

锌铬复合污染对稻米品质的影响

朱雪梅¹, 邵继荣², 林立金³, 将小军¹, 杨远祥¹, 张青松¹

(1.四川农业大学资源环境学院, 四川 雅安 625014; 2.四川农业大学生命理学院, 四川 雅安 625014; 3.雅安水土保持生态环境监测分站, 四川 雅安 625000)

摘 要:为了揭示重金属复合污染对稻米品质的影响规律,为研究水稻安全生产提供一定的理论基础,本文就成都平原常见的重金属污染元素——锌、铬施入土壤中,进行盆栽试验,对稻米品质进行了研究。结果表明,锌铬复合污染对稻米碾米品质及粒形影响的规律不明显。随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米垩白米率、粗蛋白含量呈增加的趋势($P<0.01$),而直链淀粉含量呈降低的趋势($P<0.01$)。水稻子粒中锌含量随土壤中锌浓度的增加而呈增加的趋势($P<0.01$),与土壤中铬浓度变化规律不明显($P>0.05$);水稻子粒铬含量随土壤中锌、铬浓度的增加而增加($P<0.01$)。土壤中锌、铬浓度对水稻籽粒中铬含量产生了协同效应(偏相关系数分别为0.955 0**和0.845 2**)。

关键词: 锌铬复合污染; 稻米品质; 重金属

中图分类号: X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672–2043(2008)06–2297–06

Effects of Compound Pollution of Zn and Cr on Quality of Rice Grain

ZHU Xue-mei¹, SHAO Ji-rong², LIN Li-jin³, JIANG Xiao-jun¹, YANG Yuan-xiang¹, ZHANG Qing-song¹

(1.College of Resource and Environment, Sichuan Agricultural University, Ya’an 625014, China; 2.College of Life Science, Sichuan Agricultural University, Ya’an 625014, China; 3.Yaan Soil & Water Conservation and Eco-environment Monitoring Station, Ya’an 625000, China)

Abstract: In order to reveal the laws of heavy metals pollution effects on the quality of rice grain, and provide a theoretical basis to safety of rice production, the common elements(Zn and Cr)of heavy metal pollution in Chengdu Plain were added into the soil, and studied the quality of rice grain in a soil pot experiment. The results were as follows: With increasing of contents of Zn and Cr in the soil, the changes in the law of milling quality and shape of rice grain were not obvious ($P>0.05$). The chalky rice rate and the crude protein content in rice grain increased ($P<0.01$), but the amylose content of rice grain decreased ($P<0.01$)with increasing of contents of Zn and Cr in the soil. The content of Zn in rice grain increased($P<0.01$)with increasing of content of Zn in the soil, but not obvious with Cr($P>0.05$). The content of Cr in rice grain increased with increasing of contents of Zn and Cr in the soil ($P<0.01$). Partial correlation analysis showed that Zn content in rice grain had highly significant correlation with Zn concentration in the soil (the partial correlation coefficient was 0.731 2**), and had no significant correlation with Cr concentration in the soil (the partial correlation coefficient was -0.101 3). However, Cr content in rice grain had highly significant correlation with Zn and Cr concentrations in the soil(the partial correlation coefficients were 0.955 0** and 0.845 2**, respectively). This indicated that the contents of Zn and Cr in the soil had synergy effects to Cr content in rice grain.

Keywords: compound pollution of Zn and Cr; quality of rice grain; heavy metal

近年来,随着我国工农业的发展,农田土壤环境受到重金属污染。据资料显示,金属矿山的开采^[1-3]、电

镀、制革行业^[4-5]及将垃圾或其渗滤液作为肥料施用于农田中^[6-9],都将显著地增加土壤中锌、铬等重金属的含量。由于土壤胶体对重金属阳离子吸附、交换和络合起着重要的作用,使大部分重金属离子被固定在耕作层中,而耕作层以下含量很少。研究表明,锌、铬等重金属在水稻土中的分布主要集中在 0~20 cm 土层内,而 20~40 cm 土层中含量较少^[10]。在自然条件下,铬离子常以Ⅲ价形式存在,在水中则以Ⅳ价和Ⅲ价的

