

张志鹏,蔡燕飞,段继贤,等. 生物改良剂在修复水稻镉污染上的应用研究[J]. 江苏农业科学,2020,48(14):274-278.

doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.14.051

# 生物改良剂在修复水稻镉污染上的应用研究

张志鹏<sup>1,2</sup>, 蔡燕飞<sup>1</sup>, 段继贤<sup>2</sup>, 王宗抗<sup>2</sup>, 吴书凤<sup>2</sup>, 魏浩<sup>2</sup>

(1. 华南农业大学资源环境学院, 广东广州 510642; 2. 深圳市芭田生态工程股份有限公司博士后工作站, 广东深圳 518105)

**摘要:**为了探究生物改良剂在修复水稻镉污染中的应用效果,选取早稻品种株优 819 为研究对象,通过田间试验对其修复水稻镉污染能力和促生能力进行评价。共设置 2 个试验点,每个试点 3 个试验组,分别为常规施肥组、常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组、常规施肥 + 生物改良剂 600 kg/hm<sup>2</sup> 组,测定各组中水稻的株高、茎粗、叶宽、根粗、主根长、单株次生根数量、各小区单收单打测产、稻米中的镉含量和秸秆中的镉含量,对比各试验组间的差异。结果表明,施用生物改良剂后,水稻的株高、茎粗、叶宽、主根长、根粗和单株次生根数量相比常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组和常规施肥组均有显著提升。在产量上,相比常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组和常规施肥组,施用生物改良剂后分别增加了 6.33% ~ 7.59% 和 7.71% ~ 7.81%。同时,施用生物改良剂还能有效降低水稻植株和稻米中的镉含量,相比于常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组和常规施肥组,稻米中的镉含量分别下降 30.43% ~ 36.00%,水稻秸秆中的镉含量分别下降 32.80% ~ 35.80%。综上所述,施用生物改良剂能够有效促进水稻生长,显著提高水稻产量,降低水稻植株及稻米中的镉含量,修复水稻镉污染。

**关键词:** 镉污染; 水稻; 生物改良剂; 生物修复; 增产

**中图分类号:** X53      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1002-1302(2020)14-0274-04

近年来随着经济的快速发展,工业化进程加速,我国的土壤重金属污染问题也越来越严重。与其他重金属相比,镉的毒性较高,污染的范围较大,且极易被植物吸收利用,被称为“五毒之首”<sup>[1]</sup>。水稻是世界第二大粮食作物,也是我国第一大粮食作物,其糙米成分与人体健康密切相关<sup>[2]</sup>。而水稻被认为是易于吸收镉的大宗类作物之一,稻米镉污染问题对粮食生产安全造成了严重威胁<sup>[3-7]</sup>。因此,采用有效措施来降低稻米内镉含量是目前土壤、环境科学等领域的研究热点。

湖南省不仅被誉为我国著名的“鱼米之乡”,还是闻名于世的“有色重金属之乡”。有色重金属采集冶炼等工业快速发展的同时,也带来了许多污染问题,其中镉污染问题最为突出<sup>[8-11]</sup>。湖南省作为我国的农业大省,拥有广大的水稻种植面积,在我国的粮食安全中占有重要地位<sup>[12]</sup>。水稻作为高镉

积累的农作物品种,受镉污染影响较大。调查表明,湖南省各地市场的大米样品中,镉的平均含量为 0.28 mg/kg<sup>[9]</sup>。周全等的研究表明,镉浓度为 0.01 mg/kg 时可以促进水稻生长;但当镉含量超过一定浓度时,就会抑制水稻的生长和发育,直观表现为水稻矮小、叶片发黄,水稻根系生长受抑制,水稻分蘖数减少,整个植株生物量下降<sup>[13]</sup>。镉超过一定浓度后,水稻的生殖生长会受到抑制,导致水稻成熟期推迟,结实率、千粒质量降低,产量减少或绝产<sup>[14-17]</sup>。高浓度镉还能抑制种子中蛋白酶、淀粉酶等的活性,从而抑制种子内蛋白质和淀粉的分解,影响种子的萌发<sup>[18]</sup>。镉浓度水平高时,还会抑制水稻的光合作用和呼吸作用<sup>[19]</sup>。镉对水稻生长的抑制作用在不同品种中也存在差异,在同等镉胁迫污染条件下,不同水稻品种生长的受抑制程度不同。彭鸥等研究表明,在镉胁迫下,水稻生长的不同时期对镉的积累速率不同,分蘖期和乳熟期水稻积累镉的速率较快<sup>[20]</sup>。现阶段镉污染的治理主要有农艺措施,物理、化学及生物治理等方法<sup>[21-23]</sup>。其中生物修复中的微生物修复作为一种可持续发挥作用的修复方式,可使被污染的环境恢复至自然状态,具有长期的环境效益和成本效益<sup>[24]</sup>。杨卓等通过添加 2 种细菌(胶质芽孢杆菌、巨大芽孢杆菌)的

