

东北地区不同水稻品种对 Cd 的累积特性研究

刘侯俊, 梁吉哲, 韩晓日, 李 军*, 芦俊俊, 张素静, 冯 璐, 马晓明

(沈阳农业大学土地与环境学院 农业部东北土壤与环境重点开放实验室, 沈阳 110866)

摘 要 采用土培盆栽试验方法,以东北地区大面积种植的 32 个水稻品种为试验材料,在土壤中未添加和添加 Cd ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd) 的条件下,研究水稻生长、籽粒产量和 Cd 在水稻植株不同部位的分配规律。结果表明,土壤中添加 Cd 后,多数水稻籽粒产量和植株总生物量下降,只有少数品种籽粒产量和生物量有所上升。Cd 在水稻植株中的含量遵循根系>茎叶>颖壳>籽粒的规律,但从分配比例来看,土壤中未添加 Cd 时根系中 Cd 的分配比例较高,添加 Cd 后茎叶中 Cd 的分配比例明显增加。从稻米产量和质量安全角度综合考虑,认为越路早生(3 号)品种为农业生产中较理想的种植品种,沈农 265(1 号)、农林 315(30 号)、屈锦(31 号)、沈稻 12(32 号)品种可以在中轻度污染的农田土壤条件下种植,而千重浪-1(8 号)、辽盐 2(14 号)、辽盐 283(17 号)、辽恢 190(19 号)以及吉 03-2843(27 号)品种尽量避免在污染土壤上种植。研究结果对东北地区镉污染稻田选择水稻品种,保障稻米安全具有重要意义。

关键词 水稻 镉 累积系数 重金属污染 食品质量安全

中图分类号 X503.231 文献标志码 A 文章编号 1672-2043(2011)02-0220-08

Accumulation and Distribution of Cadmium in Different Rice Cultivars of Northeastern China

LIU Hou-jun, LIANG Ji-zhe, HAN Xiao-ri, LI Jun*, LU Jun-jun, ZHANG Su-jing, FENG Lu, MA Xiao-ming

(Key Laboratory of Soil and Environment in Agriculture Department of PRC, Department of Soil and Environment, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract In a soil pot experiment, 32 rice cultivars collected from Northeastern China were planted in soil amended with $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ or $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd. Two rice seedlings per cultivar were transplanted to a $30 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 15 \text{ cm}$ plastic pot in May 26 and harvested in September 30. The height of rice seedlings was measured at June 25, July 18 and August 12. At harvest, total biomass and grain yield were measured, and Cd concentrations in root, shoot, glume and kernel were determined. Results showed that grain yield and total biomass of most rice cultivars grown at Cd5 were lower than at Cd0 treatment, whereas the height of rice did not differ significantly at Cd0 and Cd5. The Cd concentrations in different parts of rice were as following: root>shoot>glume>kernel. At Cd0, most of Cd was distributed in roots, but at Cd5 treatment, the proportion of Cd in shoots was greater than in roots for most rice cultivars. Taking together the grain yield and food safety, we suggested that YueLuZaoSheng (number 3) was the best cultivar for agriculture production. The cultivars of Shennong 265 (1), Nonglin 315 (30), Tijin (31), Shendao 12 (32) were suitable to grow in slightly polluted soils, whereas QianChongLang-1 (8), Liaoyan 2 (14), Liaoyan 283 (17), Liaohui190 (19), Ji03-2843 (27) were unsuitable to grow in Cd polluted soils. Our study provides important evidence for selecting appropriate rice cultivars in Northeastern China.

Keywords rice; cadmium; accumulation factor; heavy metal pollution; food quality safety

水稻是人类赖以生存的三大主要粮食作物之一,全球约 1/2 的人口需要依靠水稻提供营养与能量^[1]。我国是世界上主要的水稻生产大国,东北三省又是中国最大的稻米市场。2007 年仅辽宁省水稻种植面积

就突破 66.6 万 hm^2 ,成为辽宁省第二大粮食作物。然而辽宁省作为东北重要的老工业基地,Cd 污染现状非常严峻,稻米常有 Cd 超标的现象^[2]。镉是毒性很强的重金属元素之一,加之其在土壤-植物系统中的迁移能力较强,一旦通过食物链进入人体,将会对健康造成严重威胁^[3-4]。因此,如何降低稻米中 Cd 的累积,保证稻米质量安全,已经成为东北地区稻米生产中急需解决的重大问题之一。

要缓解稻米 Cd 超标的问题,控制污染物向土壤扩散、治理修复污染土壤等措施无疑从源头上限制了

收稿日期 2010-08-05

基金项目 国家自然科学基金资助项目(41001192);辽宁省自然科学基金资助项目(20072129)

作者简介 刘侯俊(1976-),女,山西方山人,副教授,主要从事微量元素及重金属元素在土壤-植物系统中的吸收运转规律研究。E-mail: liuhoujun_0@163.com

*通讯作者 李 军 E-mail: lyau_lijun@163.com

Cd 从土壤向植物的迁移,这方面的研究已积累了大量的经验^[5]。然而,在轻、中度污染的农田土壤上,可以通过选育和推广镉低积累的植物品种将植物可食部位的镉控制在允许范围内。大量研究表明,由于遗传特性的不同,水稻对镉的吸收存在着很大差异,这种差异不仅表现在水稻的不同类型之间,也表现在不同品种之间。李坤权等研究表明,水稻糙米中的镉浓度与水稻类型有关,即籼型>新株型>粳型^[6]。李正文等采用田间试验的方法,研究了江苏省目前栽种的 57 个水稻品种,揭示了杂交稻 Cd 吸收极显著高于常规稻^[7]。徐燕玲等认为,在低污染水平土壤上,水稻对 Cd 的累积品种间存在一定的稳定性,而水稻类型间 Cd 含量没有显著差异,因此按照水稻类型来筛选是不可行的,应针对品种来筛选并对筛选出来的稳定的品种进行重点研究^[8]。东北地区作为我国重要的水稻产区,为我国稻米生产做出了巨大的贡献,然而对该地区水稻品种 Cd 累积特性的研究报道却相对较少。