收稿日期:2008–01–12
基金项目:四川省科技厅重点攻关项目(2006Z08–012);四川农业大学 2006 年校青年科技创新基金项目
作者简介:朱雪梅(1963—),女,四川仁寿人,教授,主要从事农业生态学及污染生态学研究。
通讯作者:邵继荣

形式共同存在^[11]。

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国的主要粮食作物之一,稻米品质的高低越来越受到重视。在土壤重金属胁迫下,水稻生长受到抑制,其体内酶活性及同功酶的表达受到影响^[12-15]。前人研究表明,镉、铅均能显著影响稻米营养品质,从而影响人体健康^[16-17]。就重金属在水稻植株体内积累而言,不同学者的研究结果有所差异,总的分布趋势为:根>茎叶>子粒^[18-20]。相对于根、茎叶而言,虽然重金属在水稻子粒中积累量较小,但其绝对含量已超出国家标准^[21]。这些有关重金属对稻米品质的研究大多局限于单一重金属元素的污染或水稻子粒中的重金属含量,有关重金属复合污染对稻米品质影响的报道甚少。由于农田生态环境较为复杂,各种重金属间往往存在协同、拮抗、屏蔽和独立作用^[22],致使重金属对水稻生长及稻米品质的影响变得复杂。鉴于此,本文就成都平原常见的重金属污染元素——锌、铬进行盆栽试验,研究这两种重金属元素复合污染对稻米品质的影响,揭示其变化规律,以期研究水稻安全生产提供一定的理论基础。

1 材料与方法

1.1 供试材料与试验设计

试验于 2006 年 4 月至 9 月在四川农业大学新区农场进行,为 2 因素 4 水平试验,A 因素为不同浓度的锌:0 mg·kg⁻¹ (A0),125 mg·kg⁻¹ (A1),250 mg·kg⁻¹ (A2),500 mg·kg⁻¹ (A3);B 因素为不同浓度的铬:0 mg·kg⁻¹ (B0),100 mg·kg⁻¹ (B1),200 mg·kg⁻¹ (B2),400 mg·kg⁻¹ (B3)。试剂采用分析纯 ZnCl₂ 和 CrCl₃·H₂O,浓度根据《土壤环境质量标准—GB 15618—1995》设计。试验材料为四川农业大学水稻所选育的中粳迟熟杂交稻组合品种 D 优多 1。供试土壤为紫色土,其基本理化性状:pH 值 6.05,有机质 22.93 g·kg⁻¹,全氮 1.33 g·kg⁻¹,全磷 1.00 g·kg⁻¹,全钾 26.96 g·kg⁻¹,碱解氮 120.90 mg·kg⁻¹,速效磷 62.24 mg·kg⁻¹,速效钾 153.27 mg·kg⁻¹。土壤重金属背景值(全量):锌 48.81 mg·kg⁻¹,铬 39.12 mg·kg⁻¹。土壤理化性质及重金属含量均按照参考文献[23]的方法测定。

用 25 cm×20 cm 塑料桶装入过 6.72 mm (3 目)筛的风干土 6.5 kg,同时每桶施入干鸡粪 100 g,尿素 2 g,过磷酸钙 4 g,硫酸钾 1 g,混匀,一周后按风干土质量加入各处理的重金属溶液,混匀,15 d 后(5 月 7 日)插秧(采用两段育秧法育苗),每桶 4 株,重复 3 次,共 12 桶。在重金属处理水稻期间(123 d),保持桶中的土壤

处于淹水状态。其他栽培管理与大田常规生产相同。

1.2 测定内容与方法

稻米碾米品质、外观品质、蒸煮食味品质及营养品质的各项具体指标均按农业部(1988)颁布的 NY147—1988 标准及方法测定,每个处理重复 3 次,结果取 3 次重复的平均值。其中,稻米粗蛋白换算系数为 5.95。按照参考文献[23]的方法测定水稻子粒中锌、铬含量。吸收系数=子粒锌(铬)含量/加入重金属后土壤锌(铬)全量。

