

水稻土镉污染与水稻镉含量相关性研究

赵 雄¹, 李福燕², 张冬明², 漆智平²

(1.海南大学, 海南 儋州 571737; 2.中国热带农业科学院热带作物品种资源研究所, 农业部热带作物种质资源利用重点开放实验室, 海南 儋州 571737)

摘 要:采用盆栽试验的方法,考察了水稻土中重金属镉(Cd)的浓度对水稻生长及 Cd 富集的影响以及 Cd 在水稻植株的分布情况,并进一步研究了糙米(可食部位)对 Cd 的富集量与土壤中 Cd 总量的关系。结果表明,在各个浓度 Cd 胁迫下,根、茎叶、稻壳、糙米相比,2 个品种水稻都是根累积的 Cd 含量要高于茎叶和稻壳、糙米,即根>茎叶>稻壳>糙米;在水稻的茎叶细胞中,Cd 主要分布在细胞壁,细胞可溶性成分,细胞器 Cd 的分布量较少,即细胞壁>可溶性部分>细胞器及膜部分;随 Cd 浓度增加,茎叶中的 Cd 积累量极显著增加,各细胞组分中的 Cd 含量均显著增加;根据国标 GB 2762—2005 对大米中 Cd 的限量标准($\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),水稻土土壤总 Cd 临界值分别为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (博优 225)、 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (矮糯)。因此,在污染土壤上宜选种食用部位重金属积累低的水稻品种,以减少人类吸收重金属的风险。

关键词:水稻土;Cd;水稻;分布;含量;相关性

中图分类号:X171.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1672-2043(2009)11-2236-05

Relationship Between Paddy Soils Cadmium Pollution and Cadmium Content in Rice

ZHAO Xiong¹, LI Fu-yan², ZHANG Dong-ming², QI Zhi-ping²

(1.Hainan University, Danzhou 571737, China; 2.Tropical Crops Genetic Resources Institute, Chinese Academy of Tropical Agricultural Sciences / Key Laboratory of Tropical Crops Germplasm Resources Utilization, Ministry of Agriculture, Danzhou 571737, China)

Abstract: Cadmium(Cd) is important contaminants in agricultural soil and threatening agriculture and human health. With the development of industry and agriculture, the soil heavy metal cadmium pollution becomes more and more serious. In this study, two high-yielding rice cultivars currently used in the local production, Boyou 225, Short glutinous treated with five levels of cadmium in a pot experiment was conducted to study the correlation between Cd accumulation of brown rice and that of paddy soils. Results showed that cadmium was not distributed uniformly in each part of rice plants. Most of the absorbed Cd assembled in the root, the upper, the less. The law of distribution of Cd in different organs of rice was: root > stem > rice husk > kernels. In rice roots and stems and leaves, cadmium was mainly distributed in the cell wall. Soluble components of cells, cell distribution of low cadmium. That is, F1(Cell wall)> F3(soluble part)> F2(cell organelles and membrane part). The rice varieties exhibited the genetic character on the Cadmium accumulation. The Cadmium contents of the grains increased with the increasing Cd concentration in soil. According to the state limit of cadmium in rice, the standard(GB 2762-2005), Content $\leq 0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. In this study, tropical paddy soil total Cd threshold were Boyou225(Cd total)= $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$; Short glutinous(Cd total)= $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. Therefore, for reducing the risk of the humanity to heavy metal, the rice varieties with the low capability of accumulating heavy metal in grains could be planted in a polluted soil.