本试验选取东北地区引进和大面积种植的 32 个粳稻品种,在镉污染和未污染土壤条件下,研究不同品种水稻对镉胁迫的响应和镉在不同品种水稻体内的吸收、分配规律,为东北地区选育低积累镉水稻品种提供依据。

1 材料与方法

1.1 供试土壤

试验于 2009 年 5 月至 10 月在沈阳农业大学土地与环境学院网室内进行,供试土壤为无污染棕壤,采集自沈阳农业大学稻作所试验基地,且均采自 0~20 cm 耕层。土壤运回网室后风干,过 3 mm 筛,用于种植水稻。取部分土样,进一步磨碎,分别过 1 mm 和 0.25 mm 尼龙筛,用于测定土壤基本性质。测定结果为 pH 值 6.7 全氮 $1.24 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 全磷 $0.38 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 全钾 $12.6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 碱解氮 $58 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 速效磷 $6.5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 速效钾 $96 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 有机质 $23.1 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 全镉 $0.04 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。以上指标均采用常规方法测定。

1.2 供试水稻

供试水稻幼苗由沈阳农业大学稻作所提供,水稻品种均为粳稻,选自东北亚地区不同地域(辽宁、吉林、黑龙江、日本)且遗传背景差异较大,品种编号和名称如表 1 所示。稻种催芽后,先在无污染的稻田育秧,后将带蘖秧苗移栽到塑料盆内,每盆插秧 2 株。

1.3 试验布置与管理

将氮(N $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、磷(P₂O₅ $0.15 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)、钾(K₂O

表 1 水稻品种

Table 1 The rice cultivars

品种编号	品种名称	品种编号	品种名称	品种编号	品种名称
1	沈农 265	12	辽粳 326	23	沈稻 6 号
2	沈农 9741	13	辽粳 5	24	京租
3	越路早生	14	辽盐 2	25	吉 2843
4	中辽 9052	15	辽盐 16	26	台粳 9
5	辽粳 371	16	营 8433	27	吉 03-2843
6	辽星 1 号	17	辽盐 283	28	秋田小町
7	辽粳 9	18	盐粳 68	29	里歌
8	千重浪-1	19	辽恢 190	30	农林 315
9	辽粳 294	20	沈恢 32	31	雁锦
10	辽粳 454	21	沈稻 9 号	32	沈稻 12
11	辽盐 241	22	沈稻 3 号		

$0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 基肥以溶液的形式拌入少量风干土壤,用手搓匀,过筛,将筛出的土粒再搓匀,过筛,如此反复 3 次,保证基肥与土壤充分混合,将此拌入基肥的少量土壤混入所有供试土壤,反复混匀。装盆时,每盆 3.0 kg 土壤,并将 Cd 也以溶液的形式拌入土壤。先称取 $3\text{CdSO}_4 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$ 化合物 3.286 1 g,用去离子水配制成 1 920 mL 溶液,加镉的处理用移液管取 20 mL 配好的溶液加入到 3.0 kg 土壤中,使得土壤中镉含量达到 $5.0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。之后将土壤充分搓匀,过筛,反复 3 次。每个水稻品种均设置未加镉(Cd0)和加镉(Cd5)两个处理,每个处理重复 3 次,共 192 盆。将加入基肥和镉的土壤装入 30 cm×20 cm×15 cm 的塑料盆中,用自来水将盆中的土壤湿润后,平衡 4 周。5 月 26 日将育好的水稻幼苗移栽到土壤中,每盆 2 株,同时淹水,水稻整个生长期保持水面 2~3 cm,收获前两周停止加水。水稻生长期间于 6 月 25 日、7 月 18 日、8 月 12 日测定株高,于 9 月 30 日收获。

1.4 样品采集与分析

水稻成熟后,将整个植株从盆钵中取出,使植株与土壤脱离,用不锈钢刀将根系和地上部分开,地上部称鲜重后直接装入纸袋,105 ℃杀青 20 min,70 ℃烘干。新鲜根系连同少量土壤一起装入尼龙网袋,先用自来水冲洗,将根系与粘在根上的土壤分离,然后用蒸馏水将根系冲洗 3 遍,用吸水纸吸干水分,再杀青,并烘干。将烘干的根系和地上部取出,称量干重,两者相加记作总生物量,取下植株穗上的籽粒并称重,记作籽粒产量,籽粒进一步脱壳,分为精米和颖壳。分别将根、茎叶、精米和颖壳粉碎,过 0.25 mm 尼龙筛,供化学分析用。

