米”和“叶→茎→米”^[4-5]。因此,通过工程技术措施阻隔镉在水稻中的迁移转运率,可以降低稻米中镉的含量,达到稻米镉污染治理的目的。

许多研究发现,通过添加土壤改良剂、改变灌溉方式等措施可以改变土壤中镉的存在形态,降低其迁移性和水稻对镉的吸收积累量^[6-9]。赤泥呈碱性,且具有较强的吸附能力,能显著提升土壤 pH 值并改变土壤中重金属的化学形态,减少土壤重金属的有效性,被广泛用于稻米镉污染治理^[10-12]。铁氧化细菌广泛分布于生物圈,种类较多,且能使铁在二价和三价之间变化,对土壤中的铁、氮和碳循环具有重要的推动作用,很多学者认为其在环境污染治理中也有重要的开发价值^[13-17]。但在目前氧化亚铁硫杆菌主要应用于城市用水净化^[14,18]、烟气脱硫^[18]、含重金属废水^[19]或污泥的浸提^[20]以及淋滤^[21-22]等方面,很少用于土壤重金属污染的原位修复与钝化。本文利用本实验室筛选的氧化亚铁硫杆菌,通过室

内盆栽试验,研究该氧化亚铁硫杆菌及其与赤泥互作对水稻生长及植株中镉含量、分布规律的影响,探索利用其治理重度重金属污染土壤的可能性和有效性,为稻米镉污染治理提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 供试材料

1.1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省浏阳市七宝山乡铁山村某农田耕作层(0~20 cm)。土壤采集后立即运回实验室并放于室内通风干燥处自然风干,过筛(5 mm)去除杂物、残根后备用。供试土壤为砂壤,基本理化性质和重金属含量见表 1。从表 1 可知,供试土壤中 Cd、Pb、Zn 和 Cu 的含量均超过农业用地土壤环境质量标准 II 级标准。其中,Cd 超标情况最为严重,超标约 18.9 倍;Pb 超标约 2.7 倍,Zn 超标约 3.7 倍,Cu 超标约 18.8 倍,为复合重金属重度污染农田土壤。

收稿日期:2017-10-10

基金项目:国家自然科学基金(4121511);湖南省科技计划项目(2016NK2017);农业部、财政部项目(2016130);湖南省科技计划项目(2015NK3015)

表 1 供试土壤理化性质

	pH 值	全 Cd (mg/kg)	全 Pb (mg/kg)	全 Zn (mg/kg)	全 Cu (mg/kg)	全氮 (g/kg)	全磷 (g/kg)	全钾 (g/kg)	有机质 (g/kg)
供试土壤	5.35±0.1	5.66±0.32	675.82±4.51	735.55±7.05	473.55±4.43	2.14±0.36	0.75±6.38	27.41±2.31	28.97±1.01
水田Ⅱ级标准	-	≤0.3	≤250	≤200	≤50	-	-	-	-

表中数据为平均值±标准差;水田标准为 GB 15618-1995。

表 2 盆栽试验设计

处理	具体操作规程
CK	不添加任何土壤改良剂
R1	添加赤泥 5.33 g/盆 (0.09%, W/W), 折合用量为 2 000 kg/hm ²
R2	添加赤泥 10.67 g/盆 (0.18%, W/W), 折合用量为 4 000 kg/hm ²
R3	添加赤泥 16.00 g /盆 (0.27%, W/W), 折合用量为 6 000 kg/hm ²
T1	添加 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 4 mL/盆, 折合用量为 50 L/hm ²
T2	添加 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 6 mL/盆, 折合用量为 75 L/hm ²
T3	添加 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 8 mL/盆, 折合用量为 100 L/hm ²
R1T1	添加赤泥 5.33 g/盆, 水稻移栽 3 周后喷洒 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 4 mL/盆
R2T2	添加赤泥 10.67 g/盆, 水稻移栽 3 周后喷洒 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 6 mL/盆
R3T3	添加赤泥 16.00 g /盆, 水稻移栽 3 周后喷洒 QBS-01 菌液(OD600 nm=0.288) 8 mL/盆