Keywords: paddy soil; cadmium; rice; distribution; content; relevance

存在于空气、土壤和水体中的重金属,可对生物有机体产生严重的影响,而在食物链中的生物富集更

具危险性^[1]。其中,Cd 是广泛存在于自然界的一种重金属元素,在一定浓度范围内,Cd 对植物显示出比其他重金属更大的毒性^[2]。当作物组织中的 Cd 积累到一定水平时,就会出现毒害症状,包括抑制作物地上部各器官的生长发育,导致作物生长迟缓、褪绿、矮化、产量下降,抑制种子萌发和根系生长,影响作物食用品质等症^[3-5],严重时甚至会导致作物死亡^[6]。研究表明,Cd 污染地区居民的死亡率及癌症罹患率同非

收稿日期:2009-03-16

基金项目:海南省重点科技计划项目(080402);海南省自然科学基金项目(808197);中央级公益性科研院所基本科研业务费专项资金(YJS-2008-S038)

作者简介:赵 雄(1984—),男,贵州六盘水人,硕士研究生。

E-mail:pupae@126.com

通讯作者:漆智平

污染地区相比均呈上升的趋势^[7-8]。

水稻(*Oryza sativa* Linnaeus)是我国第一大作物,种植面积大、产量高、分布范围广,大部分人每天以稻米为主食。稻米的质量安全 and 无公害生产将牵涉到大多数人的健康和安全,在国内外已经引起高度重视。最近提出了通过土壤-作物污染物迁移分配模型^[9-10],结合食物结构进行人类污染物的食物摄取的风险评价措施是十分迫切的任务。

本文采取向空白土壤中添加不同梯度浓度 Cd 的方式,形成具有不同 Cd 浓度梯度的盆栽土,就土壤中 Cd 浓度对水稻生长、影响以及重金属 Cd 在水稻植株中的分布趋势进行研究,并深入研究水稻可食部位(糙米)对 Cd 的富集量与土壤中 Cd 含量的关系,以期水稻生产中重金属 Cd 安全控制技术体系 and 安全性评价技术体系的建立提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验处理设计

供试土壤采自海南省儋州市中国热带农业科学院品种资源研究所十队基地,为花岗岩母质发育的潯育型水稻土。土壤的基本性质见表 1。于 2008 年 5 月采集耕作层(0~20 cm)土壤,经风干、磨碎、过 1 cm 孔径筛。设 6 个加 Cd 水平处理,分别为 0(对照)、1.0、2.0、4.0、8.0 和 10.0 mg·kg⁻¹,Cd 试剂为 CdCl₂·2.5H₂O。每个处理设 5 个重复,完全随机设计。按 N:P₂O₅:K₂O=1:1:1(质量比)施入基肥并浇水使土壤润湿,放置平衡 2 周,用于盆栽试验。

盆栽试验在网室内进行。供试水稻品种为矮糯与博优 225。选取苗龄 15 d 生长一致的水稻秧苗,于 2008 年 6 月移栽,整个生长过程用自来水浇灌,盆中保持 3~5 cm 水层,其他管理同常规大田生产。2008 年 10 月收获植株并进行各项指标的分析。

1.2 测定分析方法

1.2.1 土壤与植物样品中 Cd 含量测定

植物收获后分别用自来水和蒸馏水洗净,105℃杀青 20 min,60℃烘干,称干重、磨碎。植物样品采用 HNO₃-HClO₄ 湿消化法^[11],AA370MC 原子吸收分光光度法测定 Cd 含量;土壤采用 HF-HClO₄-HNO₃ 消煮

法,AA370MC 原子吸收分光光度法测定 Cd 含量。以国家标准物质 GBW07604(GSV-3)为内标控制分析质量。

1.2.2 细胞各部分 Cd 含量测定

采用差速离心法分离不同的细胞组分,再用原子吸收分光光度法测定 Cd 含量^[12]。提取剂由 0.25 mol·L⁻¹ 蔗糖、50 mmol·L⁻¹ 的 Tris-HCl (pH7.5)、1.0 mmol·L⁻¹ 二硫赤鲜糖醇(DTE)和 5.0 mmol·L⁻¹ 抗坏血酸(AsA)组成。称 0.200 g 样品,液氮匀浆于 50 mL 的塑料离心管中,加入 20 mL 提取剂,缓慢振荡 1 h,3 000×g 离心 5 min。重复 2 次。沉淀用作细胞壁及未破碎残渣组分(F1)Cd 含量的测定;3 次上清液合并 20 000×g 离心 45 min,上清液用于可溶性组分(F3)Cd 含量的测定,沉淀用于细胞膜组分(F2)Cd 含量的测定。全部操作在 4℃下进行。每步离心前用缓冲液补充至同一体积,所得残渣和沉淀供分析测定。上清液或沉淀分别移入 150 mL 的三角瓶杯中,电热板上蒸发至近干,加入 15 mL 混合酸(硝酸:高氯酸=4:1,V:V),于电炉上消煮至澄清,定容,以提取液作空白,原子吸收分光光度法测定 Cd 含量。