用 Microsoft Excel 作图,DPS (数据处理系统)对数据进行方差分析及偏相关分析。

2 结果与讨论

2.1 锌铬复合污染对稻米碾米品质的影响

从表 1 可以看出,锌铬复合污染对稻米碾米品质的影响显著,但随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米的糙米率、精米率及整精米率的变化规律并不明显。糙米率、精米率及整精米率的最大值分别为 81.88% (A1B0)、74.38% (A2B2) 和 71.72% (A2B1),最小值分别为 80.14% (A3B0)、71.19% (A3B0) 和 68.16% (A0B0)。方差分析表明(表 3),锌浓度间及锌铬浓度互作间稻米糙米率、精米率和整精米率的差异均达极显著水平($P<0.01$);铬浓度间稻米糙米率的差异不显著($P>0.05$),精米率及整精米率的差异均达极显著水平($P<0.01$);锌铬浓度互作间稻米糙米率的差异达显著水平($0.05<P<0.01$),精米率及整精米率的差异均达极显著水平($P<0.01$)。

2.2 锌铬复合污染对稻米外观品质的影响

从表 2 可以看出,锌铬复合污染对稻米粒长、粒宽及长宽比影响的变化规律不明显,但垩白米率随土壤中锌、铬浓度的增加呈一定增加的趋势。稻米粒长、粒宽及长宽比的变化幅度较小,分别为 5.9~6.1 mm、2.3~2.5 mm 和 2.4~2.7 mm。稻米垩白米率最大值为 35.7% (A3B0),最小值为 25.3% (A2B2)。从处理间差异来看(表 3),锌浓度间及锌铬浓度互作间稻米粒长、粒宽和垩白米率的差异均达极显著水平($P<0.01$);铬浓度间稻米粒长的差异不显著($P>0.05$),粒宽及垩白米率的差异均达极显著水平($P<0.01$)。

2.3 锌铬复合污染对稻米蒸煮食味品质的影响

从图 1 可以看出,随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米直链淀粉含量的变化不同。随土壤中锌浓度的增加,稻米直链淀粉含量呈一定的降低趋势。锌浓度为 0 mg·kg⁻¹ 时,随铬浓度的增加,稻米直链淀粉含量先

表 1 锌铬复合污染对稻米碾米品质的影响			
Table 1 Effects of compound pollution of Zn and Cr on milling quality of rice grain			
处理	糙米率/%	精米率/%	整精米率/%
A0B0	81.40	72.29	68.16
A0B1	81.61	73.31	70.04
A0B2	81.87	73.99	70.63
A0B3	81.47	74.07	70.86
A1B0	81.88	74.31	69.90
A1B1	81.47	73.42	71.00
A1B2	81.23	73.25	70.43
A1B3	81.33	73.08	71.46
A2B0	81.43	73.94	71.58
A2B1	81.58	74.07	71.72
A2B2	81.21	74.38	71.04
A2B3	81.47	74.19	70.70
A3B0	80.14	71.19	68.85
A3B1	80.84	72.98	69.91
A3B2	80.41	72.04	69.07
A3B3	80.49	73.03	68.89

表 3 稻米碾米及外观品质的方差分析 <i>F</i> 值			
Table 3 <i>F</i> values of variance analysis on milling and appearance quality of rice grain			
碾米品质/外观品质	变异来源		
	Zn	Cr	Zn×Cr
糙米率	45.4**	1.4	2.8*
精米率	937.3**	132.3**	194.8**
整精米率	185.4**	46.6**	30.1**
粒长	5.5**	1.7	5.1**
粒宽	19.9**	19.8**	7.8**
垩白米率	229.4**	50.6**	156.6**

注： $F_{0.05}(3,30)=2.92$, $F_{0.01}(3,30)=4.51$, $F_{0.05}(9,30)=2.21$, $F_{0.01}(9,30)=3.06$ 。Zn、Cr 及 Zn×Cr 的自由度分别为 3、3、9，误差自由度为 30。* 和 ** 分别表示 0.05 和 0.01 的显著水平。下同。

降后增；锌浓度>0 mg·kg⁻¹时，则呈降低的趋势。方差分析表明(表 5)，锌浓度间、铬浓度间及锌铬浓度互作间稻米直链淀粉含量的差异均达极显著水平 ($P<0.01$), F 值分别为 26.25**、40.10** 和 5.00**。

