

刘利杉, 黄运湘, 黄楚瑜, 等. 水溶性有机肥料对水稻产量和镉吸收的影响[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(5):826–831.

LIU Li-shan, HUANG Yun-xiang, HUANG Chu-yu, et al. Effects of water-soluble organic fertilizer on yield of rice grain and cadmium absorption in rice grain and straw[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(5):826–831.

水溶性有机肥料对水稻产量和镉吸收的影响

刘利杉¹, 黄运湘^{1*}, 黄楚瑜², 满海燕¹

(1.湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 2.海南省琼海市农业科学研究所, 海南 琼海 571429)

摘要:采用土壤盆栽试验研究水溶性有机肥料对水稻抗氧化酶活性及镉吸收的影响。结果表明:施用水溶性有机肥料可提高稻谷产量, 显著降低水稻孕穗期叶片超氧化物歧化酶(SOD)、灌浆期超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性;降低稻米镉含量, 降低率为2.9%~21.5%, 提高稻草镉含量, 提高率为26.8%~99.1%。以750倍稀释液喷施增产幅度最大, 达43.1%, 基施(0.16 mL·kg⁻¹)配合喷施(750倍稀释液)处理稻米降镉率最高。

关键词:镉污染土壤; 水溶性有机肥料; 水稻产量; 抗氧化酶; 稻米镉含量

中图分类号:S511 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2017)05-0826-06 **doi:**10.11654/jaes.2016-1509

Effects of water-soluble organic fertilizer on yield of rice grain and cadmium absorption in rice grain and straw

LIU Li-shan¹, HUANG Yun-xiang^{1*}, HUANG Chu-yu², MAN Hai-yan¹

(1.College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2.Agricultural Science Research Institute of Qionghai, Hainan Province, Qionghai 571429, China)

Abstract: A pot experiment was conducted to study the effects of water-soluble organic fertilizer on antioxidant enzyme activities in flag leaves and the absorption of cadmium (Cd) in rice grain and straw. The results showed that the yield of rice grain was increased, and the activity of SOD at the early booting stage (BBCH 41) and SOD, POD at the early milk stage (BBCH 73) were decreased significantly after applying water-soluble organic fertilizer. The Cd concentration in rice grain reduced by 2.9%~21.5%, while the Cd concentration in straw enhanced by 26.8%~99.1%. The treatment of foliar application 750 times diluted water-soluble organic fertilizer caused the highest increase of rice grain yield up to 43.1%, and the Cd content in rice grain decreased to lowest concentration after the same foliar application combined with basal 0.16 mL·kg⁻¹ water-soluble organic fertilizer.

Keywords: cadmium contaminated soil; water-soluble organic fertilizer; yield of rice grain; antioxidant enzyme; cadmium concentration in rice grain

镉是目前备受关注的环境元素之一, 已成为我国农田重金属污染元素之首^[1], 并对粮食生产及食品安全构成威胁, 影响人类健康^[2-3]。镉胁迫会诱使植株内的-O₂⁻、-OH⁻、H₂O₂等自由基过量累积, 引起SOD、POD、CAT等一系列抗活性氧伤害保护酶的应激反应, 当抗氧化酶系统的消除速度无法与活性氧自由基的累积速度保持平衡时, 将引发细胞膜脂质的过氧化

作用, 对植株造成不可逆转的伤害和细胞凋亡^[4], 从而导致作物正常生长受阻, 产量和品质下降。如何修复和治理镉污染已成为当前迫切需要解决的环境问题。土壤镉污染治理和修复方法很多, 相比单一的物理^[5]、化学^[6-8]、生物措施^[9-10], 农业生态修复措施具有更长远的生态价值和推广性。农业生态修复包括合理施肥、土地利用转型、合适的耕作制度和低吸收作物品种的

