

# 水稻不同基因型对铅镉吸收能力差异的研究

冯文强<sup>1,2</sup>, 涂仕华<sup>1,2</sup>, 秦鱼生<sup>1,2</sup>, 熊洪<sup>3</sup>, 徐富贤<sup>3</sup>, 孙锡发<sup>1</sup>, 廖鸣兰<sup>1</sup>

(1.四川省农业科学院土壤肥料研究所, 四川 成都 610066; 2.农业部长江上游农业资源与环境重点开放实验室, 四川 成都 610066; 3.四川省农业科学院水稻高粱研究所, 四川 泸州 646000)

**摘要:** 利用盆栽试验探讨了四川 20 个水稻育种材料(其中保持系和恢复系各 10 个品系)对外源污染物铅(Pb)、镉(Cd)的吸收能力及这两种重金属在稻草和稻米中的分配差异。结果表明, Pb 或 Cd 胁迫下, 水稻不同基因型对其吸收存在明显差异。在供试验材料中, 最不易受 Pb 污染材料为 Y11, 稻米未检出 Pb, 其稻草中的 Pb 最不易向子粒转移; 最不易受 Cd 污染的材料为 Y16, 稻米含 Cd 0.15 mg·kg<sup>-1</sup>, 含量低于无公害大米标准(NY5115-2002)。最易受 Pb 污染的材料分别为 Y07 和 Y17, 而最易受 Cd 污染的材料分别为 Y07、Y05 和 Y17。稻米对 Cd 的富集能力大大高于对 Pb 的富集能力。恢复系抗 Pb 或 Cd 污染的能力优于保持系。

**关键词:** 水稻基因型; 重金属; 保持系; 恢复系; 精米

**中图分类号:** X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-2043(2008)02-0447-05

## Uptake Capacity of Different Rice Genotypes for Lead and Cadmium from Soil

FENG Wen-qiang<sup>1,2</sup>, TU Shi-hua<sup>1,2</sup>, QIN Yu-sheng<sup>1,2</sup>, XIONG Hong<sup>3</sup>, XU Fu-xian<sup>3</sup>, SUN Xi-fa<sup>1</sup>, LIAO Ming-lan<sup>1</sup>

(1. Soil and Fertilizer Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Chengdu 610066, China; 2. Key Laboratory of Agricultural Resources and Environment of Upper Reaches of Yangtze River, Ministry of Agriculture, Chengdu 610066, China; 3. Rice and Sorghum Institute, Sichuan Academy of Agricultural Sciences, Luzhou 646000, China)

**Abstract:** This study investigated the differences of 20 rice genotypes (10 maintainers and 10 restorers) selected in Sichuan in their capability in uptake of the added Pb and Cd from soil and in their distribution between the straw and the seed in a pot trial. Results showed that under the pollution of Pb or Cd, there were remarkable differences among different genotypes. The Y11 appeared highest resistance to uptake of Pb without any Pb detected in the seed—least transferable material for Pb from the straw to the seed and the Y16 was highly resistant to uptake of Cd with only 0.15 mg·kg<sup>-1</sup>, producing high quality rice superior to the Pollution-Free Standard for Rice (NY5115—2002) in China. The most vulnerable materials to Pb pollution were Y07 and Y17 and those to Cd were Y07, Y05 and Y17. All the rice materials tended to accumulate more Cd than Pb. The restorer lines showed higher resistance to uptake of Pb or Cd than the maintainer lines.

**Keywords:** rice genotype; heavy metal; lead; cadmium; maintainer; restorer; polished rice

我国是亚洲栽培稻的起源地之一, 是世界上的水稻主产国之一, 约有三分之二的人口以大米为主食<sup>[1]</sup>。因此, 稻米的产量和品质问题, 备受人们的关注<sup>[2-4]</sup>。近年来, 随着人口增加以及工农业的快速发展, 农田土

壤重金属污染也随之加重。在众多的作物中, 水稻是易被重金属, 尤其是镉(Cd)污染的作物之一。这一方面是因为其特殊的生长环境条件, 另一方面是因为水稻对 Cd 的吸收力强, 这给防治水稻的 Cd 污染带来了极大挑战。近年来, 科学家们已先后利用物理、化学和生物等一系列的措施来研究防治土壤重金属污染问题, 已取得了不少可喜的进展。衣纯真<sup>[5]</sup>、张亚丽<sup>[6]</sup>等研究了利用化学元素间的相互作用或有机肥中有机物与重金属间的反应, 来降低稻米中重金属的可能性, 但目前仍然缺少简便、经济和长效的技术。利用吸收重金属能力低的水稻基因型材料选育高抗重金属污染的水稻品种, 是水稻抗重金属污染育种的新方