采用硝酸、高氯酸、硫酸 3 酸(比例为 1:1:8)消煮

植株样品,称取样品 0.5 g 左右,置于 50 mL 三角瓶中,加入 10 mL 混合酸,冷消化过夜。次日,将烧杯置于电热板上,先低温(100 ℃左右)消煮 1 h,后高温(200 ℃左右)砂浴消煮至溶液颜色变为无色并冒白烟后,再继续蒸发至体积 2 mL 左右,冷却,加 20%稀硝酸 2 mL,溶解沉淀,定容至 25 mL 容量瓶。消煮液中 Cd 含量用等离子发射光谱仪 ICP-OES (VISTA-MPX,USA) 测定。为了保证样品消煮和测定过程的准确性,以空白试剂和西红柿叶片标准样品(GSB 0721-26422000,Chinese National Certified Reference Material)与试验样品进行同步消煮和测定。标准样品测定值均在标准值范围之内。

1.5 数据处理与统计分析

相对产量=[(镉处理的产量-无镉处理的产量)/无镉处理的产量]×100

富集系数=(植物体内积累的镉量/生长介质中镉量)×100

分配比例=(植物各部位镉的累积量/整个植株镉累积量)×100%

采用 SAS 统计软件和 Excel 进行数据处理。

2 结果与分析

2.1 Cd 处理对水稻籽粒产量和总生物量的影响

水稻收获后籽粒产量、总生物量及对应的相对产量见表 2。土壤加 Cd 处理后,大多数水稻品种籽粒产量和总生物量低于未加 Cd 处理,因而相对产量大多为负值,这可能是 Cd 对水稻的生长产生了抑制作用,其中 Cd 对 1、18、32 号品种的抑制作用最强,籽粒和总生物量相对产量分别达到-33.03、-30.99、-29.28 和-40.43、-12.33、-28.79。不过,也有少数品种水稻籽粒产量和总生物量在 Cd 处理条件下反而增加,其相对产量为正值,如 3 号品种,籽粒和总生物量的相对产量分别为 53.26 和 56.14。

从表 2 还可看出,不同 Cd 处理条件下不同水稻品种之间籽粒产量和总生物量差异较大。在土壤未加 Cd 条件下,籽粒产量较高的为 18、1、30、31、32 号品种,而较低为 19、4、25 号品种,总生物量较高为 1、30、31、32、24 号品种,较低为 19、25、16 号品种。在土壤加 Cd 条件下,籽粒产量较高为 3、6、31、15、28 号品种,而较低为 4 号品种,总生物量较高为 3、24、31、6、23 号品种,较低为 14、11、12、25、8 号品种。可见不同品种水稻本身生长状况存在明显的差异,Cd 对它们的生长也有显著的影响。尽管不同品种籽粒产量和

总生物量差异较大,但它们之间存在着明显的正相关关系,未加 Cd 和加 Cd 处理下相关系数分别达到 0.784 0 和 0.829 0 ($n=64, P<0.001$)。

2.2 Cd 处理对水稻株高的影响

在水稻生长期分别于 6 月 25 日、7 月 18 日、8 月 12 日对株高进行了测定,分别用图 1 中从下向上三组线表示。从图 1 可以看出,随着水稻的生长,株高不断增加,在整个测定期内,3 号、14 号、24 号品种的株高明显高于其他品种,而且随着生长的推进品种之间的差异越来越明显。Cd 处理对大多数品种水稻株高没有明显影响,统计分析未达到显著性差异(3 个时期 P 分别为 0.296 5、0.440 1、0.517 0)。另外,水稻株高与籽粒产量、生物量之间没有明显的相关关系。可见 Cd 对水稻产量及生物量的影响与水稻株高无关。

2.3 Cd 处理下水稻各部位 Cd 含量变化

农产品的质量安全是关系人类健康的重大问题之一,为此世界各国均制定出农产品中有害物质的限量标准。我国稻米重金属 Cd 含量的限量标准(NFHSQ)为 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ (GB 15201—1994)。图 2 结果显示,在无污染土壤中生长的 32 个品种水稻,其籽粒中 Cd 含量均未达到 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,变化范围在 $0.010 \sim 0.102 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.038 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,镉含量最高和最低的品种分别为 12 号和 20 号品种。在土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 后,籽粒中 Cd 含量变化范围在 $0.022 \sim 0.285 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,平均为 $0.114 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,明显高于土壤未添加 Cd 的处理,其中两个品种水稻籽粒中 Cd 含量超出 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的限量标准,分别为 8 号和 14 号品种,还有 3 个品种水稻籽粒中 Cd 含量接近限量标准,分别为 17、19、27 号品种,30、22、5、24、32、3、31、6、4、13、23 号品种的籽粒中 Cd 含量小于 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

从图 2 也可看出,不同品种水稻颖壳、茎叶、根系中 Cd 含量变化规律与籽粒中 Cd 含量规律并不一致,统计分析结果表明,各部位 Cd 含量之间没有明显的相关关系(相关系数未显示)。另外,不同部位 Cd 含量均遵循根>茎叶>颖壳>籽粒的规律。

一般情况下,加 Cd 处理水稻各部位 Cd 含量明显增加,只有 30 号品种籽粒中和 3、6、16、20、27 品种茎叶中 Cd 含量在 Cd 处理中有所上升。另外,Cd 处理对茎叶中 Cd 含量比对其他部位 Cd 含量的影响更为明显。

2.4 Cd 处理对水稻富集系数和植株 Cd 分配比例的影响

富集系数是表征水稻对镉富集能力的重要指标。

表 2 水稻籽粒产量和总生物量 (g·盆⁻¹)Table 2 The grain yield and total biomass of 32 rice cultivars (g·pot⁻¹)