1.1.2 供试水稻

供试水稻品种为两优 5218, 全生育期 135 d 左右。水稻秧苗由湖南省株洲县洲坪乡湖南省耕地重金属污染治理试验基地提供。

1.1.3 赤泥及供试菌株

供试赤泥由河南长兴实业有限公司提供, 为拜耳-烧结联合法赤泥。其基本理化性质: pH 值 11.25, 有机质含量 5.0 g/kg, Cu 含量 27.58 mg/kg, Zn 含量 31.13 mg/kg、Pb 含量 36.75 mg/kg、Cd 含量 0.13 mg/kg。

供试菌株为本课题组从湖南浏阳七宝山某废弃硫酸铁矿废渣中分离纯化的 QBS-01, 初步鉴定为嗜酸性氧化亚铁硫杆菌。该菌呈杆状, 革兰氏阴性菌, 最适生长和代谢的初始 pH 值为 2.0, 温度为 30℃。

1.2 试验设计

盆栽试验在湖南农业大学资源环境学院耘园试验基地通风玻璃房内进行。试验用盆高 18.0 cm, 上口直径 26.5 cm, 下口直径 19.0 cm。土壤过筛混合均匀后装盆, 每盆 6 kg。装土后浸水 2 d 使土壤湿润, 再添加基肥。基肥每盆 10 g, 其中复合肥 4.17 g、一水磷酸二氢钙 3.32 g、尿素 2.17 g、氯化钾 1.00 g, 氮肥中基肥与追肥比为 7:3。根据他人的研究成果^[10,23-25], 在尽量降低添加物二次污染和成本的基础上, 确定赤泥和 QBS-01 菌液添加量(表 2)。赤泥在装土时(约在水稻移栽前 10 d)混入, 于移栽 3 周后添加菌液。将菌液用无菌水稀释至 500 mL, 并用小型喷雾器均匀喷洒到土壤表面, 对照组喷洒等体积无菌水。添加菌液后 1 周内仅保持土壤湿润但无积水。试验共设 10 个处理, 每个处理

3 次重复。2014 年 6 月 10 日将长势均匀的秧苗移栽, 每盆 3 丛, 每丛 3 株, 移栽 1 周后追肥。全生育期用曝气自来水浇灌(自来水 pH 值约 7.0, Cd 浓度为 1.20 μg/L), 水深 3 mm, 并按当地种植习惯进行追肥、除草、除虫等。2014 年 10 月 8 日收割水稻并采样。

1.3 样品采集与预处理

在收割前测量水稻株高, 然后采集样品。先将水稻穗部剪下、晒干后称重后用砵谷机(用 JLG-Ⅱ型)分离谷壳和糙米后粉碎, 装封口袋待用。水稻植株用自来水洗干净, 再用去离子水润洗 3 次, 并将根、茎、叶分离, 分别装入牛皮纸袋中^[26]。所有样品于 105℃杀青 2 h, 然后 65℃烘干至恒质量后粉碎过筛, 备用。

1.4 重金属含量测定

所有植物样品经混合酸(HNO₃:HClO₄=4:1)消解、过滤、定容后, 保存于 4℃冰箱中备用。消解时用国家标准参比物质 [灌木枝叶 GBW07603 (GSV-2)、大米 GBW10010(GSB-1)]和平行全空白样进行质量控制^[26]。采用 ICP-OES(美国 PE8300)测定 Cd 含量在 0.1 mg/kg 以上的消解液, 并用原子吸收分光光度计-石墨炉法(GTA120, 美国 Varian)测定 Cd 含量在 0.1 mg/kg 以下的消解液。

1.5 数据处理

试验数据用 SPSS 19.0 进行单因素方差分析, 并采用 LSD 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 对水稻株高和产量的影响

表 3 不同处理对水稻株高及产量的影响

处理	株高 (cm)	升降幅度 (%)	谷质量 (g/盆)	升降幅度 (%)
CK	89.6±1.9 a	—	63.8±1.8 a	—
R1	92.5±1.6 ab	3.24	67.5±1.9 ab	5.80
R2	93.1±1.1 b	3.91	68.1±1.6 b	6.74
R3	93.9±1.5 b	4.80	69.6±1.3 b	9.09
T1	89.5±2.1 a	-0.11	63.7±2.1 a	-0.16
T2	90.3±0.9 a	0.78	64.1±1.7 a	0.47
T3	90.4±1.1 a	0.89	64.8±1.1 a	1.57
R1T1	92.6±1.5 ab	3.35	67.3±2.3 ab	5.49
R2T2	93.5±1.4 b	4.35	68.7±2.2 b	7.68
R3T3	93.6±1.7 b	4.46	69.0±1.4 b	8.15