收稿日期: 2007-05-22

**基金项目:** 农业部重大结构专项项目“稻米质量安全技术与示范(2004-01-06b)”、“十一五”科技支撑计划重大项目粮食丰产科技工程“四川盆地单季籼稻丰产高效技术集成研究与示范(2006BAD02A05)”

**作者简介:** 冯文强(1967—), 男, 四川苍溪人, 副研究员, 从事植物营养与肥料以及土壤环境生态的研究。

E-mail: fwenqiang@163.com

**通讯作者:** 涂仕华 E-mail: stu@ipni.net

向,也是解决重金属污染土壤种稻的长效机制。本研究在四川目前主要的水稻育种材料中挑选了恢复系和保持系各 10 个品系,开展了相关试验。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

盆栽试验安排在成都市外东四川省农业科学院土壤肥料研究所盆栽场。

### 1.2 供试材料

在目前四川省主要的水稻育种材料中挑选出恢复系和保持系各 10 个品系,由四川省农业科学院水稻高粱研究所提供。

### 1.3 供试土壤及试验设计

供试土壤为成都平原的灰色冲积水稻土。供试土壤样品采集深度为 0~20 cm 的耕作层。土壤的 pH 为 4.96,碱解氮  $178.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,Olsen 磷  $30.58 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,有效钾  $77.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,全氮 0.174%,有机质 2.93%,铅  $25.5 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,镉  $0.116 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

除去土壤中的植物残根,风干、研细。用 8 kg 土与外源污染物充分混匀,装入试验专用盆钵。把底肥施入盆钵 0~15 cm 表层,加水至土壤饱和,并保持 3 cm 水层,静置 2 d 后插秧,每盆 3 苗。

### 1.4 试验处理

根据稻田土壤环境质量标准(GB15618—1995)<sup>[7]</sup>的重金属临界指标,当 pH<6.5 时,其铅、镉指标分别是  $\leq 250 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $\leq 0.30 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。试验采用外源加入  $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  或  $\text{CdCl}_2$ 。为了使试验中水稻能吸收足量的 Pb 和 Cd 并产生不同基因型间的明显分异,Pb 和 Cd 的加入量达到 2 倍土壤临界值,即  $500 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $0.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ , $\text{Pb}(\text{NO}_3)_2$  以固体形式加入  $3.796 \text{ g}\cdot\text{盆}^{-1}$ ,并与全层土壤混匀, $\text{CdCl}_2$   $3.8 \text{ mg}\cdot\text{盆}^{-1}$ ,配成 200 mL 溶液后与全层土壤混匀。平衡稳定 15 d 后,再栽插水稻。

两处理(加 Pb 与加 Cd),20 个育种材料,重复 5 次。即加 Pb 处理 20 个,100 盆;加 Cd 处理 20 个,100 盆,总共 200 盆,随机排列,并在周围设置保护行。

水稻收获后分析精米和稻草中的 Pb 或 Cd 的含量。

### 1.5 肥料的施用

按施 N  $120 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{P}_2\text{O}_5$   $60 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ , $\text{K}_2\text{O}$   $90 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$  计算用量。肥料选用尿素、磷酸一铵和氯化钾。磷酸一铵作底肥一次施用;尿素分底肥、分蘖肥与粒肥施用,其比例为 6:3:1;氯化钾分底肥与追肥施用,其

比例为 5:5。即底肥每盆施磷铵 0.73 g,氯化钾 0.4 g 和尿素 0.66 g。追肥用氯化钾 0.4 g,分蘖肥用尿素 0.42 g,粒肥追尿素 0.14 g。

### 1.6 分析测试与统计

土壤的常规分析在四川省农科院土壤肥料研究所土壤农化分析室中分析,土壤中的 Pb、Cd 含量按 GB 15618—1995 中的方法在四川省农科院土壤肥料研究所土壤农化分析室中分析;稻谷及稻草样品送农业部稻米及制品质量监督检验测试中心按国标 GB/T 5009.12—2003 和 GB/T 5009.15—2003 测定精米及稻草中的 Pb、Cd 含量。

所有的统计分析均采用 DPSv3.01 专业版统计软件进行。

## 2 结果与讨论

### 2.1 精米中铅和镉含量的基因型差异

精米中铅、镉含量存在显著的基因型差异,铅的最低含量未能检出,最高为  $1.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $(0.987\pm 0.44) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,变异系数是 45%;而镉的最低含量为  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,最高为  $3.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,平均值为  $(1.027\pm 0.823) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,变异系数是 80%。Cd 含量的变异系数高于 Pb 含量的变异系数近一倍。结果表明,即使在土壤重金属含量严重超标的情况下,不同的基因型水稻品种对铅镉的吸收存在明显差异,特别是对 Cd 吸收差异更大。