品种编号	籽粒产量			总生物量		
	Cd0	Cd5	相对产量	Cd0	Cd5	相对产量
1	63.13±10.20	42.28±6.27	-33.03±21.00	164.85±17.90	98.19±10.80	-40.43±13.10
2	44.20±0.47	43.78±0.96	-0.97±1.12	112.65±8.61	102.25±11.60	-9.23±17.10
3	50.54±0.00	77.46±0.00	53.26±0.00	109.29±9.97	170.65±0.00	56.14±0.00
4	40.81±3.47	32.63±2.46	-20.05±0.78	117.63±6.99	104.63±0.95	-11.06±6.10
5	43.97±3.56	43.52±1.53	-1.01±4.54	111.02±14.1	108.00±11.60	-2.72±1.90
6	54.36±1.17	61.32±2.74	12.80±7.48	120.38±7.21	126.58±1.25	5.15±5.27
7	50.70±0.61	45.19±4.76	-10.87±10.40	121.59±6.57	98.38±10.80	-19.09±13.30
8	43.56±0.14	40.05±2.03	-8.06±4.36	102.37±4.02	86.50±2.14	-15.51±5.64
9	46.29±9.79	48.38±2.02	4.51±27.05	104.00±13.1	104.57±7.09	0.55±19.60
10	49.05±3.74	51.51±11.00	5.01±30.61	112.91±5.65	118.93±36.50	5.34±37.60
11	47.47±7.02	41.92±1.17	-11.68±15.70	104.88±8.34	87.74±3.85	-16.34±2.99
12	44.73±0.15	39.63±0.67	-11.42±1.20	112.80±1.91	86.48±4.78	-23.33±2.94
13	49.55±7.51	48.86±5.92	-1.40±3.03	110.42±12.40	106.20±9.74	-3.83±1.98
14	54.67±7.64	41.79±5.17	-23.56±20.40	113.09±20.30	86.34±8.72	-23.66±21.80
15	55.32±2.08	53.73±2.49	-2.89±8.16	125.33±15.60	119.22±7.72	-4.88±5.72
16	45.87±3.58	44.48±0.12	-3.05±7.32	102.26±0.16	98.44±0.24	-3.74±0.09
17	51.69±3.43	45.01±2.43	-12.94±1.08	119.99±10.60	111.26±5.20	-7.28±3.84
18	73.99±22.90	51.06±2.92	-30.99±3.94	127.64±11.30	111.90±6.26	-12.33±10.90
19	38.78±5.00	42.84±0.19	10.46±13.90	97.69±6.63	102.83±2.69	5.26±4.41
20	46.67±8.50	48.65±8.57	4.24±0.63	110.66±23.10	112.97±18.7	2.09±4.44
21	51.14±1.46	51.65±0.81	1.00±4.47	116.83±2.65	119.99±0.44	2.71±1.96
22	44.43±1.15	41.54±5.96	-6.50±15.80	119.02±7.60	104.58±15.90	-12.13±19.00
23	47.27±0.75	50.88±13.6	7.65±27.00	118.60±2.18	127.09±44.10	7.15±39.20
24	53.05±4.11	43.91±20.90	-17.22±6.43	133.66±11.30	132.83±23.4	-0.62±24.90
25	42.31±2.81	40.71±5.91	-3.77±7.61	91.96±2.51	86.75±19.90	-5.67±24.20
26	52.50±3.99	48.60±0.24	-7.44±7.51	117.12±9.20	107.82±6.31	-7.94±12.70
27	52.99±0.82	40.31±0.75	-23.92±0.24	120.12±0.28	97.59±1.92	-18.76±1.79
28	51.28±0.45	52.22±0.39	1.85±1.64	111.95±1.90	116.33±3.17	3.91±1.08
29	50.39±2.45	48.87±0.83	-3.02±3.08	116.70±2.43	111.53±1.58	-4.43±3.34
30	64.38±17.60	50.91±0.09	-20.93±22.60	133.67±28.40	105.70±1.17	-20.92±18.10
31	63.79±6.96	59.46±2.11	-6.78±13.60	137.57±22.00	120.18±2.40	-12.64±14.80
32	69.87±17.80	49.41±0.43	-29.28±19.30	150.69±15.00	107.31±1.92	-28.79±5.84

由表 3 可知,不同品种水稻对镉的积累能力有很大差异,在 Cd0 处理下,富集能力最强的为 3 号品种,其次是 29 号和 8 号品种,富集系数分别达到 118.6、102.0 和 100.3,最低的为 14、15 号品种,富集系数为 19.7 和 18.9,在 Cd5 处理下,富集能力最强的仍为 3 号品种,富集系数达到 16.6,最低的为 26 号品种,富集系数为 3.4。

由表 3 还可以看出,在 Cd0 处理下,Cd 在水稻各器官中的分配比例基本符合根>茎叶>颖壳>籽粒,有 29 个品种根部 Cd 积累量在 50%以上,占总品种数的

90.63%,其中 3 号品种根系中 Cd 的分配比例最高,达到 90.2%,只有个别品种如 4、10、14 号表现为根的积累量比茎叶低;而在 Cd5 处理下,15 个品种水稻 Cd 的分配仍然遵循以上规律,但有 17 个品种水稻却表现为茎叶>根>颖壳>籽粒。可见,在土壤未加 Cd 的条件下,根系对 Cd 的阻挡作用是限制 Cd 向水稻地上部,进一步向籽粒运输的主要屏障,而在外源 Cd 加入的条件下,根系吸收较多的 Cd 势必向地上部转移,茎叶也成为 Cd 进一步向籽粒运输的屏障,如 3 号品种根系和茎叶中 Cd 分别占 57.7%和 42.0%。