2 结果与分析

2.1 水稻的生长状况以及不同器官对 Cd 的富集

从图 1 可以看出,随着 Cd 处理浓度的增加,水稻地上部、根系的 Cd 含量都明显升高,且 Cd 主要残留在根系中。

就积累总量而言,在各个 Cd 浓度胁迫下,根、茎叶、稻壳、糙米相比,两个品种水稻都是根累积的 Cd 含量要高于茎叶和稻壳、糙米,即根>茎叶>稻壳>糙米。两个品种间比较,在低浓度的 Cd 胁迫下(1 和 2 mg·kg⁻¹),矮糯品种根系中的 Cd 浓度要高于博优 225 品种;而在高浓度 Cd 胁迫下(4、8 和 10 mg·kg⁻¹),博优 225 品种根系中 Cd 浓度要高于矮糯品种。其余情况下,矮糯中各部位 Cd 含量均低于博优 225。

2.2 Cd 在水稻茎叶中的亚细胞分配

由图 2、图 3 可见,Cd 矮糯与博优 225 品种水稻茎叶各细胞组分中 Cd 的分配量明显受 Cd 处理浓度影响,随处理浓度的增加,各组分中 Cd 分布量差异

表 1 供试土壤的基本理化性状

Table 1 Basic properties of the test soil

土壤类型	养分含量/g·kg ⁻¹				养分含量/mg·kg ⁻¹			CEC/cmole·kg ⁻¹	Cd/mg·kg ⁻¹	pH
	有机质	全氮	全磷	全钾	速效磷	速效钾	碱解氮			
潯育型水稻土	19.70	0.70	0.15	15.92	3.62	40.23	54.63	0.587	0.15	4.59

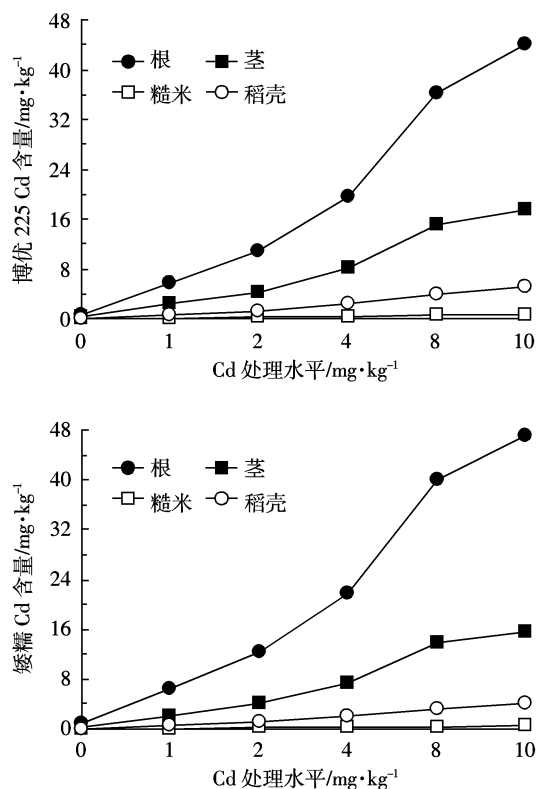


图 1 Cd 在 2 种水稻体内的分布

Figure 1 The distribution of cadmium in the rice

均极显著增加。Cd 处理下矮糯与博优 225 品种水稻茎叶细胞中 Cd 主要分布在细胞壁上 (>60%)。随着 Cd 处理浓度的增加,矮糯与博优 225 品种茎叶细胞细胞壁 Cd 吸附量相对降低,而细胞内可溶性部分和细胞器及膜部分中的 Cd 含量相对增加,且细胞壁和可溶性部分中积累的 Cd 之和约占整个根细胞的 90%以上。总体而言,茎叶细胞各组分中的 Cd 含量(或分配比例)均以细胞壁吸附的 Cd 最多,其次为可溶性部分,细胞器及膜部分最少。