同列数据后不同小写字母表示处理间在 0.05 水平显著差异。下同。

表 4 不同处理对水稻各器官 Cd 含量的影响

(mg/kg)					
处理	根	茎	叶	谷壳	糙米
CK	22.69 d	4.42 c	2.14 c	1.27 c	0.51 c
R1	17.31 c	3.80 b	1.75 b	0.93 b	0.42 ab
R2	15.40 a	3.37 a	1.57 a	0.79 a	0.39 a
R3	16.86 bc	3.69 a	1.61 a	0.87 ab	0.41 a
T1	18.77 c	3.97 b	1.82 b	0.96 b	0.48 b
T2	16.75 b	3.84 b	1.78 b	0.88 ab	0.45 b
T3	16.82 bc	3.71 ab	1.74 b	0.80 a	0.43 ab
R1T1	17.18 bc	3.67 a	1.74 a	0.89 ab	0.39 a
R2T2	15.20 a	3.33 a	1.56 a	0.72 a	0.32 a
R3T3	16.33 a	3.57 a	1.59 a	0.86 a	0.35 a

从表 3 可见,除 T1 处理外,添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥后,水稻株高及产量均增加,且部分处理增加显著。赤泥单施或配施,水稻株高及产量增加幅度较大,且与 CK 和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施处理有显著差异(低剂量除外)。虽然单施氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 后,水稻株高及产量也增加,但与 CK 无显著差异。添加量对水稻株高及产量影响较大,无论是单施还是配施,随着赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 添加量的增加,水稻株高和产量均增加。其中添加物有赤泥时,增加幅度更大,且与 CK 和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施的处理均有显著差异。

2.2 对水稻体内 Cd 含量的影响

从表 4 可知,添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥后,水稻各器官中 Cd 含量显著降低。其中,根、茎、叶、谷壳和糙米中 Cd 含量分别降低 17.27%~33.00%、10.21%~24.71%、10.21%~27.10%、26.77%~43.31% 和 6.40%~36.95%, 且以赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施时 Cd 含量降低幅度最大,其次是单施赤泥的处理。

单施赤泥时,随着赤泥用量的增加,水稻各器官中 Cd 含量先降低然后升高。与 R1 处理相比,R2 处理能显著降低水稻根、茎、叶、谷壳中 Cd 含量,R3 处理能显著降低水稻茎、叶中 Cd 含量,但糙米中 Cd 含量均无显著差异。单施氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 时,添加量对水稻体内 Cd 含量基本无显著性影响。赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施时,虽然 R2T2 处理水稻体内 Cd 含量最低,但仅根中的 Cd 含量与其他处理有显著差异,其他器官中的 Cd 含量无显著性差异。

虽然添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥能大幅度降低糙米镉含量,但所有处理糙米镉含量均超过国家粮食安全标准值,这表明当土壤 Cd 污染程度高时,通过添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥治理稻米 Cd 污染是无效的。

2.3 对镉在水稻体内转运率的影响

从表 5 可以看出,与 CK 相比,添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥后,对 Cd 在水稻各器官间的迁移转运率有较大影响。其中,根-茎和壳-米迁移转运率升高,土-根、茎-叶、茎-壳和叶-壳迁移转运率降低,叶-米和茎-米迁移转运率与添加物密切相关。当赤泥与氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施时,叶-米迁移转运率降低,赤泥与氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施时,叶-米迁移转运率升高。单施氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 时,茎-米迁移转运率升高;赤泥与氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施时,茎-米迁移转运率降低,单施赤泥时变化无规律。

不同添加物及其添加量对 Cd 在水稻各器官间的迁移转运率有显著影响,但无明显变化规律。从添加物来看,单施赤泥和单施氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 对 Cd 在水稻各器官间的迁移转运率影响无明显规律,但配施与单施的影响显著不同。配施时,Cd 在水稻各器官间的迁移转运率的增加幅度小于单施,而降低幅度大于单施。

3 讨论

添加土壤改良剂是当前稻米 Cd 污染治理的主要措施。研究发现,石灰、碳酸钙、生物炭、海泡石、蒙脱土、普钙、重钙、磷矿石、赤泥、硅酸盐、工业废弃物、微生物等土壤改良剂,都可与土壤重金属之间发生吸附、沉淀、离子交换、氧化还原等一系列反应,改变重金属在土壤中的存在形态,降低重金属的迁移性和生物有效性,减少稻米中重金属的积累量^[6,9,14]。本研究发现,