收稿日期: 2016-11-27

作者简介: 刘利杉(1992—), 女, 湖南宁乡人, 硕士研究生, 主要从事土壤肥力与土壤环境污染控制研究。E-mail: 632386510@qq.com

* 通信作者: 黄运湘 E-mail: yxhuang63@163.com

推广等^[11]。这些措施操作简便,成本低,且基本不改变修复区种植习惯,可以充分发挥农田生态系统的自我修复能力^[12]。刘秀珍等^[13]通过不同用量的猪粪、鸡粪、羊粪等有机肥降镉试验发现,有机肥可通过腐殖质等对 Cd^{2+} 的螯合作用来降低土壤中水溶态和交换态镉含量,3 种有机肥以中等浓度 ($0.30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 猪粪效果最好。汤海涛等^[14]研究表明,施用有机叶面肥可有效降低稻谷镉含量,减少重金属对水稻可食用部分的污染。广西喷施宝公司生产的水溶性有机肥料富含腐植酸,可显著提高作物产量和品质,增强作物对病虫害的抗性,已在江西^[15]、湖南等 20 多个省(市)进行了大面积推广应用,但在修复镉污染土壤及降低稻米镉含量方面未见报道。本文采用土壤盆栽试验的方法,研究和探讨水溶性有机肥料对水稻镉吸收的影响,以期对镉污染土壤的生态修复提供理论依据和修复材料。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

供试土壤采自湖南省某市,系紫色页岩风化物发育的紫泥田,取样深度 0~20 cm,土壤采回后经自然风干、锤碎、过 5 mm 筛,混合均匀,供盆栽试验用。土壤基本理化性质为:pH 6.31,有机质 $63.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全氮 $2.63 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全磷 $0.785 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,全钾 $14.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,碱解氮 $173 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效磷 $16.7 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,速效钾 $103 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,全 Cd $4.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,有效态 Cd $2.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

1.2 供试水稻品种

湘早籼 45 号,为湖南省益阳市农科所选育的常规中熟早籼品种,全生育期 106 d 左右。

1.3 水溶性有机肥料

由广西喷施宝股份有限公司提供,主要成分:有机质 $\geq 110 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{N}+\text{P}_2\text{O}_5+\text{K}_2\text{O} \geq 170 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $\text{Mn}+\text{Zn}+\text{B}=30\sim 50 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,Cd、Pb 未检出。

1.4 土壤盆栽试验

试验共设 7 个处理,以施用满足水稻正常生长的氮磷钾肥为对照,在施用氮磷钾肥的基础上进行叶面喷施、基施、喷施+基施水溶性有机肥料(WSOF),每处理重复 6 次。具体试验设计见表 1。

土壤盆栽试验于湖南农业大学资源环境学院教学实习基地进行。选择高 22 cm、直径 22.5 cm 的塑料盆,每盆装土 6 kg,按每千克土施 N 0.10 g、P 0.05 g、K 0.13 g 计算,N、P、K 分别以尿素、磷酸二氢钾、氯化钾为肥源,全部作基肥施用。2014 年 4 月 18 日,选择长势一致的秧苗移栽至盆中,每盆移栽 3 株,根据水稻

表 1 土壤盆栽试验设计

Table 1 The design of potted experiment

处理编号	处理代码	处理方法
1	CK	NPK+喷施清水
2	P750	NPK+喷施 WSOF 750 倍稀释液
3	P500	NPK+喷施 WSOF 500 倍稀释液
4	J0.08	NPK+基施 WSOF $0.08 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$
5	J0.16	NPK+基施 WSOF $0.16 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$
6	J0.08+P500	NPK+基施 WSOF $0.08 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ +喷施 WSOF 500 倍稀释液
7	J0.16+P750	NPK+基施 WSOF $0.16 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ +喷施 WSOF 750 倍稀释液

注:WSOF 代表水溶性有机肥料,由广西喷施宝公司提供。

Note:WSOF indicate the water-soluble organic fertilizer,provided by the company of Guangxi Penshibao.

