

胁迫和对照条件下水稻品种铅积累的差异

陈志德¹, 仲维功¹, 王 军¹, 杨 杰¹, 张永春²

(1.江苏省农业科学院粮食作物研究所, 江苏 南京 210014; 2.江苏省农业科学院农业资源与环境研究所, 江苏 南京 210014)

摘 要:为选育籽粒中对 Pb 低积累或低吸收水稻品种提供依据,本研究采用盆栽试验方法,比较了不同类型水稻品种及植株不同部位在胁迫和对照条件下对 Pb 的吸收积累特性。结果表明,供试品种不同部位中 Pb 含量的变异系数较高,变幅在 18.34%~35.57%。不同部位中 Pb 的含量差异明显,根系对 Pb 具有较强的积累能力。胁迫条件下,根系中 Pb 的平均含量为 287.616 mg·kg⁻¹,约是茎叶和糙米含量的 58 倍和 1 267 倍;对照条件下,根系中 Pb 的平均含量为 9.078 mg·kg⁻¹,约是茎叶和糙米含量的 3 倍和 50 倍;胁迫条件下根系中 Pb 的含量是对照的 36.34 倍,而茎叶和糙米分别是对照的 1.65 倍和 1.36 倍。不同品种对 Pb 的积累能力存在显著差异,同一品种在胁迫与对照条件下对 Pb 的含量也存在明显差异,其中,宁 54146 对 Pb 胁迫较敏感。相关分析表明,对照和胁迫条件下,植株不同部位中 Pb 的含量均不存在相关性。

关键词:水稻;铅胁迫;铅积累

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2009)05-0967-05

Difference of Accumulation in Rice Cultivars Under Pb Stress and the Control

CHEN Zhi-de¹, ZHONG Wei-gong¹, WANG Jun¹, YANG Jie¹, ZHANG Yong-chun²

(1. Institute of Food Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Science, Nanjing 210014, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Environment, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China)

Abstract: To evaluate rice genotypes with low Pb uptaking and low Pb accumulation in grains, for breeding programme, Pb accumulation in different plant parts was tested in a pot experiment by using various types of rice cultivars under Pb stress and the control conditions. The results showed that Pb accumulation differed significantly in various plant parts, varied from 18.34% to 35.57%. The average accumulation of Pb in the roots was 287.616 mg·kg⁻¹ under Pb stress, which was approximately 58 times and 1 267 times higher than that in the shoots and in the brown rice, respectively. Meanwhile, under the control conditions, the average Pb content in the roots was 9.078 mg·kg⁻¹, 3 times and 50 times higher than that in the shoots and in the brown rice. It indicated that roots had good capacity of uptaking Pb under both Pb stress and the control. Under stress, on average, Pb amount in the roots, in the shoots and in the brown rice were 36.34 times, 1.65 times and 1.36 times higher than that in respective plant parts under the control. There was a significant difference in Pb accumulation among rice cultivars. Ning 54146 was sensitive to Pb stress. Pb accumulation in the roots, shoots and the brown rice was not significant correlated in both Pb stress and control conditions.

Keywords: rice (*Oryza sativa* L.); Pb stress; Pb accumulation

中国是世界上铅(Pb)的生产和消费大国,2004年全国年产Pb量达135万t,年消费Pb80多万t^[1]。Pb是一种广泛存在于生活环境中的重金属,也是农田的主要污染物之一。据调查,我国珠江三角洲农田Pb含量比自然土壤平均高20%,局部地区高2倍以

上^[2];昆山市农田土壤100个样点中Pb等重金属含量超标率在20%以上^[3]。Pb中毒可对人体中枢和外周神经系统的特定结构产生毒害作用,对骨骼系统、生殖系统、心血管系统等产生不良影响^[4]。因此,有关稻米的Pb污染早已引起人们的高度关注。

不同水稻品种对Pb胁迫的响应特性已有较多的文献报道^[5-8],但此类研究多侧重于胁迫条件下植株不同器官对Pb的积累特性研究,缺乏与对照条件下积累特性的比较。本研究选用不同类型的水稻品种,比较胁迫和对照条件下不同品种以及植株不同部位对

收稿日期:2008-08-04

基金项目:农业部农业结构调整重大技术研究专项(04-01-01A);“十一五”科技支撑计划重大项目(2006BAD02A03)