表 5 不同处理对 Cd 在水稻体内迁移转运率的影响 (%)

处理	土-根	根-茎	茎-叶	茎-壳	叶-壳	叶-米	茎-米	壳-米
CK	400.88	19.50	48.38	28.73	59.35	23.72	11.54	40.16
R1	305.83	21.93	46.11	24.47	53.14	23.89	11.05	45.16
R2	272.08	21.86	46.48	23.44	50.47	24.92	11.57	49.37
R3	297.88	21.90	43.50	23.58	54.19	25.56	11.11	47.13
T1	331.63	21.16	45.72	24.18	52.88	26.16	12.09	50.00
T2	295.94	22.94	46.43	22.92	49.32	25.47	11.72	51.14
T3	297.17	22.03	47.02	21.56	45.92	24.77	11.59	53.75
R1T1	303.53	21.36	47.41	24.25	51.15	22.41	10.63	43.82
R2T2	268.55	21.91	46.85	21.62	46.15	20.51	9.61	44.44
R3T3	288.52	21.86	44.54	24.09	54.09	22.01	9.80	40.70

添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 和赤泥后,水稻各器官中 Cd 含量均降低,这表明利用赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 治理稻米 Cd 污染是有效的。许多研究发现,赤泥降 Cd 原因是改变土壤 pH 值、改变土壤 Cd 的化学形态及降低生物有效性,从而影响水稻对 Cd 的吸收^[9-12]。本研究还发现,添加赤泥后,根-茎和壳-米迁移转运率升高,土-根、茎-叶、茎-壳和叶-壳迁移转运率都降低,且土-根、茎-壳和叶-壳迁移转运率下降幅度均远远超过根-茎迁移转运率增加幅度,茎-叶转运率下降幅度与根-茎转运率增加相近,这表明赤泥不仅能影响土壤 Cd 形态,降低水稻 Cd 的吸收;而且影响水稻体内 Cd 的化学形态,降低 Cd 在水稻体内迁移转运率,并导致稻米 Cd 含量显著降低。Ko 等^[22,27]研究发现,添加铁氧化微生物,通过氧化作用影响土壤中砷形态,从而影响其迁移转化及植物吸收。这可能是添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 后水稻体内 Cd 含量显著下降的主要原因。添加氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 会影响土壤中 Fe 的代谢转化,从而影响水稻根表铁膜的形成及其结构与厚度,改变水稻对 Cd 的吸收量,最终降低稻米 Cd 含量^[28-29]。

治理稻米 Cd 污染不仅要考虑稻米 Cd 污染的治理效果,还应考虑污染治理所需成本及潜在影响。治理效果相近时,成本越低、潜在影响越小,大面积推广价值就越高。土壤改良剂费用和潜在影响与添加量呈显著正相关,即土壤改良剂添加量越多,费用越高,潜在影响越大。因此,在保证稻米 Cd 污染治理效果的前提下,降低土壤改良剂添加量,不仅可以降低污染治理费用,而且可以减少其潜在影响,使产品具有较高的推广价值。赤泥是工业废料,氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 可通过发酵大量生产,故本研究使用的土壤改良剂成本较低。添加赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 后,水稻株高及产量均增加,且水稻株高和产量随赤泥和氧化亚铁硫

杆菌 QBS-01 添加量增加而增加,这表明赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 对水稻生长有促进作用,其潜在风险较小,这与他人研究结果一致^[24]。由此可见,本研究使用的土壤改良剂具有潜在的推广应用价值,尤其是赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施,推广应用价值更高,但赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 配施添加量增加对稻米 Cd 含量无显著影响。单施赤泥时,随着赤泥用量增加,稻米 Cd 含量先降低,然后基本不变,这表明赤泥添加量不应超过 4 000 kg/hm²。由于氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 添加量对稻米 Cd 含量无显著影响,故其添加量可为 50 L/hm²。由于赤泥呈碱性,氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 培养液呈酸性,故在配施时应适当增加时间间隔,可能治理效果更好。