生长特性进行田间管理。

作基肥施用的水溶性有机肥料在土壤装盆时和 N、P、K 肥一起施入土壤;叶面喷施的水溶性有机肥料分别于 2014 年 5 月 18 日(始穗期)、6 月 17 日(始穗期)、7 月 3 日(灌浆期)分 3 次进行喷施,每处理喷施体积相等,保证正反叶面完全湿润。

1.5 取样与分析测定

分别于水稻孕穗期和灌浆期取水稻剑叶测定叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性。7 月 26 日分盆收获稻草和稻谷,同时采集土壤样品。水稻带回室内进行考种和测产,经烘干粉碎后待用。土样自然风干后粉碎过筛。

1.5.1 酶活性测定

SOD 活性采用 NBT 法,POD 活性采用愈创木酚比色法,CAT 活性采用紫外分光光度法测定^[16]。

1.5.2 植株 Cd 含量的测定

植株 Cd 含量采用 $\text{HNO}_3\text{--HClO}_4$ 湿法消化,Perkinelmer 公司生产的 Iptima 8300 电感耦合等离子体发射光谱仪测定。标准物质采用中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所提供的绿茶,标准号为 GBW10052(GBS-30)。

1.5.3 土壤基本理化性状及全 Cd 含量的测定

土壤基本理化性状采用文献[17]的方法测定。土壤全量 Cd 采用 $\text{HCl--HNO}_3\text{--HClO}_4\text{--HF}$ 消解,电感耦合等离子体发射光谱仪测定(Iptima 8300),标准物质采用北京市环境保护监测中心提供的污染农田土壤,标准号为 GBW 08303。

1.6 数据处理

所有试验数据采用 SPSS 13.0 进行统计分析,

Duncan 新复极差法进行差异显著性检验。

2 结果与分析

2.1 不同处理对水稻经济性状的影响

从表 2 可知,基施和喷施水溶性有机肥料均能提高稻谷产量和千粒重,降低草谷比。喷施 750 倍和 500 倍稀释液,千粒重显著高于对照,草谷比与对照相比未达显著差异水平;喷施 750 倍稀释液,谷粒总重显著高于对照,500 倍稀释液则未达显著差异水平。基施 0.08 mL·kg⁻¹ 和 0.16 mL·kg⁻¹ 水溶性有机肥料,谷粒总重和草谷比与对照相比均未达显著差异水平,基施 0.16 mL·kg⁻¹ 水溶性有机肥料,千粒重显著高于对照,基施 0.08 mL·kg⁻¹ 则未达显著差异水平。基施 0.16 mL·kg⁻¹ 配合喷施 750 倍水溶性有机肥料,千粒重和谷粒总重均显著高于对照,但草谷比未达显著差异水平;基施 0.08 mL·kg⁻¹ 配合喷施 500 倍液,千粒重、谷粒总重和草谷比均未达显著差异水平。

表 2 水溶性有机肥料对水稻经济性状的影响

Table 2 Effects of water-soluble organic fertilizer on economic characters of rice

处理编号	千粒重/g	谷粒总重/g·盆 ⁻¹	草谷比
1	19.8±1.13b	44.8±4.61b	0.90±0.38a
2	21.6±0.70a	64.1±10.92a	0.83±0.40a
3	21.7±0.40a	47.5±11.36ab	0.89±0.20a
4	21.0±0.87ab	48.1±3.84ab	0.84±0.88a
5	22.2±0.16a	61.4±0.85ab	0.76±0.52a
6	21.2±1.23ab	60.9±12.59ab	0.82±0.74a
7	21.5±1.38a	63.4±9.38a	0.77±0.70a