收稿日期:2020-02-10

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200402);深圳市芭田生态工程股份有限公司博士后工作站项目。

作者简介:张志鹏(1990—),男,黑龙江鹤岗人,博士,工程师,研究方向为微生物菌剂的开发与利用。E-mail:250895327@qq.com。

通信作者:蔡燕飞,博士,教授,研究方向为微生物菌剂的开发与利用。E-mail:yanfeicai@scau.edu.cn。

混合物,产生有机酸并且促进有效态磷、钾的释放,使土壤中有有效态镉含量增加了 15.02%,同时也增加了印度芥菜的生物量,使印度芥菜地上部分中的镉含量与对照组相比增加了 17.93%<sup>[25]</sup>。贾莹等研究发现了 4 种菌株均能产生低分子量有机酸从而降低油菜中的镉含量,其中反硝化利斯特氏菌、环状芽孢杆菌、格氏利斯特氏菌均能有效增强土壤镉的活化,使土壤有效态镉含量分别增加 25.9%、59.2%、41.9%,油菜地上部的镉含量与对照相比增加 26.8%、48.8%、65.9%<sup>[26]</sup>。由此可见,生物改良剂作为一种无污染可持续发展的绿色肥料,不仅可以改良修复土壤,还可以促进植物生长。因此,应加强生物改良剂新技术的研发及推广,提高农田的综合生产力,为我国绿色农业的可持续稳定发展提供积极作用。

本研究从湖南省湘潭市雨湖区姜畲镇重金属污染土壤中,筛选出 1 株抗镉枯草芽孢杆菌,并将其与现有胶冻样芽孢杆菌进行组合,研发出一款生物改良剂。为探究该生物改良剂在修复水稻镉污染上的应用效果,进行田间试验验证。本研究以早稻品种株优 819 为研究对象,共设置 2 个试验点,每个试点设 3 个试验组,分别为常规施肥组、常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组和常规施肥 + 生物改良剂 600 kg/hm<sup>2</sup> 组,测定各组中水稻的株高、茎粗、叶宽、根粗、主根长、单株次生根数量、各小区单收单打测产、稻米中的镉含量和秸秆中的镉含量,对比各试验组间的差异,分析该生物改良剂的修复水稻镉污染能力和促生能力。根据田间试验的数据结果,评价该生物改良剂在修复水稻镉污染上的应用效果,旨在为今后大面积示范推广和产品登记提供一定的理论依据和研究基础。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试作物为水稻,品种均为优株 819。供试生物改良剂由北京世纪阿姆斯生物技术有限公司提供,产品形态为固体颗粒,生物改良剂中包含菌种为枯草芽孢杆菌、胶冻样类芽孢杆菌,有效活菌数  $\geq 1.0$  亿个/g。复合肥(N:P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>:K<sub>2</sub>O = 34:45:56)。本试验于 2018 年 3 月 15 日至 8 月 15 日在湖南省湘潭市雨湖区姜畲镇设置 A、B 2 个试验点,土壤理化性状如表 1 所示。

表 1 试验点土壤养分基本情况

试验点	pH 值	有机质含量 (g/kg)	速效氮含量 (mg/kg)	速效磷含量 (mg/kg)	速效钾含量 (mg/kg)
A	6.1	39.2	113.1	21.2	156.4
B	6.2	34.5	117.4	20.4	151.8

### 1.2 试验方法

试验共设置 3 个处理组,每个处理组 3 次重复。每个处理小区面积 24 m<sup>2</sup>,各小区随机排列,具体试验设计为处理 a,常规施肥 + 生物改良剂 600 kg/hm<sup>2</sup>;处理 b,常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup>;处理 c,常规施肥。