本研究发现,土壤 Cd 污染是造成稻米 Cd 污染的主要原因。虽然土壤 Cd 污染严重,且大量 Cd 积累在水稻根部(空白对照水稻根部 Cd 含量比土壤高 4.01 倍),但糙米 Cd 含量却很低,分别只有土壤和根 Cd 含量的 9.01%和 2.25%,这表明土壤 Cd 对稻米 Cd 污染的贡献率较低。因此,虽然要重视土壤重金属污染治理,但不应该过分渲染及夸大土壤重金属污染对粮食食用安全性的影响,以免引起不必要的恐慌。本研究还发现,虽然添加赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 能显著降低糙米 Cd 含量,但由于土壤 Cd 污染严重,糙米 Cd 含量仍然超过国家粮食安全标准值,这表明在 Cd 镉污染严重的稻田仅通过添加土壤改良剂,很难实现稻米安全生产的目的。因此,对重金属污染程度高的稻田,仅通过添加 1~2 种土壤改良剂,很难达到稻米 Cd 污染治理的目的。因此,在治理中度以上重金属污染时,应采用多种土壤改良剂或土壤改良剂和叶面阻控剂组配施用,可提高稻米 Cd 污染治理效果,这与湖南省重金属污染耕地修复和种植结构调整试点的研究结果一致^[30]。

4 结论

添加赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 能显著降低水稻体内 Cd 含量,促进水稻生长,提高水稻产量,且二者配施效果最好。土壤改良剂施用方式不同,添加量对糙米 Cd 含量的影响也显著不同。赤泥单施时,添加量增加,糙米 Cd 含量先降低后升高;氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 单施及与赤泥配施时,添加量增加对糙米 Cd 含量无显著影响。在重度 Cd 污染稻田,利用赤泥和氧化亚铁硫杆菌 QBS-01 能显著降糙米 Cd 含量,虽然很难实现稻米达标生产,但仍具有较高的潜在应用价值。