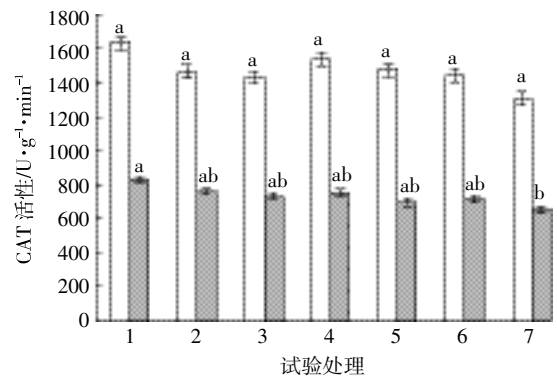
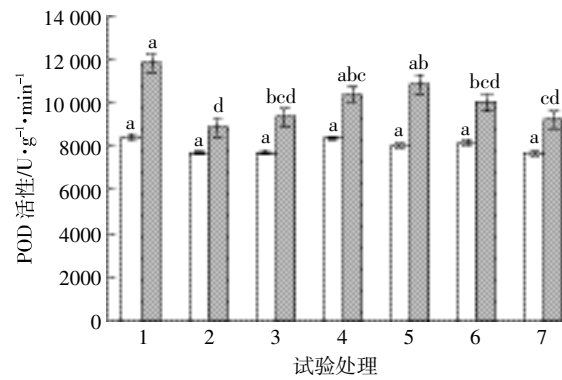
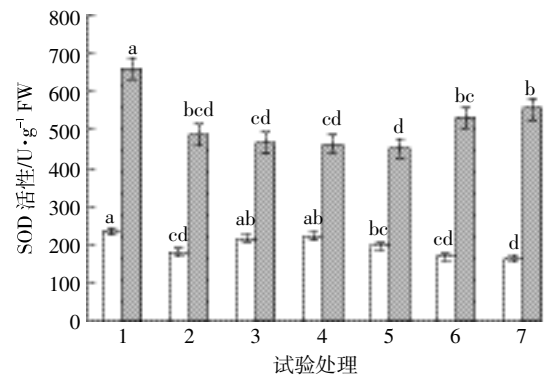
注:同列数据后不同小写字母表示各处理间差异达 5% 显著水平。下同。

Note: Different letters indicate significant differences at 5% level. The same below.

2.2 不同处理对水稻抗氧化酶活性的影响

通过对水稻孕穗期和灌浆期叶片酶活性的测定表明(图 1),施用水溶性有机肥料,水稻孕穗期和灌浆期叶片 SOD、POD、CAT 活性均低于对照,其中 SOD 差异显著,CAT 差异不显著,POD 在孕穗期差异不显著,灌浆期差异显著。

随着水稻的生长发育,从孕穗期到灌浆期,水稻叶片 SOD、POD 活性升高,上升幅度分别为 108%~238%和 14.3%~40.0%,CAT 活性降低,下降幅度达 48.0%~53.2%,表明水稻在生育后期通过提高 SOD 和 POD 活性,增强抗氧化能力以抑制其衰老,有利于光



□ 孕穗期 ■ 灌浆期

柱上不同小写字母表示各处理间差异达 5% 显著水平

Different letters indicate significant differences at 5% level

图 1 水溶性有机肥料对水稻剑叶抗氧化酶活性的影响

Figure 1 Effects of water-soluble organic fertilizer on antioxidant enzyme activities in flag leaves of rice

合产物的运转和稻谷产量的提高。

2.3 不同处理对水稻 Cd 吸收和分布的影响

由表 3 可知,喷施和基施水溶性有机肥料均可降低稻米 Cd 含量,但均未达显著水平,稻米 Cd 含量超过国家安全标准(0.2 mg·kg⁻¹)。喷施处理(750 倍和 500 倍液)稻米 Cd 降低率为 19.3%和 17.8%,基施处理(0.08 mL·kg⁻¹ 和 0.16 mL·kg⁻¹)稻米 Cd 降低率为 2.9%和 15.0%,基施配合喷施处理稻米 Cd 降低率为

10.2%和 21.5%,以基施 $0.16 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 配合喷施 750 倍液处理稻米 Cd 含量降低幅度最大。

喷施和基施水溶性有机肥料,稻草 Cd 含量均高于对照,提高率为 26.8%~99.1%。同一试验处理,稻草 Cd 含量显著高于稻米,是稻米的 7.8~19.7 倍。表明施用水溶性有机肥料可提高水稻对 Cd 的吸收,同时减少 Cd 向稻米转移。

表 3 水溶性有机肥料对稻米和稻草 Cd 含量的影响

Table 3 Effects of water-soluble organic fertilizer on cadmium concentration of rice grain and straw

处理编号	稻米 Cd/mg·kg ⁻¹	稻草 Cd/mg·kg ⁻¹
1	0.274±0.03a	2.13±0.03b
2	0.221±0.03a	2.96±0.24b
3	0.225±0.04a	2.86±0.10b
4	0.266±0.09a	2.70±0.71b
5	0.233±0.02a	2.75±0.18b
6	0.246±0.08a	3.03±0.38b
7	0.215±0.02a	4.24±0.10a