使用方法:生物修复剂于土壤翻耕前一次性施入(水稻移栽前 1 周以上),然后施用基肥,翻耕后充分耕匀,移栽水稻秧苗。

田间管理采用露天种植,期间 2 个试验点的田间管理及水肥管理措施相同。水稻成熟后,测定水稻的株高、茎粗、叶宽、根粗、主根长、单株次生根数量、各小区单收单打测产、稻米中的镉含量和秸秆中的镉含量,稻米及植株样品采用微波消解后用 ICP-MS 进行重金属含量的测定,数据结果取平均值。试验数据采用 SPSS Statistics 15.0 软件进行处理分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同处理对水稻生物学性状的影响

不同处理对水稻生物学性状影响的结果如表 2 所示。数据表明施用生物改良剂能显著促进水稻的生长发育。在试验点 A 中,处理 a 相比于处理 b、处理 c,株高分别增加 7.93、8.92 cm;茎粗分别增加 1.08、1.09 mm;单株次生根分别增加 6、8 条;叶宽分别增加 8.83、8.29 mm;主根长分别增加 3.81、3.57 mm;根粗分别增加 0.17、0.25 mm。试验点 B 中,处理 a 相比于处理 b、处理 c,株高分别增加 6.31、6.61 cm;单株次生根分别增加 4、5 条;茎粗分别增加 0.51、0.52 mm;叶宽分别增加 2.55、3.10 mm;主根长分别增加 2.07、2.17 mm;根粗分别增加 0.12、0.10 mm。

### 2.2 不同处理对水稻产量的影响

各小区单打单收测产结果如表 3 所示。从产量构成因素看,试验点 A 和 B 中,处理 a 与其他处理相比,水稻穗数及穗粒数都多。从产量结果看,在试验点 A 中,处理 a 水稻施用生物改良剂后,其产

表 2 不同处理对水稻生物学性状的影响

试验点	处理	株高 (cm)	单株次生根数量 (个)	茎粗 (mm)	叶宽 (mm)	主根长 (cm)	根粗 (mm)	叶色
A	a	103.55 ± 1.67b	26 ± 1.00b	6.87 ± 0.09b	104.14 ± 1.15b	24.46 ± 1.15b	0.95 ± 0.06b	浓绿
	b	95.62 ± 1.97a	20 ± 1.00a	5.79 ± 0.07a	95.31 ± 2.06a	20.65 ± 1.16a	0.78 ± 0.05a	淡黄
	c	94.63 ± 3.50a	18 ± 2.00a	5.78 ± 0.22a	95.85 ± 2.46a	20.89 ± 1.06a	0.70 ± 0.10a	淡黄
B	a	101.83 ± 1.53b	22 ± 1.00b	6.25 ± 0.07b	98.87 ± 0.94b	21.93 ± 0.83b	0.98 ± 0.03b	浓绿
	b	95.52 ± 1.60a	18 ± 1.00a	5.74 ± 0.08a	96.32 ± 1.22a	19.86 ± 0.70a	0.86 ± 0.05a	淡黄
	c	95.22 ± 0.20a	17 ± 2.00a	5.73 ± 0.13a	95.77 ± 0.63a	19.76 ± 0.71a	0.88 ± 0.05a	淡黄

注:同列数据后不同小写字母表示差异显著( $P < 0.05$ )。表 3、表 5 同。

量比处理 b、处理 c 分别增加 461.55、547.20 kg/hm<sup>2</sup>,  
增产率分别为 6.33%、7.59%。在试验点 B 中,处  
理 a 水稻施用生物改良剂后,其产量比处理 b、处理  
c 分别增加 562.35、568.95 kg/hm<sup>2</sup>,增产率分别为

7.71%、7.81%。结果表明,施用生物改良剂能够有  
效提升水稻的穗数及穗粒数,增加水稻的产量,实  
现水稻的增产增收。

表 3 不同处理对水稻产量的影响

试验点	处理	穗数 (穗/m <sup>2</sup> )	穗粒数 (粒/穗)	千粒质量 (g)	产量 (kg/hm <sup>2</sup> )	增产 (kg/hm <sup>2</sup> )	增产率 (%)
A	a	365	87	24.75	7 755.90b	—	—
	b	345	84	24.38	7 294.35a	461.55	6.33
	c	342	85	24.25	7 208.70a	547.20	7.59
B	a	361	85	24.50	7 851.75b	—	—
	b	340	81	24.83	7 289.40a	562.35	7.71
	c	341	82	24.75	7 282.80a	568.95	7.81

2.3 各处理方差分析

对 2 个试验点的产量进行方差分析,结果如表  
4 所示。试验点 A 的方差分析结果表明,重复间  
 $F = 0.38 \leq F_{0.05} = 6.94$ ,说明重复间差异不显著,试  
验安排合理;处理间  $F = 48.47 \geq F_{0.01} = 18.0$ ,处理