矮糯与博优 225 品种水稻不仅茎叶细胞中的 Cd 积累量存在差异,而且在不同 Cd 处理浓度下 Cd 亚细胞分布也有不同,低 Cd 浓度下(0、2 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),Cd 在矮糯水稻茎叶细胞细胞壁中分配比例有所减少,且低于博优 225,而可溶性部分分配的比例增加;但在较高处理浓度下,矮糯细胞壁 Cd 所占的比例大于博优 225 品种水稻,而可溶性部分则小于博优 225 品种的比例。

两品种水稻在低 Cd 处理时,矮糯细胞内细胞器和细胞壁中的 Cd 绝对含量低于博优 225 相应细胞组分的 Cd 含量;在高 Cd 处理下,矮糯和博优 225 细胞壁部分 Cd 绝对含量均无明显差异,前者细胞器部

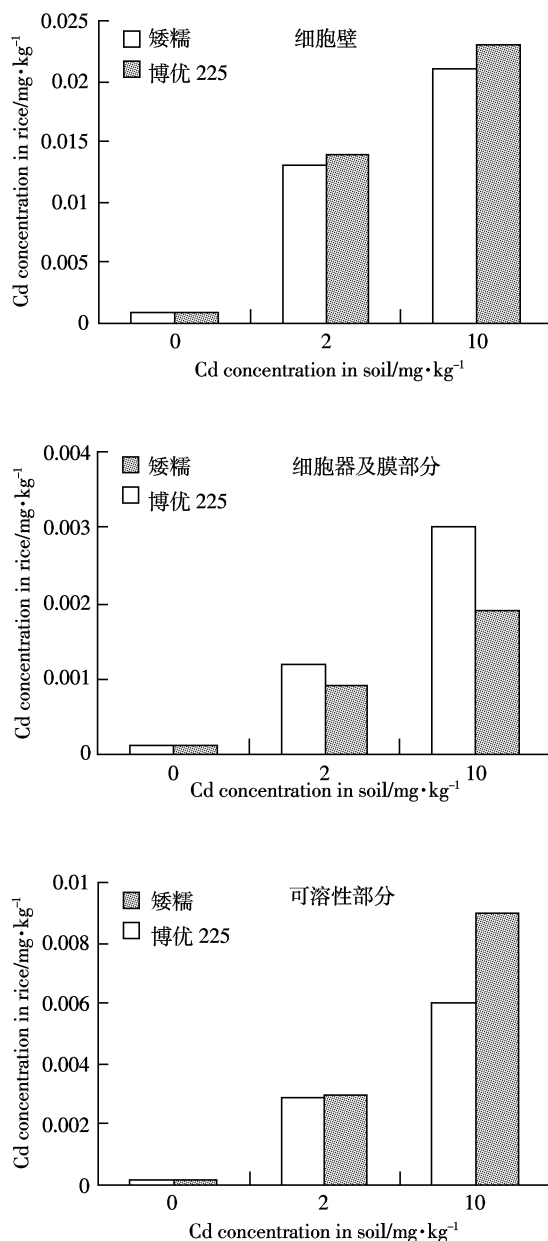


图 2 Cd 在 2 种水稻茎叶中的亚细胞分配

Figure 2 Subcellular distribution of Cd in stem and leaf of Short glutinous rice and BoYou225 rice plants under Cd treatment.