2.4 锌铬复合污染对稻米营养品质的影响

2.4.1 锌铬复合污染对稻米粗蛋白含量的影响

从图 2 可以看出,随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米粗蛋白含量均呈增加的趋势。从处理间差异来看(表 5),锌浓度间、铬浓度间及锌铬浓度互作间稻米粗蛋白含量的差异均达极显著水平 ($P<0.01$), F 值分别为 164.04**、3 537.81** 和 831.29**。

表 2 锌铬复合污染对稻米外观品质的影响				
Table 2 Effects of compound pollution of Zn and Cr on appearance quality of rice grain				
处理	粒长/mm	粒宽/mm	长/宽	垩白米率/%
A0B0	6.0	2.4	2.5	32.3
A0B1	6.0	2.4	2.5	30.6
A0B2	6.1	2.5	2.4	33.4
A0B3	6.1	2.5	2.4	34.2
A1B0	6.0	2.4	2.5	27.3
A1B1	6.1	2.3	2.7	28.3
A1B2	5.9	2.4	2.5	33.5
A1B3	6.0	2.4	2.5	27.8
A2B0	6.1	2.3	2.7	34.1
A2B1	5.9	2.3	2.6	29.9
A2B2	5.9	2.4	2.5	25.3
A2B3	6.0	2.4	2.5	35.0
A3B0	5.9	2.4	2.5	35.7
A3B1	5.9	2.4	2.5	34.4
A3B2	6.0	2.5	2.4	31.5
A3B3	6.0	2.3	2.6	33.0

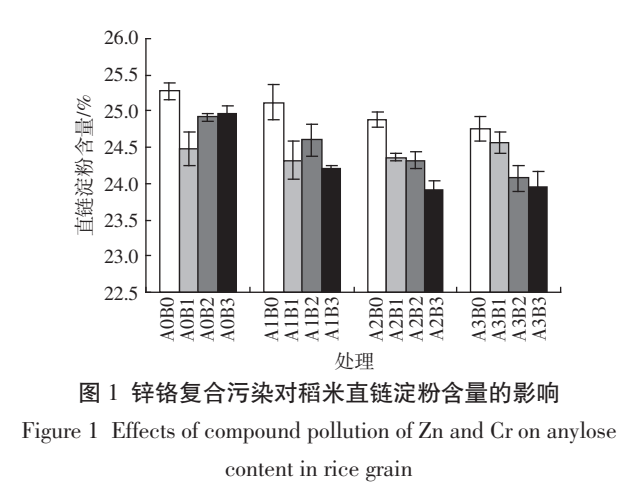


图 1 锌铬复合污染对稻米直链淀粉含量的影响

Figure 1 Effects of compound pollution of Zn and Cr on amylose content in rice grain

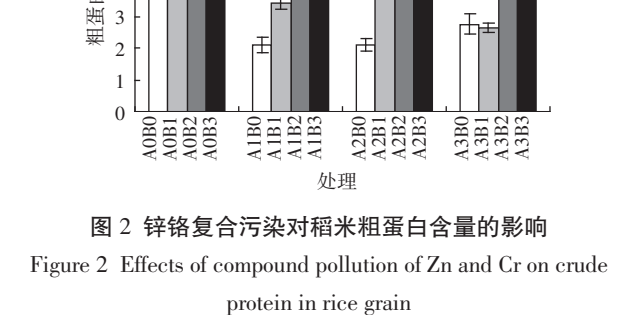


图 2 锌铬复合污染对稻米粗蛋白含量的影响

Figure 2 Effects of compound pollution of Zn and Cr on crude protein in rice grain

2.4.2 锌铬复合污染对水稻子粒锌含量的影响

从表 4 可以看出,水稻子粒锌含量随土壤中锌浓度的增加而呈增加的趋势,但随土壤中铬浓度的变化规律不明显。方差分析表明(表 5),锌浓度间及锌铬浓度互作间水稻子粒锌含量的差异均达极显著水平($P<0.01$), F 值分别为 94.05** 和 15.63**,而铬浓度间的差异不显著($F=2.37$)。