间差异达极显著水平,说明增产效果呈极显著差  
异。试验点 B 的方差分析结果表明,重复间  $F =$   
 $0.41 \leq F_{0.05} = 6.94$ ,说明重复间差异不显著,试  
验安排合理;处理间  $F = 373.43 \geq F_{0.01} = 18.0$ ,处理  
间差异达极显著水平,说明增产效果呈极显著差异。

表 4 不同处理间水稻产量的方差分析

试验点	变异来源	自由度	平方和	均方	F 值	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
A	重复间	2	18.11	9.05	0.38	6.94	18.0
	处理间	2	2 310.19	1 155.09	48.74	6.94	18.0
	误差	4	94.80	23.70			
	总变异	8	2 423.10				
B	重复间	2	3.14	1.57	0.41	6.94	18.0
	处理间	2	2 844.88	1 422.44	373.43	6.94	18.0
	误差	4	15.24	3.81			
	总变异	8	2 863.25				

2.4 不同处理对水稻中重金属镉含量的影响

生物改良剂修复水稻镉污染的结果如表 5 所  
示。数据表明,在试验点 A 和 B 中,相比于处理 b、  
处理 c,处理 a 均能显著降低水稻秸秆和稻米中的  
镉含量。其中试验点 A 中处理 a 与处理 b、处理 c

相比,稻米中的镉含量分别下降了 33.3%、36.0%,  
水稻秸秆中的镉含量分别下降了 32.8%、34.8%;  
试验点 B 中处理 a 与处理 b、处理 c 相比,稻米中的  
镉含量分别下降了 30.43%、33.30%,水稻秸秆中的  
镉含量分别下降了 33.84%、35.80%。

表 5 不同处理对水稻中重金属镉含量的影响

试验点	处理	稻米中镉含量 (mg/kg)	水稻秸秆中镉含量 (mg/kg)
A	a	0.16b	0.88b
	b	0.24a	1.31a
	c	0.25a	1.35a
B	a	0.16b	0.86b
	b	0.23a	1.30a
	c	0.24a	1.34a

### 3 讨论与结论

生物改良剂中的微生物对重金属的治理主要分为 2 个方面:一是利用微生物对重金属的亲附作用,将其转化为低毒产物,从而降低污染程度,虽然微生物修复法中,生物不能直接降解重金属,但可以改变重金属的理化特性,进而影响重金属迁移与转化;二是利用菌根对重金属进行修复,主要包括真菌、固氮菌和放线菌等<sup>[27]</sup>。Kuroda 等利用细胞表面展示技术,将酵母金属硫蛋白串联体表达在酵母细胞表面,使得酵母细胞吸附重金属的能力大大提高<sup>[28]</sup>。研究发现,施用百泰微生物菌剂后能够显著提高糙米率、碱消值、蛋白质含量和质量指数,降低水稻对镉、汞、砷、钙、锌等元素的吸收<sup>[29]</sup>。已有研究表明,在对湖南地区晚稻进行田间随机区组试验中,相较对照组,施用微生物菌剂处理,其谷壳、糙米中镉含量降低幅度分别为 65.52%、69.57%<sup>[30]</sup>。上述研究成果与本试验结果相似。本研究发现,施用生物改良剂能显著降低水稻中的镉含量,其中水稻秸秆中镉含量降低 32.80% ~ 35.80%,稻米中的镉含量降低了 30.43% ~ 36.00%。同时,富含有益微生物的生物改良剂能够提高土壤供肥能力,增强根系活力,改善植物的营养,促进矿质营养释放,协助养分吸收,刺激植株生长,减少病虫害,使作物增产,对水稻各项生育指标均有较好影响。本研究中,施用生物改良剂后,试点 A 与试点 B 中水稻的株高、茎粗、叶宽、根粗、主根长、单株次生根数量均显著高于常规施肥组和常规施肥 + 生石灰 1 200 kg/hm<sup>2</sup> 组,增产率可 6.33% ~ 7.81%。

综上所述,施用生物改良剂能显著降低水稻秸秆及稻米中的镉含量,同时还可促进水稻生长,提高水稻产量,表明该生物改良剂在修复水稻镉污染促进水稻增产上具有良好的开发潜力和应用前景,适合大面积推广。