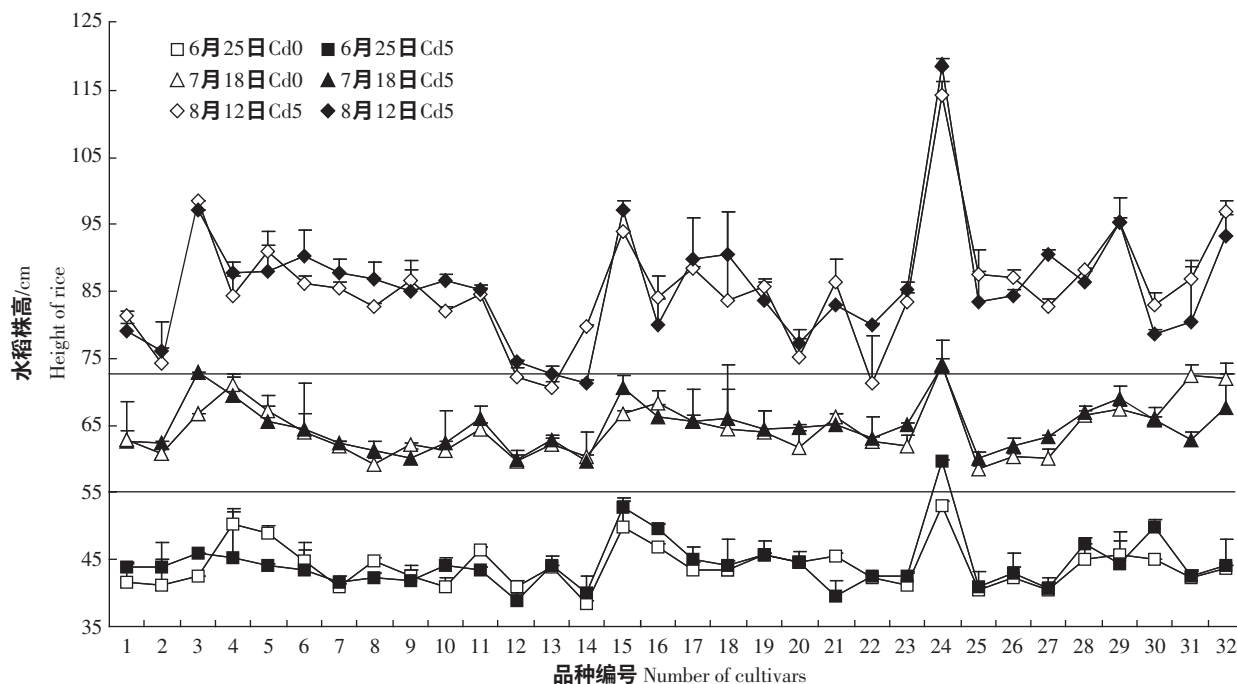


图 1 不同品种水稻株高随时间的变化规律

Figure 1 The height of rice at different time

3 讨论

3.1 Cd 对水稻生长的影响

Cd 是一个毒性很强的重金属元素, 众多的研究表明, Cd 能够抑制植物生长, 降低作物产量, 尤其在高浓度 Cd 暴露的情况下, 这种作用更为明显。有研究表明, $150 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 处理下, 4 个不同品种水稻生长速率下降、分蘖减少、产量在不同程度上有所下降, 最高下降 47.1%^[9]。本研究结果表明, $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 供应的条件下, 大多数水稻品种的总生物量和籽粒产量也明显下降, 其中 Cd 对 1 号品种的抑制作用最强, 1 号品种 (沈农 265) 是沈阳农业大学育成的国家推广的新一代优质超级稻, 其总生物量最大, 籽粒产量也较高, 但对 Cd 的毒害较敏感。也有研究表明, 在一定 Cd 浓度处理下, 植物生长并未受到影响。张玉烛等的研究表明, 在盆栽条件下 Cd 水平小于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时水稻的生长并未受到影响, Cd 水平大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 才开始对水稻生长产生毒害影响^[10]。丁园等盆栽试验外源镉的投加浓度分别为 0、5.0、10 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 镉的各处理浓度对水稻的分蘖率、每穗实粒数和千粒质量没有显著影响, 只有当土壤中镉的全量达到 $20.84 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 水稻的经济产量才减少了 10.65%^[11]。还有研究发现, 少量或短时间内 Cd 暴露甚至能够刺激植物的生长^[12-13]。本试验中 3 号品种

水稻的籽粒产量和总生物量在 Cd 处理条件下反而增加, 3 号品种 (越路早生) 是从日本引入的抗病、耐盐优质品种, 对 Cd 的毒害也有明显的抵抗能力。

3.2 Cd 在水稻籽粒中的累积

在本试验条件下, 土壤中未添加外源 Cd 的情况下, 32 个品种水稻籽粒中 Cd 含量均未超标。这与 Shi 等的研究结果一致, 他们在中性无污染土壤上种植 110 个杂交水稻品种, 籽粒中 Cd 含量在 $0.004 \sim 0.057 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间^[14]。本试验条件下, 即使在土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 的情况下, 也仅有两个品种水稻籽粒中 Cd 超过国家卫生标准 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分别是 8 号和 14 号品种。徐燕玲等的研究表明, 在污染土壤 (全镉 $0.60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 上生长的水稻, 精米中 Cd 含量在 $0.036 \sim 0.151 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围内^[8]。李坤权等研究发现, 在添加 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 土壤上生长的水稻, 精米中 Cd 含量远远超过 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 分布在 $0.71 \sim 2.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 范围之内^[6]。王英等的研究表明, 土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 时, 水稻土盆栽种植的 4 个品种水稻精米中 Cd 含量全部超标, 分别达到 0.281 、 0.846 、 $0.753 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1.306 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[15]。丁园等的研究表明, 当土壤中添加 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 时, 水稻糙米中 Cd 含量达到 $0.231 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[11]。一般来说颖壳中 Cd 含量大于精米中 Cd 含量^[16], 由此推断, 在他们的试验条件下水稻精米中 Cd 含量并没有超标。从以上分析可以看出,