稻米中对 Pb 积累最少的是 Y11,未检出 Pb 含量,小于无公害大米标准(NY5115—2002)<sup>[8]</sup>中 Pb 含量  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的指标,其余基因型都大于这个标准。对 Cd 积累最少的是 Y16,Cd 含量为  $0.15 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,符合 Cd 含量小于  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的无公害大米标准(NY5115—2002)<sup>[8]</sup>(表 1)。最易积累 Pb 的材料为 Y07 及 Y17,Pb 含量分别为  $1.89 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $1.77 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ;最易积累 Cd 的材料为 Y07、Y17 和 Y05,Cd 含量分别为  $3.04 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $2.68 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  和  $2.42 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

精米中 Pb、Cd 含量的频率分布(图 1)表明,稻米 Pb、Cd 含量小于  $0.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  的品种各占 5%。Pb、Cd 含量主要集中在  $0.4\sim 1.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  范围,分别占 50%和 60%。但高 Cd 含量品种所占的比例要大于高 Pb 含量所占的比例,Pb 含量都在  $2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  以下,而 Cd 含量大于  $2.0 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  还占 15%。这说明供试的水稻材料总体上更容易富集 Cd,程旺大<sup>[9]</sup>和张潮海<sup>[10]</sup>在其他地区的研究也有同样的报道。

表 1 试验材料精米中 Pb、Cd 含量

Table 1 Concentrations of Pb and Cd in the polished rice

代号	Pb 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Y01	0.68	1.34
Y02	0.68	0.45
Y03	0.99	0.86
Y04	1.43	1.15
Y05	1.49	2.68
Y06	0.97	0.94
Y07	1.89	3.04
Y08	1.17	1.77
Y09	0.71	0.68
Y10	1.22	0.93
Y11	未检出	0.42
Y12	1.1	0.46
Y14	0.94	0.80
Y15	0.65	0.25
Y16	0.57	0.15
Y17	1.77	2.42
Y18	0.7	0.52
Y19	1.05	0.72
Y20	1.08	0.55
Y21	0.65	0.41
最低值	未检出	0.15
最高值	1.89	3.04
平均值	$0.987 \pm 0.44$	$1.027 \pm 0.823$
变异系数 C.V.	45%	80%

表 2 试验材料稻草中 Pb、Cd 含量

Table 2 Concentrations of Pb and Cd in straw

代号	Pb 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	Cd 含量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
Y01	143.85	3.75
Y02	79.7	2.37
Y03	55.15	1.94
Y04	162.65	5.64
Y05	186.65	8.94
Y06	128.75	4.84
Y07	172.75	6.84
Y08	163.95	4.77
Y09	81.35	2.59
Y10	119.55	3.75
Y11	65.45	3.83
Y12	70.8	2.07
Y14	51.85	3.38
Y15	39.48	1.75
Y16	31.57	1
Y17	144.25	7.91
Y18	60.75	2.87
Y19	67.9	3.17
Y20	58.6	3.48
Y21	75.45	3.14
最低值	31.57	1.00
最高值	187.00	8.94
平均值	$98.02 \pm 49.32$	$3.902 \pm 2.074$
变异系数 C.V.	50%	53%

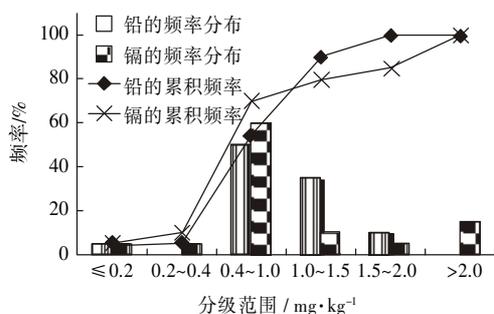


图 1 精米中 Pb、Cd 含量的频率分布图

Figure 1 Histogram of frequency distribution of concentrations of Pb and Cd in polished rice

但供试品系的稻草中 Pb 主要集中在 50~150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围内, 约占 70%, 小于 150  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的材料约占 80%(图 2), 稻草中 Pb 含量最低的是 Y16。