作者简介:陈志德(1965—),男,江苏宜兴人,研究员,主要从事水稻新品种选育与推广研究。E-mail: chen701865@yahoo.com.cn

Pb 积累的差异,分析不同部位间 Pb 含量的相关性,为筛选籽粒中 Pb 的低积累或低吸收品种,促进无公害水稻发展提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试品种

选用不同类型、遗传背景差异较大的 10 个水稻品种进行试验,其中,籼稻改良品种 4 个,分别是 IR28、IR26、特青和扬稻 4 号。粳稻改良品种 3 个,分别是宁 54146、苏御糯和南粳 41。地方品种 3 个,分别是大关稻、韭菜青和黑壳子粳。其中,黑壳子粳因条纹叶枯病严重发生,未列入统计分析。

1.2 试验土壤本底情况

试验于 2006 年正季在江苏省农业科学院粮食作物研究所网室进行,供试土壤为马肝土,供试土壤的肥力状况以及土壤和灌溉水的重金属背景值见表 1。

1.3 试验方法

取稻田耕层土壤,去稻根、土块和其他杂质,人工过筛,日晒 2 d 后装袋自然风干。按每 1 kg 土样加 N 90 mg、P₂O₅ 100 mg、K₂O 90 mg 的标准添加肥料。将肥料与土样充分混合后装盆,每盆装土样 7.5 kg,加等量水搅拌。

用人工添加 Pb(CH₃COO)₂·3H₂O 的方法污染土壤,不加 Pb 化合物即为对照,胁迫浓度为 500 mg·kg⁻¹。每品种栽 3 盆,每盆 1 个重复,共 60 盆,其中,胁迫处理 30 盆,对照 30 盆。5 月 8 日将 Pb 化合物按要求溶于 4.5 L 的水中,充分溶解后每盆加 150 mL 的 Pb 溶液,对照每盆加 150 mL 的水。5 月 11 日播种,6 月 8 日移栽,每盆栽 5 穴,单苗,常规管理。试验期间遇雨架设挡雨设备,以确保 Pb 胁迫浓度的相对稳定。

1.4 植株样品准备

根据不同品种的成熟期及时收获。地上部收获后悬挂晾干,根系及时取出,用自来水小心洗净根系泥土,晒干,最后按根系、茎叶和糙米分类。用原子吸收分光光度法测定成熟期根系、茎叶和糙米中的 Pb 含量。

1.5 数据分析

以品种和重复为组项,根据两项分组资料模型进行方差分析,用新复极差法进行多重比较。

2 结果

2.1 不同类型水稻品种对 Pb 的吸收积累特点

由表 2 可知,对照条件下,不同类型水稻根系中 Pb 含量的差异较小,极差为 2.565 mg·kg⁻¹,同样,茎叶中的差异也较小,极差为 0.366 mg·kg⁻¹,糙米中极差为 0.057 mg·kg⁻¹;胁迫条件下,不同类型水稻根系中 Pb 含量的极差为 56.695 mg·kg⁻¹,茎叶为 1.908 mg·kg⁻¹,糙米为 0.026 mg·kg⁻¹。由此表明,不同类型水稻不同部位对 Pb 胁迫的响应特性不同,根系和茎叶对 Pb 胁迫较敏感。从 Pb 含量的比值看,除籼稻品种糙米中 Pb 含量比值(0.98)<1.0 以外,其余类型水稻植株不同部位中 Pb 含量的比值均>1.0,其中,粳稻品种根系和糙米中 Pb 的相对含量较高,地方品种茎叶中 Pb 的相对含量较高。

2.2 不同品种对 Pb 的吸收积累特点

表 3 结果表明,对照和胁迫条件下品种间 Pb 含量的变异系数较大,其中,对照条件下根系和糙米中 Pb 含量的变异系数大于胁迫处理,而茎叶的变异系数小于胁迫处理。方差分析表明(表 4),对照和胁迫条件下,不同品种根系、茎叶和糙米中 Pb 含量均达到

表 1 供试土壤和灌溉水的肥力水平和重金属本底值(mg·kg⁻¹)

Table 1 Contents of heavy metal and N, P, K in soil and irrigation water(mg·kg⁻¹)

项目	pH	重金属含量					有机质/ g·kg ⁻¹	碱解氮	速效磷	速效钾
		Pb	Cr	Cu	Hg	Cd				
供试土壤	6.2	19.560	39.120	27.610	0.152	0.059	18.6	202.4	10.0	136.0
灌溉水	7.1	0.070	0.001	0.000	0.000	0.002	—	—	—	—

表 2 不同类型水稻品种不同部位中 Pb 的含量(mg·kg⁻¹)