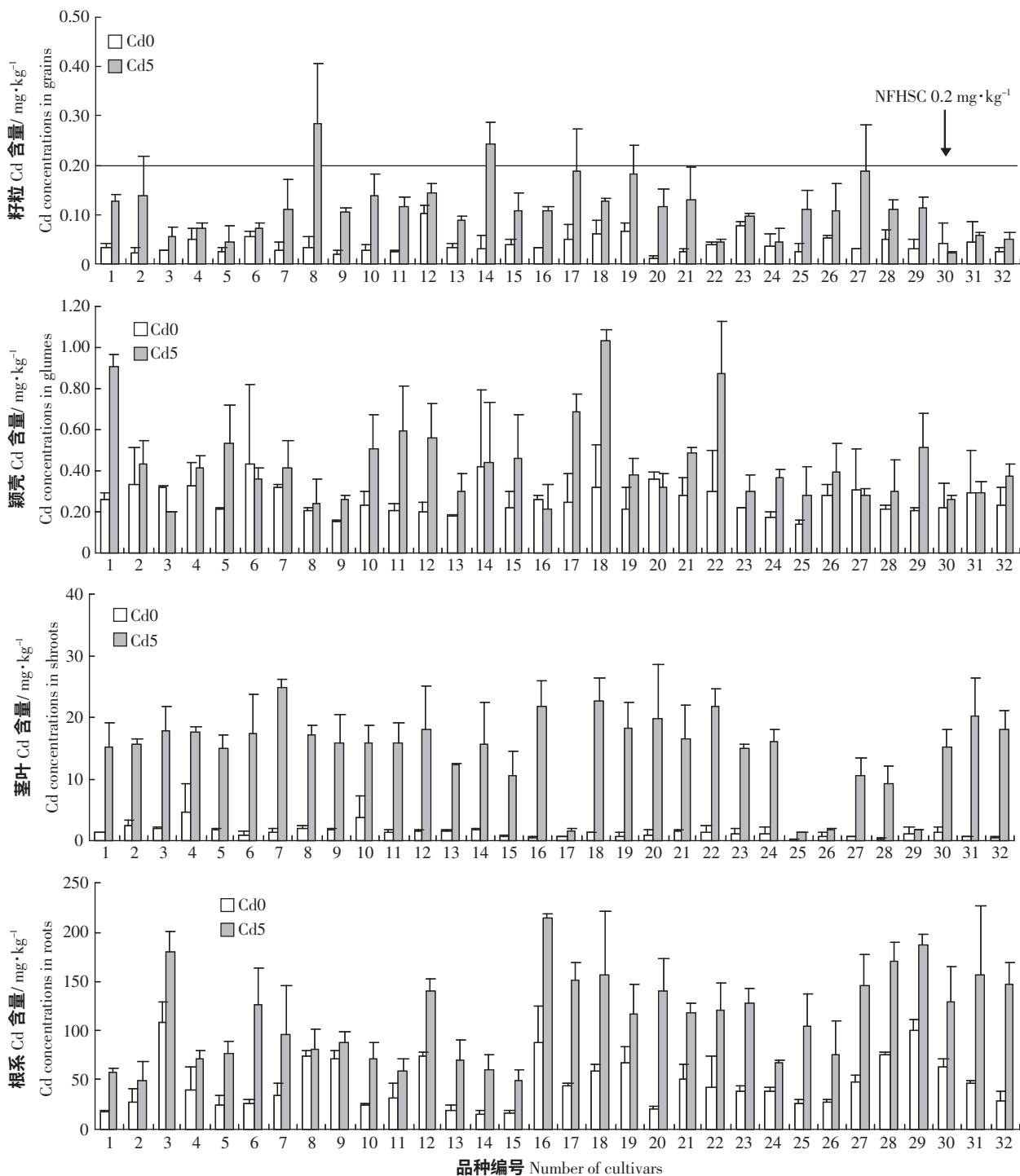


图2 不同品种水稻各部位 Cd 含量

Figure 2 The cadmium concentrations in grains, shoots and roots of 32 rice cultivars

在不同的试验条件下,不同的水稻品种对 Cd 的累积特性有所差异,这可能与试验的土壤类型、水稻基因型差异以及试验条件的不同有关。

3.3 Cd 在水稻体内的储存和分配

籽粒 Cd 含量的高低取决于水稻根系从土壤中吸收 Cd 的能力和 Cd 从根系向地上部运输的效率。

从 Cd 在水稻不同部位的分配比例来看,根系和茎叶中 Cd 的累积量占植株总 Cd 量的 98% 以上,在土壤中未添加 Cd 的处理中,根系是 Cd 的主要累积部位,当土壤中添加 Cd 以后,茎叶也成为重要的 Cd 累积部位。而大多数研究表明,Cd 在水稻不同部位的分配比例一般均为根系>茎叶>颖壳>籽粒^[9-14],如 Liu

表 3 水稻中 Cd 的富集系数和各部位 Cd 分配比例

Table 3 The Cd accumulation factor and distribution proportions in different part of 32 rice cultivars