### 参考文献:

- [1] Chaney R L, Philip G R, James A R, et al. An improved understanding of soil Cd risk to humans and low cost methods to phytoextract Cd from contaminated soils to prevent soil Cd risks[J]. *BioMetals*, 2004, 17(5): 549 – 553.
- [2] 胡培松. 土壤有毒重金属镉毒害及镉低积累型水稻筛选与改良[J]. *中国稻米*, 2004, 10(2): 10 – 12.
- [3] 詹杰, 魏树和, 牛荣成. 我国稻田土壤镉污染现状及安全生产新措施[J]. *农业环境科学学报*, 2012, 31(7): 1257 – 1263.
- [4] 宋文恩, 陈世宝, 唐杰伟. 稻田生态系统中镉污染及环境风险管理[J]. *农业环境科学学报*, 2014, 33(9): 1669 – 1678.
- [5] Zhao F J, Ma Y B, Zhu Y G, et al. Soil contamination in China: current status and mitigation strategies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(2): 750 – 759.
- [6] Hu Y, Cheng H, Tao S. The challenges and solutions for cadmium – contaminated rice in China: a critical review [J]. *Environment International*, 2016, 92 – 93: 515 – 532.
- [7] Hui L, Na L, Yan W L, et al. Cadmium in rice: transport mechanisms, influencing factors, and minimizing measures [J]. *Environmental Pollution*, 2017, 224: 622 – 630.
- [8] 雷鸣, 曾敏, 郑袁明, 等. 湖南采矿区和冶炼区水稻土重金属污染及其潜在风险评价[J]. *环境科学学报*, 2008, 28(6): 1212 – 1220.
- [9] 雷鸣, 曾敏, 王利红, 等. 湖南市场和污染区稻米中 As, Pb, Cd 污染及其健康风险评价[J]. *环境科学学报*, 2010, 30(11): 2314 – 2320.
- [10] 周艳华, 黄卫, 李涛. 应对湖南省稻米重金属污染的技术对策研究[J]. *粮食与油脂*, 2018, 31(5): 79 – 81.
- [11] 文金花. 湖南省重金属镉污染农田状况及其防治措施[J]. *农业科技与信息*, 2016(20): 102.
- [12] 黄道友, 朱奇宏, 朱捍华, 等. 重金属污染耕地农业安全利用研究进展与展望[J]. *农业现代化研究*, 2018, 39(6): 1030 – 1043.
- [13] 周全, 王宏, 张迎信, 等. 不同 Cd 浓度处理下水稻植株镉含量变化及其镉调控相关基因表达分析[J]. *中国水稻科学*, 2016, 30(4): 380 – 388.
- [14] Lin H M, Fang C X, Li Y Z, et al. Effect of Silicon on grain yield of rice under cadmium – stress [J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2016, 38(7): 1 – 13.
- [15] Ding L, Dai B L, Zeng X X, et al. Reduction of heavy metal Cadmium accumulation in rice grains [J]. *Journal of Bionanoscience*, 2015, 9(5): 383 – 388.
- [16] Zeng L, Liao M, Huang C, et al. Effects of Cd contamination on paddy soil microbial biomass and enzyme activities and rice physiological indices [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2005, 16(11): 2162 – 2167.
- [17] Cao F B, Cai Y E, Liu L, et al. Differences in photosynthesis, yield and grain Cadmium accumulation as affected by exogenous Cadmium and glutathione in the two rice genotypes [J]. *Plant Growth Regulation*, 2015, 75(3): 715 – 723.

詹红林,葛静,程江峰,等.内生菌定殖水稻对稻田土壤中毒死蜱降解的影响[J].江苏农业科学,2020,48(14):278-282.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2020.14.052

# 内生菌定殖水稻对稻田土壤中毒死蜱降解的影响

詹红林<sup>1,2</sup>,葛静<sup>2</sup>,程江峰<sup>1</sup>,余向阳<sup>2</sup>

(1. 青岛科技大学海洋科学与生物工程学院,山东青岛 266042; 2. 江苏省农业科学院农产品质量安全与营养研究所,江苏南京 210014)

**摘要:**研究了1株具有毒死蜱降解活性的巨大芽孢杆菌(*Bacillus megaterium*) DGB定殖水稻后对水稻及种植土壤中毒死蜱降解的影响。在低浓度和高浓度毒死蜱处理的土壤中,接菌水稻生物量相比对照分别增加了22.1%和17.3%;在试验前期接菌水稻中毒死蜱残留量要显著高于对照组,后期差异逐渐减小。与对照相比,接菌水稻种植的低与高2个处理土壤中中毒死蜱残留分别减少了27.6%和43.9%,半衰期分别由11 d和10.8 d降至9.6 d和8.1 d。结果表明,该内生菌定殖水稻能够显著促进土壤中毒死蜱的降解,同时对水稻生长也有一定的增益。