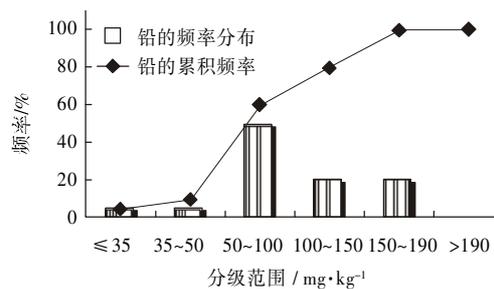


图 2 稻草中 Pb 含量的频率分布图

Figure 2 Histogram of frequency distribution of Pb concentration in rice straw

## 2.2 稻草中铅镉含量的基因型差异

稻草中 Pb 的最低含量为 31.57  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最高为 187.00  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(98.02 \pm 49.32)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变异系数是 50%; 而 Cd 的最低含量为 1.00  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 最高为 8.94  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 平均值为  $(3.902 \pm 2.074)$   $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ , 变异系数是 53%。这表明各基因型的稻草对 Pb 和 Cd 吸收积累的差异表现一致。

而稻草中 Cd 主要集中在 2~6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  范围内, 约占 70%, 小于 6  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  的材料约占 95%(图 3), 稻草中 Cd 含量最低的同样也是 Y16。

## 2.3 精米和稻草中铅或镉含量的相互关系

将所有供试基因型的稻草与精米中 Pb、Cd 含量

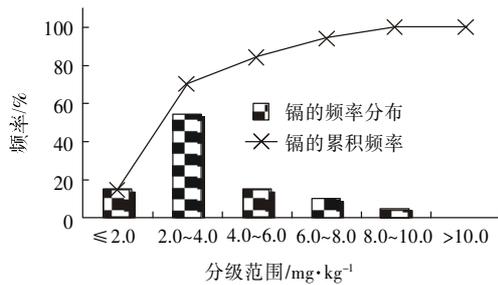


图3 稻草中Cd含量的频率分布图

Figure 3 Histogram of frequency distribution of Cd concentration in rice straw

进行相关分析,得出稻草及精米中Pb含量的相关系数 $r=0.6779$ ,决定系数 $R^2=0.4597$ ,关系式为 $y=0.0061x+0.3909$ ,达极显著水平。而稻草及精米中Cd含量的相关系数 $r=0.8931$ ,决定系数 $R^2=0.7979$ ,关系式为 $y=0.3557x-0.3607$ ,达极显著水平。这说明稻草中重金属的含量与精米中的含量呈极显著正相关,即稻草中重金属含量高,其精米中含量亦高,王凯荣等<sup>[11]</sup>的研究也有类似结果。

表3 稻草及精米中Pb或Cd含量的比值

Table 3 The ratio of concentrations of Pb and Cd in straw to those in polished rice

代号	稻草 Pb/精米 Pb	稻草 Cd/精米 Cd
Y01	212	3
Y02	117	5
Y03	56	2
Y04	114	5
Y05	125	3
Y06	133	5
Y07	91	2
Y08	140	3
Y09	115	4
Y10	98	4
Y11	?	9
Y12	64	5
Y14	55	4
Y15	61	7
Y16	55	7
Y17	81	3
Y18	87	6
Y19	65	4
Y20	54	6
Y21	116	8
最低值	0	2
最高值	212	9
平均值	92	5
变异系数 C.V.	49%	41%

将稻草中重金属含量与精米中含量的比值进行比较(表3),比值越大,表明重金属越难于向子粒中转移,越小则易于转移。其结果是:Pb的平均比值为92,最小为54,是Y20,因为Y11的精米中未检出Pb,因此其比值最大,几乎不向子粒转移。而Cd的平均比值为5,最小为2,即Y07;最大为9,仍是Y11。Y11这种阻止Pb和Cd向子粒转移的特性将为今后的抗Pb、Cd污染育种提供了极佳的材料。

综合分析表1、表2及表3可得知,虽然稻草中Pb与Cd含量相差1至2个数量级,但精米中的Pb、Cd含量却在同一数量级,这表明稻草中Cd比Pb更容易向子粒中转移。

#### 2.4 保持系与恢复系吸收Pb、Cd的差异

将精米中Pb含量按保持系和恢复系分别统计,其部分统计结果如表4。从表中可知,保持系精米Pb含量的最小、最大及平均值都大于恢复系,而变异系数小于恢复系。

表4 精米中保持系与恢复系吸收Pb的差异部分统计基本量

Table 4 Some statistics of concentrations of Pb in polished rice for different lines

系别	最小/mg·kg <sup>-1</sup>	最大/mg·kg <sup>-1</sup>	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%
保持系	0.680	1.890	1.123±0.399	36
恢复系	未检出	1.770	0.851±0.461	54