品种编号	富集系数		分配比例							
			根		茎叶		颖壳		籽粒	
	Cd0	Cd5	Cd0	Cd5	Cd0	Cd5	Cd0	Cd5	Cd0	Cd5
1	34.8	6.0	53.4	39.2	44.7	59.6	1.14	0.68	0.82	0.51
2	50.5	5.6	64.2	27.8	34.8	71.2	0.80	0.35	0.25	0.62
3	118.6	16.6	90.2	57.7	9.2	42.0	0.39	0.10	0.17	0.14
4	81.1	8.7	49.2	32.9	50.1	66.8	0.42	0.19	0.35	0.16
5	42.4	7.2	70.0	40.3	29.1	59.2	0.62	0.35	0.33	0.15
6	37.7	9.5	81.9	46.9	15.1	52.6	1.84	0.18	1.12	0.26
7	56.3	9.1	80.9	38.7	18.0	60.8	0.79	0.21	0.34	0.32
8	100.3	5.9	88.4	44.2	11.2	54.5	0.26	0.19	0.19	1.11
9	79.7	7.1	86.8	47.2	12.8	52.3	0.22	0.17	0.15	0.41
10	48.8	7.6	47.9	40.7	51.1	58.4	0.64	0.38	0.38	0.54
11	39.2	4.9	79.5	41.6	19.4	57.2	0.69	0.61	0.41	0.57
12	83.8	6.9	85.5	47.2	13.4	52.0	0.34	0.35	0.78	0.47
13	27.0	4.9	62.5	38.9	35.7	60.3	0.96	0.34	0.89	0.50
14	19.7	4.5	43.1	38.3	51.6	59.9	4.08	0.51	1.19	1.29
15	18.9	4.9	76.0	38.8	20.7	60.0	1.72	0.53	1.59	0.68
16	61.5	13.8	95.8	66.0	3.2	33.7	0.63	0.08	0.35	0.20
17	47.1	9.2	91.9	94.6	6.6	4.4	0.72	0.42	0.77	0.52
18	64.4	11.8	87.8	49.7	10.6	49.6	0.54	0.46	0.99	0.31
19	76.6	9.9	93.5	55.4	5.7	43.9	0.40	0.22	0.48	0.46
20	37.1	11.7	85.3	54.9	13.2	44.7	1.33	0.16	0.18	0.27
21	62.7	10.5	82.4	53.8	16.7	45.6	0.59	0.24	0.29	0.36
22	68.4	11.0	83.7	44.3	15.4	55.3	0.54	0.31	0.34	0.09
23	45.7	9.0	81.8	41.2	16.4	58.3	0.61	0.18	1.13	0.31
24	46.6	8.8	79.4	24.0	19.5	75.6	0.51	0.26	0.58	0.13
25	26.4	5.0	95.0	95.4	3.8	3.8	0.64	0.25	0.58	0.51
26	35.7	3.4	87.1	86.5	10.7	12.1	1.09	0.54	1.10	0.88
27	53.6	7.6	91.0	64.9	7.7	34.3	0.86	0.16	0.40	0.57
28	72.4	9.7	97.1	73.9	2.0	25.6	0.39	0.17	0.50	0.34
29	102.0	6.7	92.1	92.6	7.5	6.6	0.27	0.38	0.20	0.47
30	76.5	7.6	88.2	54.1	10.9	45.6	0.44	0.18	0.48	0.08
31	36.9	11.9	87.5	58.1	10.2	41.6	1.20	0.14	1.06	0.16
32	33.6	9.8	88.1	55.6	10.0	44.1	1.12	0.20	0.76	0.14

等的盆栽试验结果显示,土壤中添加 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 后,不同品种水稻根系中 Cd 的分配比例均达到 88% 以上,茎秆和叶片中分配比例平均为 8.51% 和 0.76%,籽粒中仅为 0.73%^[17]。

对于不同品种来说,土壤加 Cd 的处理中,水稻籽粒 Cd 含量小于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的品种,其根系和茎叶中 Cd 的分配比例基本都大于 99.0%,只有 1、11、15、26 号品种未达到 99.0%,但这 4 个品种共同的特点是颖壳中 Cd 的分配比例普遍高于其他品种,可见对于这几个品种来说,颖壳对 Cd 向精米中的运输起着重要的限制

作用。籽粒中 Cd 含量大于 $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的品种,即 14 号和 8 号品种,根系和茎叶中 Cd 的分配比例较低,分别为 98.2% 和 98.7%,其中 14 号品种颖壳中 Cd 的分配比例也较高,与 1、11、15、26 接近,但其籽粒总 Cd 的累积量却是它们的两倍左右,8 号品种尽管颖壳中 Cd 分配比例较低,但籽粒中 Cd 累积量也是它们的两倍左右,可见与其他品种相比,14 号和 8 号品种 Cd 从根系向地上部,再从颖壳向籽粒的运输能力均较强。

富集系数是水稻体内 Cd 的累积量与土壤中总 Cd 量的比值,是表征水稻对镉富集能力的重要指标。从富

集系数可以看出,3号品种(越路早生)富集系数最高,说明它从土壤中提取Cd的能力最大,这是与3号品种水稻具有较大的生物量有关。另外,3号水稻品种根系对Cd的吸持能力较强,因而籽粒中Cd含量较低($0.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)。