3 讨论

大量研究表明,施用有机肥可有效提高作物产量^[18-19]。李先等^[20]、Zhao 等^[21]通过使用有机肥部分替代化肥试验表明,施用有机肥可显著提高水稻产量,有效减少化肥的使用量。本试验采用的水溶性有机肥料,由植物源腐植酸配合大、中量及微量元素浓缩而成,能平衡调节作物生长发育、改善品质并提高产量,多次使用可减少化肥使用量 20%~40%,作物增产 10%~40%^[15]。本研究结果表明,基施或喷施水溶性有机肥料均可提高稻谷产量,喷施以 750 倍稀释液效果最好。500 倍稀释液因有机质浓度偏高,可能对叶面产生一定的伤害作用,故增产效果不明显。基施以 $0.16 \text{ mL} \cdot \text{kg}^{-1}$ 处理稻谷产量最高。本试验供试的水溶性有机肥料,不仅含有一定量的有机质,还含有作物生长发育的必需营养元素,对提高作物产量具有促进作用,故基施数量增加,水稻增产幅度提高。

SOD、POD、CAT 是细胞抵御活性氧伤害保护酶系统的主要组成部分。水稻在正常生长条件下,植株内的抗氧化酶与自由基的代谢基本维持平衡,而逆境或者衰老将会打破这种平衡,引起一系列抗氧化酶活性的变化。当植物受到 Cd 胁迫时,可通过诱导抗氧化酶活性的变化来保护植物免受逆境伤害,但因品种及作物的抗性而异^[22-25]。史静等^[23]研究表明,当外界

Cd 浓度达到 $25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,不论是低镉品种还是高镉品种均未受到明显的毒害作用,水稻本身仍具备缓解 Cd 胁迫的功能;周利强等^[26]研究表明,施用菜籽饼、猪粪等有机肥可通过增强根系清除超氧自由基的能力来缓解水稻剑叶受到的镉胁迫,与对照相比水稻剑叶 SOD 活性降低,水稻总生物量增加;周爽等^[27]研究表明,施用有机肥可缓解 Cd 对马铃薯的胁迫,降低 SOD、POD 的活性;冯圣东等^[28]研究表明,在 Hg 污染土壤中,增施有机肥可有效减少 SOD、POD 的下降幅度,提高葡萄的抗逆性。本研究供试土壤全量 Cd 和有效态 Cd 含量高达 $4.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $2.59 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,喷施和基施水溶性有机肥料,水稻孕穗期和灌浆期叶片 CAT、SOD、POD 活性均低于对照,并未启动抗氧化酶系统来应对逆境的胁迫,表明水溶性有机肥料增强了水稻的抗逆能力,减缓了 Cd 胁迫的伤害,可保证其正常生长发育,从而实现增产。

有机质含大量官能团和较大的比表面积,可强力吸附土壤中的 Cd,腐植酸等大分子物质可与土壤中 Cd 形成螯合物,限制 Cd 的移动性^[29],富里酸等小分子物质可与土壤中 Cd 形成溶解度较大的络合物,增加土壤 Cd 的有效性^[30-31]。张丽娜等^[32]研究表明,施用有机肥可通过降低土壤中有效态 Cd 含量来减少植株对 Cd 的吸收,从而降低水稻茎叶和糙米中 Cd 含量。但也有报道指出施用有机肥可提高土壤 Cd 的有效性^[33-34]。本研究表明,施用水溶性有机肥料增加了水稻对土壤 Cd 的吸收,稻草 Cd 含量较对照提高了 26.8%~99.1%,可能是施用水溶性有机肥料,提高了水稻的生理活性,增强了水稻的吸收能力,从而增加了对 Cd 的吸收量。此外,可能与水溶性有机肥中含有一定浓度的 Zn^{2+} 和有机质等有关,Zn 是 Cd 的同族元素,是土壤中 Cd 吸附位点的主要竞争者, Zn^{2+} 进入土壤溶液会与 Cd^{2+} 竞争土壤的吸附位点,促进吸附态 Cd 的解析,增加土壤溶液中有效态 Cd 含量。水溶性有机肥料与普通有机肥料相比,有机质含量较低,且以小分子的富里酸为主,对养分元素和重金属均有一定的活化能力。