Table 2 Pb accumulation of various plant parts in different type cultivars(mg·kg⁻¹)

品种	根系			茎叶			糙米		
	处理	对照	处理/对照	处理	对照	处理/对照	处理	对照	处理/对照
籼稻品种	300.139	10.752	27.91	4.906	3.216	1.53	0.212	0.216	0.98
地方品种	243.444	8.508	28.61	6.622	3.465	1.91	0.213	0.175	1.22
粳稻品种	288.937	8.187	35.29	4.714	3.099	1.52	0.238	0.159	1.50

显著或极显著差异。可见,在对照($19.56 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)和胁迫($500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)条件下,不同品种不同部位对 Pb 的吸收积累能力存在明显差异,这种差异的存在为筛选或选育籽粒中对 Pb 低吸收或低积累的品种奠定了

表 3 对照和胁迫条件下不同部位中 Pb 含量的变异

Table 3 Variation of Pb accumulation in various plant parts under Pb stress and the control

项目	根系		茎叶		糙米	
	处理	对照	处理	对照	处理	对照
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	287.616	9.078	4.989	3.178	0.227	0.179
标准差	83.055	3.229	1.637	0.862	0.042	0.041
变异系数/%	28.88	35.57	32.82	27.12	18.34	22.93

表 4 对照和胁迫条件下植株不同部位中 Pb 含量方差分析的 F 值

Table 4 F value of Pb accumulation in various plant parts under Pb stress and the control

变异来源	根系		茎叶		糙米	
	处理	对照	处理	对照	处理	对照
品种	6.17**	17.23**	7.31**	5.68**	2.61*	4.22**

注: $F_{0.05}=2.59$; $F_{0.01}=3.89$ 。

基础。

多重分析表明(表 5、表 6),胁迫条件下根系中 Pb 的含量以宁 54146 为最高,它显著或极显著高于特青、IR26、苏御糯和大关稻,其次是扬稻 4 号;苏御糯和大关稻根系中 Pb 含量较低。茎叶中以韭菜青的 Pb 含量为最高,它极显著高于其他品种。糙米中以宁 54146 为最高,它显著或极显著高于除南梗 41 以外的其他品种。对照条件下,特青和 IR28 根系中 Pb 含量较高,它们显著或极显著高于其他品种,宁 54146 的含量较低。茎叶中 IR28 的含量较高,宁 54146 和扬稻 4 号的含量较低。糙米中特青的 Pb 含量较高,宁 54146 的含量较低。由此可见,不仅不同品种对 Pb 的吸收积累能力不同,而且同一品种在对照和胁迫条件下对 Pb 的吸收积累能力也不同,如对照条件宁 54146 根系、茎叶和糙米中 Pb 的含量均较低,而在胁迫条件下,其根系和糙米中 Pb 的含量最高,茎叶中的含量也较高。

胁迫条件下根系中 Pb 含量的差异较对照条件要复杂,而对照条件下茎叶和糙米中 Pb 含量的差异较胁迫条件下复杂,这进一步预示了不同品种对 Pb 胁

表 5 Pb 胁迫条件下品种间不同部位 Pb 含量的多重比较

Table 5 Multiple comparisons of Pb accumulation in various plant parts under Pb stress

品种	根/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	品种	茎叶/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	品种	糙米/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
宁 54146	407.519	a	A	韭菜青	9.032	a	A	宁 54146	0.323	a	A
扬稻 4 号	376.128	ab	AB	IR28	5.308	b	B	南梗 41	0.259	ab	AB
IR28	323.454	abc	ABC	特青	4.861	bc	B	IR26	0.222	b	AB
韭菜青	321.467	abc	ABC	扬稻 4 号	4.771	bc	B	韭菜青	0.218	b	AB
南梗 41	313.304	abc	ABCD	IR26	4.682	bc	B	扬稻 4 号	0.216	b	AB
特青	268.827	bcd	ABCD	宁 54146	4.636	bc	B	特青	0.215	b	AB
IR26	232.146	cd	BCD	苏御糯	4.334	bc	B	大关稻	0.207	b	B
苏御糯	180.277	d	CD	大关稻	4.212	bc	B	IR28	0.196	b	B
大关稻	165.421	d	D	南梗 41	3.070	c	B	苏御糯	0.184	b	B

表 6 对照条件下品种间不同部位 Pb 含量的多重比较

Table 6 Multiple comparisons of Pb accumulation in various plant parts under the control