参考文献

- [1] 马志英. “镉米”的危害风险到底有多大 [J]. 生命与灾害, 2013(6): 12-15.
- [2] 栾云霞, 陆安祥, 王纪华. 镉米问题形成原因及对策思考[J]. 农产品质量与安全, 2013(6): 49-51.
- [3] 宫靖, 张艳玲, 崔箐. “镉米”敲响警钟[N]. 民主与法制时报, 2011-02-28(C02 版).
- [4] 王凯, 徐世龙, 杨远柱. 水稻镉吸收与转运机理研究进展[J]. 作物研究, 2014, 28(8): 926-930.
- [5] Fujimaki S, Suzui N, Ishioka N S, et al. Tracing cadmium from culture to spikelet: noninvasive imaging and quantitative characterization of absorption, transport, and accumulation of cadmium in an intact rice plant [J]. *Plant Physiol*, 2010, 152(4): 1 796-1 806.
- [6] 魏益民, 魏帅, 郭波莉, 等. 含镉稻米的分布及治理技术概述[J]. 食品科学技术学报, 2013, 31(2): 1-6.
- [7] Iskandar I K, Adriano D C. Remediation of soils contaminated with metals, advances in environmental science[M]. *Science Reviews*, UK, 1997.
- [8] Knox A S, Seaman J C, Mench M J, et al. Remediation of metal- and radio nuclides-contaminated soils by in situ stabilization techniques [A]. In: Iskandar I K. *Environmental restoration of metal-contaminated soils* [C]. New York: Lewis Publishers, 2000: 21-60.
- [9] 沙乐乐. 水稻镉污染防控钝化剂和叶面阻控剂的研究与应用[D]. 武汉: 华中农业大学, 2015.
- [10] 刘昭兵, 纪雄辉, 王国祥, 等. 赤泥对 Cd 污染稻田水稻生长及吸收累积 Cd 的影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(4): 692-697.
- [11] Garau G, Castaldi P, Santona L, et al. Influence of red mud, zeolite and lime on heavy metal immobilization, culturable heterotrophic microbial populations and enzyme activities in a contaminated soil [J]. *Geoderma*, 2007, 142(1-2): 47-57.
- [12] Chuasavathi T, Bolan N S, Naidu R. Immobilization of cadmium and lead in biosolids as affected by lime, red mud, fly ash and bentonite addition [C]. 19th World Congress of Soil Science, Soil Solutions for a Changing World, 2010, 129-131.
- [13] 马智慧, 王亚娥, 李杰. 铁氧化菌特性及其在环境污染治理中的应用[J]. 环境科学与管理, 2011, 36(11): 67-71.
- [14] 田耀全, 郝汉舟, 靳孟贵, 等. 生物修复在治理土壤污染中的应用[J]. 安全与环境工程, 2006, 13(4): 30-34.
- [15] 齐巍, 王向东, 蒋文举, 等. 铁、锰氧化细菌在环境污染治理中的应用[J]. 环境污染治理技术与设备, 2004, 5(6): 76-79.
- [16] Sugio T, Taha T M, Kanao T, et al. Increase in Fe^{2+} producing activity during growth of *Acidithiobacillus ferrooxidans* ATCC23270 on sulfur[J]. *Biotechnol Biochem*, 2007, 71(11): 2 663-2 669.
- [17] Byrne J M, Klueglein N, Pearce C, et al. Redox cycling of Fe(II) and Fe(III) in magnetite by Fe-metabolizing bacteria[J]. *Science*, 2015, 347(6229): 1 473-1 476.
- [18] 张德伟, 周立祥, 杨新萍, 等. 不同底物驯化氧化亚铁硫杆菌的差异及对煤炭生物脱硫效率的影响 [J]. 环境科学, 2011, 32(1): 274-278.
- [19] 张婷, 朱能武, 许治国, 等. 一株氧化亚铁硫杆菌的分离及其浸出废旧线路板中铜的效果[J]. 环境工程学报, 2013, 7(4): 286-292.
- [20] Chen S Q, Guan Z Q, Wen Q L, et al. Bioleaching of sphalerite by *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* cultured in 9K medium modified with pyrrhotite095-7[J]. *J Cent South Univ T*, 2008, 15(4): 503-507.
- [21] Yun GL, Ming Z, Guang M, et al. Bioleaching of heavy metals from mine tailings by indigenous [J]. *Bioresource Technol*, 2008, 99(10): 4 124-4 129.
- [22] Ko M S, Park H S, Kim K W, et al. The role of *Acidithiobacillus ferrooxidans* and *Acidithiobacillus thiooxidans* in arsenic bioleaching from soil[J]. *Springer Netherlands*, 2013, 35(6): 727-733.
- [23] 范美蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 赤泥施用量对 Cd 污染稻田水稻产量和土壤生物性状的影响 [J]. 水土保持学报, 2011, 25 (6): 181-185.
- [24] 范美蓉, 罗琳, 廖育林, 等. 赤泥使用量对 Cd 污染稻田水稻生长的影响和修复机理[J]. 安全与环境学报, 2012, 12(4): 36-41.
- [25] Chamon A S, Mondol M N, Ullah S M. Amelioration of heavy metals from contaminated soils of Hazaribagh and Tejgaon areas from Bangladesh using red mud [J]. *Bangladesh J Sci Industr Res*, 2009, 44(4): 479-484.
- [26] 刘凤枝. 农业环境监测实用手册 [M]. 北京: 中国标准出版社, 2001: 97-107.
- [27] 王兆苏, 王新军, 陈学萍, 等. 微生物铁氧化作用对砷迁移转化的影响[J]. 环境科学学报, 2011, 31(2): 328-333.
- [28] 何春娥, 刘学军, 张福锁. 植物根表铁膜的形成及其营养与生态环境效应[J]. 应用生态学报, 2004, 15(6): 1 069-1 073.
- [29] 傅友强, 于智卫, 蔡昆争, 等. 水稻根表铁膜形成机制及其生态环境效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(6): 1 527-1 534.
- [30] 张振中, 杨娟. 长株潭稻米镉污染防控技术取得新进展[N]. 农民日报, 2015-03-31(2 版).

(下转第 79 页)

- [2] 杨亚军,徐红星,郑许松,等.中国水稻纵卷叶螟防控技术进展[J]. 植物保护学报,2015,42(5):691-701.
- [3] 刘某承,白艳莹,曹智,等.稻田病虫害生态防控模式及其在西南地区的应用[J]. 中国生态农业学报,2012,20(6):734-738.
- [4] 林拥军,华红霞,何予卿,等.水稻褐飞虱综合治理研究与示范——农业公益性行业专项“水稻褐飞虱综合防控技术研究”进展[J]. 应用昆虫学报,2011,48(5):194-201.
- [5] 郭田,王刘庆,廖美德. PS04 菌株对水稻纹枯病的防效及对水稻 2 种防御性酶活性的诱导[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2013,41(6):98-102.
- [6] 廖美德,楚娟娟,徐汉虹. PS04 菌株的抗真菌活性[J]. 长江大学学报 B:自然科学版,2008,5(1):59-63.
- [7] 蹇华丽,田文祥,杨幼慧,等. 多粘类芽孢杆菌 PS04 胞外多糖分子结构研究[J]. 食品工业科技,2014,35(8):114-117.