4 结论

越路早生品种(3号)是一个耐Cd性很强的品种,由于其生物量大,所以Cd的富集能力强,不过其籽粒中Cd含量相对较低,所以越路早生品种是农业生产中较理想的品种,种植过程中不但可以起到生物净化提取土壤中Cd的作用,同时可以收获安全可靠的水稻籽粒。

沈农265(1号)、农林315(30号)、扈锦(31号)、沈稻12(32号)品种产量高、生物量大、籽粒中Cd的累积量较低,在中轻度污染的农田土壤条件下,种植这些品种精米中Cd含量不会超过食品卫生标准。

千重浪-1(8号)、辽盐2(14号)、辽盐283(17号)、辽恢190(19号)以及吉03-2843(27号)品种籽粒累积Cd能力较强,在污染土壤上尽量避免使用。

参考文献:

- [1] 孙明茂, 洪夏铁, 李圭星, 等. 水稻籽粒微量元素含量的遗传研究进展[J]. 中国农业科学, 2006, 39: 1947-1955.
SUN M M, HONG X T, LI G X, et al. Progress of genetic research on trace minerals content in rice seed[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39: 1947-1955.
- [2] 杨春刚, 廖西元, 章秀福, 等. 不同基因型水稻籽粒对镉积累的差异[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(6): 660-662.
YANG C G, LIAO X Y, ZHANG X F, et al. Genotypic difference in cadmium accumulation in brown rice [J]. *Chinese J Rice Science*, 2006, 20(6): 660-662.
- [3] McLaughlin M J, Parker D R, Clarke J M. Metals and micronutrients—food safety issues[J]. *Field Crops Res*, 1999, 60: 143-163.
- [4] 龚伟群, 潘根兴. 中国水稻生产中Cd吸收及其健康风险的有关问题[J]. 科技导报, 2006, 24(5): 43-48.
GONG W Q, PAN G X. Issues of grain Cd uptake and the potential health risk of rice production sector of China [J]. *Science and Technology Review*, 2006, 24(5): 43-48.
- [5] 骆永明. 金属污染土壤的植物修复[J]. 土壤, 1999, 31(5): 261-280.
LUO Y M. Phytoremediation of soil polluted by metals [J]. *Soil*, 1999, 31(5): 261-280.
- [6] 李坤权, 刘建国, 陆小龙, 等. 水稻不同品种对镉吸收及其分配的差异[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-Environment Science*, 2003, 22(5): 529-532.
- [7] 李正文, 张艳玲, 潘根兴, 等. 不同水稻品种籽粒Cd、Cu和Se的含量差异及其人类膳食摄入风险[J]. 环境科学, 2003, 24(3): 112-115.
LI Z W, ZHANG Y L, PAN G X, et al. Grain contents of Cd, Cu and Se by 57 rice cultivars and the risk significance for human dietary uptake [J]. *Environmental Science*, 2003, 24(3): 112-115.
- [8] 徐燕玲, 陈能场, 徐胜光, 等. 低镉累积水稻品种的筛选方法研究: 品种与类型[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(7): 1346-1352.
XU Yan-ling, CHEN Neng-chang, XU Sheng-guang, et al. Breeding rice cultivars with low accumulation of cadmium: Cultivars versus types [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(7): 1346-1352.
- [9] Huang D F, Xi L L, Yang L N, et al. Comparison of agronomic and physiological traits of rice genotypes differing in cadmium tolerance[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, 34(5): 809-817.
- [10] 张玉烛, 王凯荣, 刘见平, 等. 稻米质量安全控制技术与示范[J]. 作物研究, 2006, 4: 287-296.
ZHANG Y Z, WANG K R, LIU J P, et al. Demonstrations and studies on techniques for rice quality security control [J]. *Crop Study*, 2006, 4: 287-296.
- [11] 丁园, 宗良纲, 徐晓炎, 等. 镉污染对水稻不同生育期生长和品质的影响[J]. 生态环境学报, 2009, 18(1): 183-186.
DING Y, ZONG L G, XU X Y, et al. Effect of cadmium on the growth and quality of rice in different growth period [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2009, 18(1): 183-186.
- [12] Liu H J, Zhang J L, Christie P, et al. Influence of iron fertilization on cadmium uptake by rice seedlings irrigated with cadmium solution [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2010, 41: 584-594.
- [13] Meda A R, Scheuermann E B, Prechsl U E, et al. Iron acquisition by phytosiderophores contributes to cadmium tolerance [J]. *Plant Physiology*, 2007, 143: 1761-1773.
- [14] Shi J, Li L Q, Pan G X. Variation of grain Cd and Zn concentrations of 110 hybrid rice cultivars grown in a low-Cd paddy soil [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2009, 21(2): 168-172.
- [15] 王英, 李正文, 贺紫荆. 不同水稻品种积累镉的差异及其动态变化[J]. 广西农业生物科学, 2007, 26: 82-85.
WANG Y, LI Z W, HE Z J. Difference and dynamics of Cd uptake in four rice cultivars [J]. *Journal of Guangxi Agric and Biol Science*, 2007, 26: 82-85.
- [16] 肖美秀, 林文雄, 陈祥旭, 等. 镉在水稻体内的分配规律与水稻耐镉性的关系[J]. 中国农学通报, 2006, 22(2): 379-381.
XIAO M X, LIN W X, CHEN X X, et al. The Relation between the law of Cd distribution in rice and the Cd tolerance [J]. *Chinese Journal of Agronomy*, 2006, 22(2): 379-381.
- [17] Liu J G, Qian M, Cai G L, et al. Uptake and translocation of Cd in different rice cultivars and the relation with Cd accumulation in rice grain [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143: 443-447.