品种	根/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	品种	茎叶/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$	品种	糙米/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	$F_{0.05}$	$F_{0.01}$
特青	15.005	a	A	IR28	4.256	a	A	特青	0.237	a	A
IR28	12.804	a	AB	苏御糯	4.060	ab	A	扬稻 4 号	0.220	ab	AB
大关稻	10.456	b	BC	韭菜青	3.948	abc	A	IR26	0.212	ab	AB
南梗 41	9.107	bc	CD	IR26	3.652	abc	A	IR28	0.195	abc	ABC
扬稻 4 号	8.766	bcd	CD	特青	3.003	bcd	AB	大关稻	0.182	abc	ABC
苏御糯	7.595	cd	CDE	大关稻	2.981	bcd	AB	韭菜青	0.167	bcd	ABC
韭菜青	6.560	de	DE	南梗 41	2.779	cd	AB	南梗 41	0.157	bcd	ABC
IR26	6.434	de	DE	宁 54146	1.974	d	B	苏御糯	0.129	cd	BC
宁 54146	4.971	e	E	扬稻 4 号	1.951	d	B	宁 54146	0.116	d	C

迫响应的复杂性。

2.3 植株不同部位对 Pb 的吸收积累特点

对照和胁迫条件下,植株不同部位中 Pb 的含量从高到低依次为根系>茎叶>糙米,其中,根系中 Pb 的含量远远高于茎叶和糙米(表 7)。对照条件下,根系中 Pb 含量在 4.971~15.005 mg·kg⁻¹ 之间,平均 9.078 mg·kg⁻¹,茎叶和糙米中的平均含量分别为 3.178 mg·kg⁻¹ 和 0.179 mg·kg⁻¹,约是根系含量的 1/3 和 1/50。胁迫条件下,根系中 Pb 的含量变幅为 165.42~407.519 mg·kg⁻¹,平均 287.616 mg·kg⁻¹,而茎叶和糙米中的平均含量分别为 4.989 mg·kg⁻¹ 和 0.227 mg·kg⁻¹,约是根系含量的 1/58 和 1/1 267。由此可见,无论在对照和胁迫条件下,植株不同部位中 Pb 的含量差异明显,根系是 Pb 积累的主要部位,尤其是在胁迫条件下。

本研究中试验土样 Pb 的背景值为 19.56 mg·kg⁻¹,而胁迫浓度为 500 mg·kg⁻¹,两者相差约 25 倍;胁迫条件下根系中 Pb 的平均含量是对照的 36.34 倍,茎叶和糙米中的平均含量分别是对照的 1.65 倍和 1.36 倍。由此表明,水稻根系对 Pb 具有较强的吸收积累能力,而 Pb 由根部向地上部运输时受到了明显阻碍,使得胁迫条件下根系中虽然积累了大量的 Pb,但运输至穗部最终在糙米中积累的量与对照相比差异很小。据此推测,在 Pb 污染区种植水稻对人类构成的风险较小,同时也表明,清除稻株残体,尤其是稻株根系,是降低土壤 Pb 污染的有效途径。

2.4 植株不同部位 Pb 含量的相关性

对照和胁迫条件下,以根系与糙米间的相关系数较高,其次是根系和茎叶,茎叶与糙米间的相关系数较低。显著性分析表明,无论是对照或胁迫条件下,不同部位间 Pb 含量的相关系数均不显著。由此表明,植株不同部

位中 Pb 含量的多少不存在相关性,根系中积累较多的 Pb 并不预示其茎叶或糙米中也积累较多 Pb。

3 讨论

3.1 对照和胁迫条件下不同品种 Pb 积累的差异

不同作物根系分泌特性的差异导致了其根际土壤中 Pb 有效性的不同^[9-10]。水稻籽粒中重金属含量存在显著的基因型差异^[11-14],这种差异可能与根系的分泌特性和根系的吸收能力有关。本研究表明,无论在对照和胁迫条件下,不同品种根系、茎叶和糙米中 Pb 的含量均存在极显著差异,同一品种在对照和胁迫条件下 Pb 的含量差异明显。如对照条件下,宁 54146 根系、茎叶和糙米中 Pb 的含量均较低,但胁迫条件下,根系和糙米中 Pb 的含量为最高,茎叶中的含量也较高,表明了不同品种对不同浓度 Pb 胁迫响应的差异性,阐明这种差异的遗传机理将有益于籽粒中 Pb 低吸收或低积累品种的选育。