将精米中Cd含量按保持系和恢复系分别统计,部分统计结果如表5。其结果同Pb的情况相似,保持系精米Cd含量的最小、最大及平均值都大于恢复系,而变异系数小于恢复系,恢复系变异系数达96%。

表5 精米中保持系与恢复系吸收Cd的差异部分统计基本量

Table 5 Some statistics of concentrations of Cd in polished rice for different lines

系别	最小/mg·kg <sup>-1</sup>	最大/mg·kg <sup>-1</sup>	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%
保持系	0.450	3.040	1.384±0.861	62
恢复系	0.150	2.420	0.670±0.640	96

同样,将稻草中的Pb、Cd含量按保持系和恢复系分别统计,如表6。其结果与精米中的Pb、Cd含量统计量的差异一致,即保持系中Pb、Cd含量的最小、最大及平均值都大于恢复系,而变异系数小于恢复系。

这可能是由于通常保持系与恢复系相比,生育期短、长势弱、总的生物产量低<sup>[12]</sup>,其吸收的重金属会因

表6 稻草中保持系与恢复系吸收 Pb、Cd 的差异部分统计基本量  
Table 6 Some statistics of concentrations of Cd in rice straw for different lines

试验的重金属	系别	最小/mg·kg <sup>-1</sup>	最大/mg·kg <sup>-1</sup>	平均值/mg·kg <sup>-1</sup>	变异系数/%
Pb	保持系	55.15	186.65	129.44±44.79	35
	恢复系	31.57	144.25	66.62±30.56	46
Cd	保持系	1.94	8.94	4.54±2.17	48
	恢复系	1.00	7.91	3.26±1.86	57

“浓缩效应”而使其重金属含量增高,而恢复系由于长势强、生物量高会因“稀释效应”<sup>[13]</sup>,使重金属含量降低。

这表明在 Pb、Cd 胁迫下,总体上看,供试的保持系稻草和精米中 Pb、Cd 含量比恢复系高,且其含量值集中在某一值附近,而恢复系精米 Pb、Cd 含量总体上比保持系低,但其含量的高低较分散。此结果说明,在恢复系中更易获得低 Pb、Cd 含量的基因型,这为抗重金属污染育种提供了亲本选择方向。

### 3 小结

在土壤受重金属污染的情况下,供试的不同基因型水稻品种对铅镉的吸收存在明显差异,存在很好的抗重金属污染材料。稻草中重金属的含量与精米中的含量呈极显著关系。一般来说,稻草中 Cd、Pb 含量高,精米中含量亦高;但抗性材料如 Y11 则不表现出这种关系。在 Pb、Cd 胁迫下,无论是保持系,还是恢复系,Cd 比 Pb 更易于在稻米中累积;总体上看,供试的保持系稻草和精米中 Pb、Cd 含量比恢复系高。综合精米及稻草中 Pb、Cd 含量情况,在所供试的各基因型中,Y16 是最不易被重金属污染的,其次是 Y11;易被重金属污染的是 Y07,其次是 Y17。

### 参考文献:

- [1] 张宪虎,孙传清.我国不同地区稻种资源的 Fe、Zn、Ca、Se 四种元素的含量分析[J].北京农业大学学报,1995,2(2):138-142.
- [2] 余守武,刘宜柏.土壤-水稻系统重金属污染的研究现状和展望[J].江西农业学报,2004,16(1):41-48.
- [3] 肖美秀,梁义元,梁康迳,等.水稻重金属污染及其控制技术的研究进展[J].亚热带农业研究,2005,1(3):40-43.
- [4] 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.
- [5] 衣纯真,傅桂平,张福锁.不同钾肥对水稻镉吸收和运移的影响[J].中国农业大学学报,1996,1(3):65-70.
- [6] 张亚丽,沈其荣,姜洋.有机肥料对镉污染土壤的改良效应[J].土壤学报,2001,38(2):212-218.
- [7] GB 15618-1995 中华人民共和国国家标准,土壤环境质量标准[S].
- [8] NY5115-2002 农业行业标准,无公害大米标准[S].
- [9] 程旺大.水稻子粒有毒重金属含量的基因型和环境效应研究[D].浙江大学,2004.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 水稻知识网 ([http://www.knowledgebank.irri.org/regionalSites/china/06\\_IntegTech/default.htm](http://www.knowledgebank.irri.org/regionalSites/china/06_IntegTech/default.htm)) 三系杂交稻繁殖技术,2007.4.20.
- [13] 何忠俊,华璐,梁社往,等.氮锌复合作用对白三叶草生长、氮锌吸收和生理生化特性的影响[J].土壤通报,2006,37(2):318-322.