水稻根系吸收的 Cd 会随着生育期的延长部分转移至茎叶,并最终进入籽粒中,糙米 Cd 含量主要取决于水稻植株吸 Cd 量和茎叶 Cd 向籽粒转移的效率^[35]。索炎炎等^[36]研究表明,在 $2.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下,施用锌肥增加了茎秆、叶片和糙米 Cd 含量,而在 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 处理下,施用锌肥增加了茎秆和叶片 Cd 含量,却减少了糙米 Cd 含量。本研究表明,基施和喷

施水溶性有机肥料, 稻米 Cd 含量较对照降低 2.9%~21.5%, 其原因可能是植株吸收的 Zn^{2+} 阻碍了稻草中的 Cd 向稻米转移。这与索炎炎等^[36]的试验结果一致, 其机理更值得深入探讨和研究。

4 结论

(1) 供试土壤条件下, 基施和喷施水溶性有机肥料均能提高稻谷产量和千粒重, 降低草谷比。由于基施用量远大于喷施, 从经济效益角度出发, 最适宜的喷施浓度为 750 倍稀释液。

(2) 供试土壤条件下, 喷施和基施水溶性有机肥料可降低水稻孕穗期和灌浆期叶片 SOD、POD、CAT 活性, 增强水稻的抗逆能力, 阻止镉胁迫的伤害。

(3) 喷施和基施水溶性有机肥料会促进水稻对 Cd 的吸收, 提高了稻草 Cd 含量, 却阻止 Cd 向籽粒中转移, 降低了稻米 Cd 含量。

参考文献:

- [1] 环境保护部. 环境保护部和国土资源部发布全国土壤污染状况调查公报[EB/OL] [2017-02-15]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm
Ministry of Environmental Protection. A communiqué of national soil pollution investigation reported by ministry of environmental protection and land and resources[EB/OL][2017-02-15]. http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201404/t20140417_270670.htm
- [2] Kumbar S K. Cadmium poisoning[2017-02-15]. <http://eco.neterec.co.in/>.
- [3] Mathilde C, Aminata T, Guillaume G, et al. Effects of environmental cadmium and lead exposure on adults neighboring a discharge: Evidences of adverse health effects[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206: 247-255.
- [4] Zhang F Q, Wang Y S, Lou Z P, et al. Effect of heavy metal stress on antioxidant enzymes and lipid peroxidation in leaves and roots of two mangrove plant seedlings (*Kandelia candel* and *Bruguiera gymnorrhiza*) [J]. *Chemosphere*, 2007, 67(1): 44-50.
- [5] 王 岩, 成杰民. 重金属污染农田土地整理技术研究[J]. 环境科学与技术, 2012, 35(5): 164-168.
WANG Yan, CHENG Jie-min. Rehabilitation of farm land contaminated by heavy metal: A case study of land consolidation[J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 35(5): 164-168.
- [6] 李 平, 王兴祥, 郎 漫, 等. 改良剂对 Cu、Cd 污染土壤重金属形态转化的影响[J]. 中国环境科学, 2012, 32(7): 1241-1249.
LI Ping, WANG Xing-xiang, LANG Man, et al. Effects of amendments on the fraction transform of heavy metals in soil contaminated by copper and cadmium[J]. *China Environmental Science*, 2012, 32(7): 1241-1249.
- [7] Shawabkeh R, Al-Harashsheh A, Hami M, et al. Conversion of oil shale ash into zeolite for cadmium and lead removal from wastewater[J]. *Fuel*, 2004, 83(7): 981-985.
- [8] Tan W N, Li Z A, Qiu J, et al. Lime and phosphate could reduce cadmium uptake by five vegetables commonly grown in South China[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(2): 223-229.
- [9] 李 云, 张世熔, 张少卿, 等. 野苘蒿对镉的富集及其镉耐性[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(7): 1296-1302.