不同类型水稻不同部位对 Pb 胁迫的响应特性不同,粳稻品种根系和糙米中 Pb 的相对含量较高,地方品种的茎叶中 Pb 的相对含量较高。当然,本研究涉及的 3 种类型水稻的品种数量较少,研究结果有待进一步验证。

3.2 对照和胁迫条件下不同部位中 Pb 积累的差异

有关水稻植株不同部位对 Pb 的吸收、运输和积累特性已有较多报道。刘建国等研究表明,在胁迫浓度为 800 mg·kg⁻¹ 条件下,水稻籽粒中平均 Pb 浓度仅为成熟期根的 1/1 217,茎的 1/180,叶的 1/63^[15],张潮海等在受 Pb 污染较严重的矿区进行研究后认为土壤 Pb 对糙米污染的可能性较低^[16]。

本研究表明,在 500 mg·kg⁻¹ 胁迫条件下,根系中 Pb 的含量是对照的 36.34 倍,而茎叶和糙米仅是对照

表 7 对照和胁迫条件下植株不同部位中 Pb 的含量(mg·kg⁻¹)

Table 7 Pb accumulation in various plant parts under Pb stress and the control(mg·kg⁻¹)

品种	根系			茎叶			糙米		
	处理	对照	处理/对照	处理	对照	处理/对照	处理	对照	处理/对照
IR28	323.454	12.804	25.26	5.308	4.256	1.25	0.196	0.195	1.01
IR26	232.146	6.434	36.08	4.682	3.652	1.28	0.222	0.212	1.05
韭菜青	321.467	6.560	49.00	9.032	3.948	2.29	0.218	0.167	1.31
大关稻	165.421	10.456	15.82	4.212	2.981	1.41	0.207	0.182	1.14
苏御糯	180.277	7.595	23.74	4.334	4.060	1.07	0.184	0.129	1.43
特青	268.827	15.005	17.92	4.861	3.003	1.62	0.215	0.237	0.91
宁 54146	407.519	4.971	81.97	4.636	1.974	2.35	0.323	0.116	2.79
扬稻 4 号	376.128	8.766	42.91	4.771	1.951	2.45	0.216	0.220	0.98
南粳 41	313.304	9.107	34.40	3.070	2.779	1.10	0.259	0.157	1.65

的1.65倍和1.36倍,也就是说,胁迫条件下,Pb主要积累在根系中,而由根系向茎叶和籽粒中运输受到明显抑制,土壤Pb污染对水稻食用部位(糙米、精米)污染的风险较小。同时也表明,在Pb污染区清除根系等稻株残体是有效降低土壤Pb污染的重要途径。

3.3 植株不同部位中Pb积累的关系

一般而言,水稻根、茎叶、籽粒间的重金属含量存在相关性^[17-18]。冯文强等报道,稻草及精米中Pb、Cd含量的相关系数达极显著水平^[9];李坤权等研究表明,同一浓度下,水稻不同品种根、茎叶、籽粒间的镉含量的相关性很差^[20]。本研究表明,无论是对照或胁迫条件下,植株不同部位间Pb含量的相关系数均不显著,因此,选育植株不同部位中Pb低积累的品种,尤其是籽粒中低吸收或低积累的品种是可能的。

参考文献:

- [1] 张正洁,李东红,许增贵.我国铅污染现状、原因及对策[J].环境保护科学,2005,31(4):41-42.
ZHANG Zheng-jie, LI Dong-hong, XU Zeng-gui. Present conditions, reasons and measures of lead pollution in China[J]. *Environmental Protection Science*, 2005, 31(4):41-42.
- [2] Wang S C, Li X D, Zhang G, et al. Heavy metal in agricultural soils of the Pearl River Delta, South China [J]. *Environmental Pollution*, 2002, 119:33-44.
- [3] 陈 凤,濮励杰.快速城市化地区土壤重金属污染物的分布——以昆山市为例[J].生态与农村环境学报,2006,22(1):54-57.
CHEN Feng, PU Li-jie. Distribution of heavy metals in soils of fast-urbanizing regions—with kunshan as a case study[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 2006, 22(1):54-57.
- [4] 彭 楠.铅与人类健康[J].现代预防医学,2004,31(1):91-94.
PENG Nan. Pb and human health[J]. *Modern Preventive Medicine*, 2004, 31(1):91-94.
- [5] 许明辉,姚春馨,罗黎明,等.水稻铅积累基因型差异及其对铅胁迫的反应[J].西南农业学报,2007,20(5):970-973.
XU Ming-hui, YAO Chun-xin, LUO Li-ming, et al. Effects of Pb stress on the agronomic characters and antioxidant enzymes of different rice genotypes[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2007, 20(5):970-973.
- [6] Cheng Wang-Da, Zhang Guo-Ping, Yao Hai-Gen, et al. Genotypic and environmental variation in cadmium, chromium, arsenic, nickel, and lead concentrations in rice grains[J]. *Journal of Zhejiang University Science B*, 2006, 7(7):565-571.
- [7] Li J X, Yang X E, He Z L, et al. Fractionation of lead in paddy soils and its bioavailability to rice plants[J]. *Geoderma*, 2007, 141:174-180.
- [8] 宋玉芝.土壤铅污染对水稻生长影响的研究[J].南京气象学院学报,2005,28(4):536-542.
SONG Yu-zhi. Impacts of increased Pb pollutant in soil on rice growth[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2005, 28(4):536-542.
- [9] 林 琦,陈怀满,郑春荣,等.根际和非根际土中铅、镉行为及交互作用的研究[J].浙江大学学报(农业与生命科学版),2000,26(5):527-532.
LIN Qi, CHEN Huai-man, ZHENG Chun-rong, et al. Chemical behavior of Cd, Pb and their interaction in rhizosphere and bulk[J]. *Journal of Zhejiang University(Agric. & Life Sci.)*, 2000, 26(5):527-532.
- [10] 莫 争,王春霞,陈 琴,等.重金属Cu Pb Zn Cr Cd在土壤中的形态分布和转化[J].农业环境保护,2002,21(1):9-12.
MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN Qin, et al. From distribution and transformation of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in soils[J]. *Agro-environmental Protection*, 2002, 21(1):9-12.
- [11] Arao T, Ae N. Genotypic variation in cadmium levels of rice grain[J]. *Soil Science, Plant Nutrition*, 2003, 49(4):473-479.
- [12] Liu J G, Liang J S, Li K Q, et al. Correlations between cadmium and mineral nutrients in absorption and accumulation in various genotypes of rice under cadmium stress[J]. *Chemosphere*, 2003, 52:1467-1473.
- [13] 蒋 彬,张慧萍.水稻精米中铅镉砷含量基因型差异的研究[J].云南师范大学学报(自然科学版),2002,22(3):37-40.
JIANG Bin, ZHANG Hui-ping. Genotypic differences in concentrations of plumbum, cadmium and arsenicum in polished rice grains[J]. *Journal of Yunnan Normal University(Nature Science)*, 2002, 22(3):37-40.
- [14] 翁国华,何花榕.水稻稻谷对铅累积量的基因型差异研究[J].福建稻麦科技,2006,24(3):6-8.
WENG Guo-hua, HE Hua-rong. Paddy rice lead to the accumulation of differences in the genotypes studied[J]. *Fujian Science and Technology of Rice and Wheat*, 2006, 24(3):6-8.
- [15] 刘建国,李坤权,张祖建,等.水稻不同品种对铅吸收、分配的差异及机理[J].应用生态学报,2004,15(2):291-294.
LIU Jian-guo, LI Kun-quan, ZHANG Zu-jian, et al. Difference of lead uptake and distribution in rice cultivars and its mechanism[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2):291-294.
- [16] 张潮海,华村章,邓汉龙,等.水稻对污染土壤中镉、铅、铜、锌的富集规律的探讨[J].福建农业学报,2003,18(3):147-150.
ZHANG Chao-hai, HUA Cun-zhang, DENG Han-long, et al. Investigation on the enrichment of Cd, Pb, Cu and Zn by rice in the field near a smelting plant[J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2003, 18(3):147-150.
- [17] 马朝红,曾德生.土壤中镉对水稻生长的影响[J].湖北农业科学,1992(2):26-30.
MA Chao-hong, ZENG De-sheng. Effect of cadmium on growth in rice[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 1992(2):26-30.
- [18] Youngberg B L. Differential responses of Australian wheat cultivar to cadmium concentration in wheat grain[J]. *Aust J Agric Res*, 1991, 46:873-886.
- [19] 冯文强,涂仕华,秦鱼生,等.水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究[J].农业环境科学学报,2008,27(2):447-451.
FENG Wen-qiang, TU Shi-hua, QIN Yu-sheng, et al. Uptake capacity of different rice genotypes for lead and cadmium from soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(2):447-451.
- [20] 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-Environment Science*, 2003, 22(5):529-532.