分却明显高于后者。

2.3 土壤 Cd 与糙米 Cd 含量的关系

2.3.1 土壤全量 Cd 与水稻糙米 Cd 含量的关系

图 4 表明,水稻籽粒 Cd 含量与土壤 Cd 总量呈显著正相关关系。博优 225 糙米相关系数为 0.988 2,矮糯糙米相关系数=0.985 5;根据方程计算得本试验中引起水稻糙米 Cd 含量超标(GB 2762—2005)的土壤总 Cd 临界值分别为 2.0 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (博优 225),3.1 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (矮糯)。

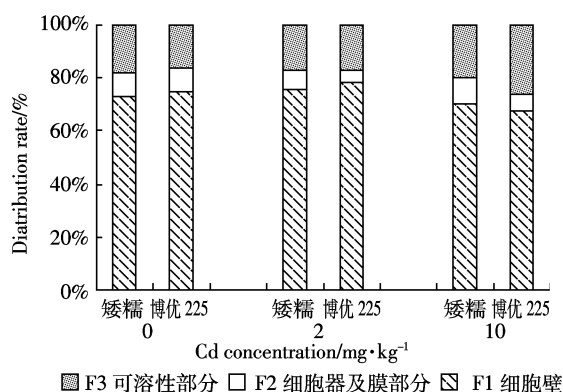


图 3 Cd 在 2 种水稻茎叶中的亚细胞分配比例

Figure 3 Subcellular distribution rate of Cd in stem and leaf of Short glutinous rice and BoYou225 rice plants under Cd treatment.

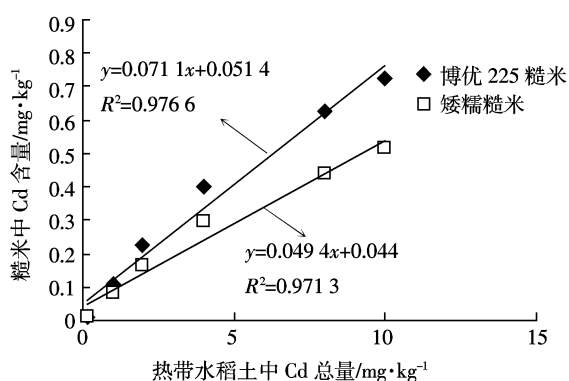


图 4 热带水稻土中 Cd 总量与糙米中 Cd 含量的关系

Figure 4 Relationship between paddy soils cadmium pollution and cadmium content in brown rice

3 结论

(1) 试验结果表明,就积累总量而言,在各个 Cd 浓度胁迫下,两个品种水稻都是根累积的 Cd 含量要高于茎叶和稻壳、糙米,即根>茎叶>稻壳>糙米。这与前人研究结果一致^[13-14]。

(2) 在水稻的茎叶细胞中,绝大部分 Cd(60%以上)分布在细胞壁组分,这说明细胞壁是水稻耐 Cd 胁迫和积累 Cd 的一个重要部位。细胞可溶性部分,细胞器 Cd 的分布量较少。总的来说,Cd 在各细胞组分中的绝对浓度和分配比例的模式为:细胞壁>可溶性部分>细胞器及膜部分。

(3) 根据线性方程计算得本试验中引起水稻糙米 Cd 含量超标(GB 2762—2005)的土壤总 Cd 临界值分别为 $2.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (博优 225)、 $3.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (矮糯)。

(4) 已有研究表明,水稻籽粒中重金属积累量存在基因型的差异^[15],通过选择籽粒低重金属积累品种

种植于重金属轻、中度污染的土壤上,从而生产出重金属含量较低的安全稻米被认为是一条经济有效的途径^[16-17]。本研究结果得出了水稻两品种糙米积累 Cd 的量博优 225 高于矮糯,博优 225 比矮糯水稻对 Cd 污染的反应更敏感,因此,在 Cd 污染的水稻土上,矮糯较博优 225 更适宜种植,有利于减少 Cd 的毒害。

参考文献:

- [1] Sanità di Toppi L, Gabbriellini R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41 (2):105-130.
- [2] Baszyński T. Interference of Cd^{2+} in functioning of the photosynthetic apparatus of higher plants[J]. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*, 1986, 55:291-304.
- [3] 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨[J]. *应用生态学报*, 1995, 6(1):87-91.
YANG Ju-rong, HE Jian-qun, ZHANG Guo-xiang, et al. Tolerance mechanism of crops to Cd pollution[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1995, 6(1):87-91.
- [4] 王凯荣, 龚惠群. 两种基因型水稻对环境镉吸收与再分配差异性比较研究[J]. *农业环境保护*, 1996, 15(4):145-149, 176.
WANG Kai-rong, GONG Hui-qun. Comparative studies on the difference of the uptake and redistribution of environmental Cd by two genic rice[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1996, 15(4):145-149, 176.
- [5] 张义贤. 重金属对大麦(*Hordeum vulgare*)毒性的研究[J]. *环境科学学报*, 1997, 17(2):199-205.
ZHANG Yi-xian. Toxicity of heavy metals to *hordeum vulgare*[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 1997, 17(2):199-205.
- [6] 马海涛, 李晓晨, 郭志勇, 等. Zn、Pb 和 Cd 对小麦幼苗生理生化的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(3):647-648.
MA Hai-tao, LI Xiao-chen, GUO Zhi-yong, et al. Effect of the toxicity of Zn, Pb and Cd on wheat seedling growth[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(3):647-648.
- [7] 高雪芹, 潘继红. 镁-DNA 相互作用及镁致癌的可能的相互关系[J]. *国外医学·医学地理分册*, 2003, 24(4):156-159, 162.
GAO Xue-qin, PAN Ji-hong. Magnesium-DNA interactions, and magnesium may cause cancer of the mutual relations [J]. *Foreign Medical Sciences-Section of Medgeography*, 2003, 24(4):156-159, 162.
- [8] 王鸿飞. 环境镉污染及镉对环境暴露人群影响的研究 [J]. *广东微量元素科学*, 2002, 9(7):24-26.
WANG Hong-fei. Study on Cd pollution in environment and its effects on Cd exposure people[J]. *Trace Elements Science*, 2002, 9(7):24-26.
- [9] 刘凤枝, 师荣光, 徐亚平, 等. 耕地土壤重金属污染评价技术研究——以土壤中铅和镉污染为例 [J]. *农业环境科学学报*, 2006, 25(2):422-426.
LIU Feng-zhi, SHI Rong-guang, XU Ya-ping, et al. The study of assessment technology for farmland soil heavy metal pollutions[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(2):422-426.
- [10] 王 英. 土壤-水稻系统镉生物有效性的动态特征[D]. 广西南宁:

- 广西大学, 2007.
- WANG Ying. Dynamic characteristic of biological validity of Cd in soil-rice system[D]. Nanning: Guangxi University, 2007.
- [11] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 205-226.
- LU Ru-kun. Analytical method of soil and agronomic chemistry [M]. Beijing: China Agriculture Science and Technology Press, 1999: 205-226.
- [12] Gabbrielli Roberto, Pandolfimi T, Vergnano O, et al. Comparison of two serpentine species with different nickel tolerance strategies[J]. *Plant and Soil*, 1990, 122(2): 271-277.
- [13] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及分配的差异[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(5): 529-532.
- LI Kun-quan, LIU Jian-guo, LU Xiao-long, et al. Uptake and distribution of cadmium in different rice cultivars[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2003, 22(5): 529-532.
- [14] 康立娟, 赵明宪, 庄国臣. 铜的单元及复合污染中水稻对 Cu 吸收累积规律的研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(4): 503-504.
- KANG Li-juan, ZHAO Min-xian, ZHUANG Guo-chen. Accumulation of Cu as single and complex pollutants in rice[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2003, 22(4): 503-504.
- [15] 王凯荣. 镉对不同基因型水稻生长毒害影响的比较研究[J]. 农村生态环境, 1996, 12(3): 18-23.
- WANG Kai-rong. Comparative study on Cd phytotoxicity to different genes of rice[J]. *Rural Eco-environment*, 1996, 12(3): 18-23.
- [16] Wagner G J. Accumulation of cadmium in crop plants and its consequences to human health[J]. *Advances in Agronomy*, 1993, 51: 173-212.
- [17] Clarke J M, Norvell W A, Clarke F R, et al. Concentration of cadmium and other elements in the grain of near-isogenic durum lines[J]. *Canadian Journal of Plant Science*, 2002; 82: 27-33.