**关键词:**内生菌;毒死蜱;水稻;土壤;生物修复;农药残留

**中图分类号:** X592 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2020)14-0278-05

毒死蜱(chlopyrifos)是一种广谱性有机磷类杀虫剂。自20世纪60年代以来,毒死蜱广泛用于农业和城市害虫的防治<sup>[1]</sup>。2014年对浙江省绍兴市部分蔬菜基地及农贸市场各类蔬菜进行抽检的结果中毒死蜱的农残超标率达到77.8%,其中以青菜、芹菜等叶菜类蔬菜为主<sup>[2]</sup>。2016年对江西省内

16个龙牙百合基地鲜百合进行抽检,其中毒死蜱的检出率为10%<sup>[3]</sup>。已有研究表明,毒死蜱能够在多种动植物体内富集<sup>[4]</sup>,对人的神经系统和脑发育也有着潜在危害<sup>[5-6]</sup>,毒死蜱还与癌症的发生有关,长期接触可能会增加患肺癌的概率<sup>[7-8]</sup>。毒死蜱在农田土壤及水体中的残留会对地表水和地下水造成污染。稻田系统又是作物系统中比较特殊的一类,稻田农药更容易通过径流、渗滤等途径进入到水体环境中,因此,修复农田环境中的农药残留对整个生态环境都有非常重要的意义。

生物修复是一种利用微生物降解污染物的修复手段,是一种可靠、经济有效的环境污染治理方法。不同微生物间的合作甚至能够将污染物完全

收稿日期:2020-04-28

基金项目:国家自然科学基金面上项目(编号:31872002)。

作者简介:詹红林(1994—),男,江西九江人,硕士研究生,主要从事微生物、植物与环境污染研究。E-mail:1426417856@qq.com。  
通信作者:余向阳,博士,研究员,主要从事农产品质量安全与营养品质评价研究,E-mail:yuxy@jaas.ac.cn;程江峰,博士,副教授,主要从事食品生物技术与食品安全研究,E-mail:chengjiangfeng@qust.edu.cn。

[18]何俊瑜,任艳芳.镉胁迫对水稻种子萌发、幼苗生长和淀粉酶活性的影响[J].华北农学报,2008,23(增刊1):131-134.

[19]韩明明,胡凡,王凯,等.不同外源生长素对镉胁迫水稻根系生长的影响[J].农业科学与技术(英文版),2010,11(7):45-48.

[20]彭欧,铁柏清,叶长城,等.稻米镉关键积累时期研究[J].农业资源与环境学报,2017,34(3):272-279.

[21]夏立江,王宏康.土壤污染及其防治[M].上海:华东理工大学出版社,2001.

[22]顾继光,周启星,王新.土壤重金属污染的治理途径及其研究进展[J].应用基础与工程科学学报,2003,11(2):143-151.

[23]徐良将,张明礼,杨浩.土壤重金属镉污染的生物修复技术研究进展[J].南京师大学报(自然科学版),2011,34(1):102-106.

[24]Dixit R, Wasiullah, Malaviya D, et al. Bioremediation of heavy metals from Soil and aquatic environment: an overview of principles and criteria of fundamental processes[J]. Sustainability, 2015, 7

(2):2189-2212.

[25]杨卓,李术娜,李博文,等.接种微生物对土壤中Cd、Pb、Zn生物有效性的影响[J].土壤学报,2009,46(4):670-675.

[26]贾莹,李博文,芦小军,等.接种微生物对油菜吸收Cd效果的影响研究[J].生态环境学报,2010,19(4):813-816.

[27]张军,蒯亚青,胡方洁,等.土壤重金属污染联合修复技术研究进展[J].应用化工,2018,47(5):1038-1042,1047.

[28]Kuroda K, Ueda M. Effective display of metallothionein tandem repeats on the bioadsorption of Cadmium ion[J]. Applied Microbiology and Biotechnology, 2006, 70(4):458-463.

[29]曹海鑫,杨凯,杨超,等.百泰微生物菌剂在不同施氮量条件下对北方粳稻米质的影响[J].农业与技术,2016,36(15):44-45,52.

[30]张森,叶长城,喻理,等.矿物硅肥与微生物菌剂对水稻吸收积累镉的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(4):627-633.