LI Yun, ZHANG Shi-rong, ZHANG Shao-qing, et al. Cadmium tolerance and accumulation characteristics of *crassocephalum crepidioides* [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(7): 1296-1302.
- [10] Kashem M A, Singh B R, Kubota H, et al. Assessing the potential of *Arabidopsis halleri* ssp. *gemma* as a new cadmium hyperaccumulator grown in hydroponics[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2007, 87(3): 499-502.
- [11] 佟洪金, 涂仕华, 赵秀兰. 土壤重金属污染的治理措施[J]. 西南农业学报, 2003, 16(增刊): 33-37.
TONG Hong-jin, TU Shi-hua, ZHAO Xiu-lan. Countermeasure technology in heavy metal contaminated soils[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 16(Suppl): 33-37.
- [12] 马铁铮, 马友华, 徐露露, 等. 农田土壤重金属污染的农业生态修复技术[J]. 农业资源与环境学报, 2013, 30(5): 39-43.
MA Tie-zheng, MA You-hua, XU Lu-lu, et al. Agro-ecological remediation technologies on heavy metal contamination in cropland soils[J]. *Journal Agricultural Resources and Environment*, 2013, 30(5): 39-43.
- [13] 刘秀珍, 马志宏, 赵兴杰. 不同有机肥对镉污染土壤镉形态及小麦抗性的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(3): 243-252.
LIU Xiu-zhen, MA Zhi-hong, ZHAO Xing-jie. Effect of different organic manure on cadmium form of soil and resistance of wheat in cadmium contaminated soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(3): 243-252.
- [14] 汤海涛, 李卫东, 孙玉桃, 等. 不同叶面肥对轻度重金属污染稻田水稻重金属积累调控效果研究[J]. 湖南农业科学, 2013(1): 40-44.
TANG Hai-tao, LI Wei-dong, SUN Yu-tao, et al. Controlling effects of different foliar fertilizers on heavy metal accumulation in rice plant in mild heavy metal polluted paddy field[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 2013(1): 40-44.
- [15] 王 勇, 万晓梅, 毛平丰, 等. 不同浓度喷施宝叶面肥在早稻上的应用效果研究[J]. 现代农业科技, 2012(10): 290.
WANG Yong, WAN Xiao-mei, MAO Ping-feng, et al. Effects of application different concentrations foliar fertilizer Panshibao on early rice [J]. *Resource and Environmental Sciences*, 2012(10): 290.
- [16] 邹 琦. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
ZOU Qi. Plant physiology experiment instruction[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [17] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
BAO Shi-dan. Soil agro-chemical analysis[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [18] Yang J, Gao W, Ren S R. Long-term effects of combined application of chemical nitrogen with organic materials on crop yields, soil organic carbon and total nitrogen in fluvo-aquic soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 151: 67-74.
- [19] Ma Y H, Gu D J, Liu L J, et al. Changes in grain yield of rice and emis-