Effect of *Bacillus Polymyxa* PS04 Secretions on the Growth and Grass Suppression of Allelopathic Rice

LI Qi¹, YUAN Liangming¹, LIN Fangyuan², HU Fei^{1*}

(¹ College of Agriculture, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China; ² Xinhui Agricultural and Forestry Bureau, Jiangmen, Guangdong 529000, China; *Corresponding author: hufei@scau.edu.cn)

Abstract: In order to study the effects of *bacillus polymyxa* PS04 secretions on the growth and herbicidal effect of allelopathic rice seedlings, The authors set six different concentrations of PS04 secretions (0, 1/100, 1/150, 1/200, 1/250 and 1/300 volumetric ratio) to soak seeds and spray leaves, respectively, using Huagandao 3 and Hualiangyou 78 as materials. And under 28°C and 22°C, investigated the effects of PS04 secretions on allelopathic rice and on the growth of barnyardgrass after mixed planting allelopathic rice and barnyardgrass, respectively. The results showed that soaking seeds of Huagandao 3 and spraying leaves of Hualiangyou 78 at the 1/300 concentration of PS04 secretions at 28°C could improve the growth of two kinds allelopathic rices, but not impact its function of inhibition of grass. And at 22°C, using 1/200, 1/250 and 1/300 concentration of PS04 secretions to spray the leaves Hualiangyou 78 improved its growth, and decreased the barnyardgrass survival rates; 1/100 and 1/250 concentration of PS04 secretions soaked seeds and 1/250 concentration of PS04 secretions sprayed leaves or soaked seeds + sprayed leaves, which improved the growth of Huagandao 3, and also significantly impacted the growth of barnyardgrass mixed planting with Huagandao 3. PS04 secretions could promote the growth of allelopathic rice seedlings and enhance its inhibition of barnyardgrass.

Key words: allelopathic rice; PS04 polysaccharide; weed suppression effect

·····
(上接第 72 页)

Effects of *Thiobacillus Ferrooxidans* QBS-01 and Red Mud on Cadmium Concentration in Rice

WEI Xiangdong¹, ZOU Huiling^{1,2}, FANG Yayu¹, YIN Xiaohui¹, CHEN Nan¹, YANG Deng¹, ZHANG Hao¹

(¹ College of Resource and Environment, Hunan Agricultural University / Southern Collaborative Innovation Center of Heavy Metals Pollution Control of Paddy Fields, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; ² Library of Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 1st author: xiangdongw@126.com)

Abstract: In order to find *Thiobacillus ferrooxidans* QBS-01 and red mud used to control cadmium pollution in rice grains, the effects of their addition amount and method of fertilizing on the cadmium contents in rice grains and transportation in rice were studied by pot experiment. The results showed that the plant height and yield of rice increased after *T. ferrooxidans* QBS-01 and red mud added, while the cadmium contents in root, stem, leaves, chaff and brown rice decreased significantly. Reduction degree of cadmium contents in root, stem, leaves, chaff and brown rice were in order combined application of *T. ferrooxidans* QBS-01 and red mud, single application of red mud and single application of *T. ferrooxidans* QBS-01, and the optimal treatment was R2T2. When single application of red mud, with the amount increased, the contents of cadmium in brown rice decreased first and then increased. However, there had no significant effects with single application of *T. ferrooxidans* QBS-01 and combined with red mud. Although the cadmium contents in brown rice decreased significantly when *T. ferrooxidans* QBS-01 and red mud added, it is still higher than the national limitation standard of cadmium in brown rice because of heavy pollution of Cd in paddy soils, which showed it is difficult to achieve the aim of safety in rice production using *T. ferrooxidans* QBS-01 and red mud at rice paddy with heavy cadmium pollution.

Key words: *Thiobacillus ferrooxidans* QBS-01; red mud; rice; cadmium; addition method; addition amount