- sion of greenhouse gases from paddy fields after application of organic fertilizers made from maize straw[J]. *Rice Science*, 2014, 21(4):224–232.
- [20] 李先, 刘强, 荣湘民, 等. 有机肥对水稻产量和品质及氮肥利用率的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2010, 36(3):258–262.
- LI Xian, LIU Qiang, RONG Xiang-min, et al. Effects of organic fertilizers on yield and quality of rice grains and nitrogen use efficiency[J]. *Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences)*, 2010, 36(3):258–262.
- [21] Zhao J, Ni T, Li J, et al. Effects of organic-inorganic compound fertilizer with reduced chemical fertilizer application on crop yields, soil biological activity and bacterial community structure in a rice-wheat cropping system[J]. *Applied Soil Ecology*, 2016, 99:1–12.
- [22] 何俊瑜, 王阳阳, 任艳芳, 等. 镉胁迫对不同水稻品种幼苗根系形态和生理特性的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(5):1863–1868.
- HE Jun-yu, WANG Yang-yang, REN Yan-fang, et al. Effect of cadmium on root morphology and physiological characteristics of rice seedlings[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(5):1863–1868.
- [23] 史静, 潘根兴, 夏运生, 等. 镉胁迫对两品种水稻生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 生态环境学报, 2013, 22(5):832–837.
- SHI Jing, PAN Gen-xing, XIA Yun-sheng, et al. Effects of Cd on different rice growth and antioxidant enzyme system[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22(5):832–837.
- [24] Fornazier R F, Ferreira R R, Vitoria A P, et al. Effects of cadmium on antioxidant enzyme activities in sugarcane[J]. *Biologia Plantarum*, 2002, 45(1):91–97.
- [25] 章秀福, 王丹英, 褚开富, 等. 镉胁迫下水稻 SOD 活性和 MDA 含量的变化及其基因型差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(2):194–198.
- ZHANG Xiu-fu, WANG Dan-ying, CHU Kai-fu, et al. Changes of SOD activity and MDA content in rice exposed to Cd stress as affected by genotype[J]. *Chinese J Rice Sci*, 2006, 20(2):194–198.
- [26] 周利强, 吴龙华, 骆永明, 等. 有机物料对低积累水稻品种始穗期抗氧化酶活性和重金属积累的影响[J]. 土壤, 2013, 45(3):506–512.
- ZHOU Li-qiang, WU Long-hua, LUO Yong-ming, et al. Effects of different organic amendments on antioxidant enzyme activities and heavy metal uptakes of a low grain Cd accumulation rice cultivar at initial stage of panicle emerging[J]. *Soil*, 2013, 45(3):506–512.
- [27] 周爽, 白瑞琴, 张海勃. 重金属 Cd 及施肥对马铃薯抗氧化酶系统的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2012, 26(9):88–92.
- ZHOU Shuang, BAI Rui-qin, ZHANG Hai-bo. The effect of cadmium and fertilization on antioxidant enzyme systems of potato[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2012, 26(9):88–92.
- [28] 冯圣东, 王伟, 石维, 等. 施用有机肥对 Hg 胁迫葡萄叶片生化特性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(2):288–293.
- FENG Sheng-dong, WANG Wei, SHI Wei, et al. Effects of organic fertilizer on physiological characteristics of grape leaves under Hg stress[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(2):288–293.
- [29] 丁疆华, 温琰茂, 舒强. 土壤环境中镉、锌形态转化的探讨[J]. 城市环境与城市生态, 2001, 14(2):47–49.
- DING Jiang-hua, WEN Yan-mao, SHU Qiang. Fraction transformation of cadmium and zinc in soils[J]. *Urban Environment & Urban Ecology*, 2001, 14(2):47–49.
- [30] Fischer F, Bipp H P. Removal of heavy metals from soil components and soils by natural chelating agents: II. Soil extraction by sugar acids[J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 2002, 138(1):271–288.
- [31] Li T Q, Di Z Z, Yang X E, et al. Effects of dissolved organic matter from the rhizosphere of the hyperaccumulator *Sedum alfredii* on sorption of zinc and cadmium by different soils[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2011, 192(3):1616–1622.
- [32] 张丽娜, 宗良纲, 沈振国. 有机肥和生态肥对土壤中镉行为以及水稻生长的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(6):1182–1186.
- ZHANG Li-na, ZONG Liang-gang, SHEN Zhen-guo. Effects of organic fertilizer and ecological fertilizer on cadmium in soil and the growth of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(6):1182–1186.
- [33] Wu L H, Tan C Y, Liu L, et al. Cadmium bioavailability in surface soils receiving long-term application of inorganic fertilizers and pig manure[J]. *Geoderma*, 2012, 173:224–230.
- [34] Borggaard O K, Holm P E, Jensen J K, et al. Cleaning heavy metal contaminated soil with soluble humic substances instead of synthetic polycarboxylic acids[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica, Section B-Soil & Plant Science*, 2011, 61(6):577–581.
- [35] 王凯荣, 龚惠群. 不同生育期镉胁迫对两种水稻的生长、镉吸收及糙米镉含量的影响[J]. 生态环境, 2006, 15(6):1197–1203.
- WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Effects of cadmium exposures in different stages on plant growth, Cd uptake and Cd concentrations in brown rice of a hybrid and conventional rice variety[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2006, 15(6):1197–1203.
- [36] 索炎炎, 吴士文, 朱骏杰, 等. 叶面喷施锌肥对不同镉水平下水稻产量及元素含量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2012, 38(4):449–458.
- SUO Yan-yan, WU Shi-wen, ZHU Jun-jie, et al. Effects of foliar Zn application on rice yield and element contents under different levels[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric & Life Sci)*, 2012, 38(4):449–458.