从水稻子粒对锌的吸收系数来看(表 4),水稻子粒对锌的吸收系数随土壤中锌浓度的增加而显著减小,最大值为 A0B1(0.541)。在土壤中锌浓度一定时,随土壤中铬浓度的增加,水稻子粒对锌吸收系数的变化与水稻子粒锌含量一致。

2.4.3 锌铬复合污染对水稻子粒铬含量的影响

从表 4 可以看出,与水稻子粒锌含量的变化不同,随土壤中锌、铬浓度的增加,水稻子粒铬含量呈增加的趋势。方差分析表明(表 5),锌浓度间、铬浓度间及锌铬浓度互作间水稻子粒铬含量的差异均达极显著水平($P<0.01$), F 值分别为 124.86**、30.03** 和 3.30**。

从水稻子粒对铬的吸收系数来看(表 4),随土壤中铬浓度的增加,水稻子粒对铬的吸收系数减小,但随着土壤中锌浓度的增加,水稻子粒对铬的吸收系数增加,这反映了土壤中锌对水稻子粒铬的吸收有促进作用。

表 4 锌铬复合污染对水稻子粒锌、铬含量的影响
Table 4 Effects of compound pollution of Zn and Cr on the contents of Zn and Cr in rice grain

处理	子粒 Zn		子粒 Cr	
	含量/mg·kg ⁻¹	吸收系数	含量/mg·kg ⁻¹	吸收系数
A0B0	24.10	0.493 8	0.75	0.019 1
A0B1	26.41	0.541 1	1.81	0.013 0
A0B2	23.08	0.472 9	2.01	0.008 4
A0B3	23.33	0.477 9	4.64	0.010 6
A1B0	27.04	0.155 6	2.40	0.061 4
A1B1	24.37	0.140 2	2.43	0.017 5
A1B2	28.32	0.163 0	4.63	0.019 3
A1B3	25.45	0.146 4	4.70	0.010 7
A2B0	26.30	0.088 0	4.39	0.112 3
A2B1	30.07	0.100 6	4.65	0.033 5
A2B2	27.72	0.092 8	5.11	0.021 4
A2B3	29.27	0.098 0	6.85	0.015 6
A3B0	29.66	0.054 0	7.04	0.180 1
A3B1	27.99	0.051 0	7.09	0.050 9
A3B2	29.25	0.053 3	6.87	0.028 7
A3B3	27.88	0.050 8	7.91	0.018 0

表 5 稻米蒸煮食味及营养品质的方差分析 F 值
Table 5 F values of variance analysis on cooking and eating and nutrition quality of rice grain

蒸煮食味品质/营养品质	变异来源		
	Zn	Cr	Zn×Cr
直链淀粉含量	26.25**	40.10**	5.00**
粗蛋白含量	164.04**	3537.81**	831.29**
子粒锌含量	94.05**	2.37	15.63**
子粒铬含量	124.86**	30.03**	3.30**

2.4.4 土壤中锌、铬浓度与水稻子粒锌、铬含量的相关性

将土壤中锌、铬浓度与水稻子粒锌、铬含量进行偏相关分析表明,水稻子粒锌含量与土壤中锌浓度的相关性达极显著水平,偏相关系数为 0.731 2**($r_{0.05}=0.497$, $r_{0.01}=0.623$,下同),与土壤中铬浓度的相关性不显著,偏相关系数为-0.101 3。这说明锌铬复合污染对水稻子粒的锌铬含量未产生复合效应,即土壤中铬对水稻子粒的锌吸收影响不显著。土壤中锌、铬浓度与水稻子粒中铬含量的偏相关系数均达极显著水平,分别为 0.955 0**、0.845 2**。这说明土壤中锌对水稻子粒中铬的吸收有促进作用,产生了协同效应。

3 讨论

稻米品质的形成既受品种自身遗传特性的控制,又受到生态环境因子的影响,是稻米自身遗传特性与生态环境因子相互作用的结果。水稻子粒灌浆过程,实质上是光合产物向子粒转运与积累的过程。因而,灌浆结实期是稻米品质形成好坏的关键时期。王凯荣等研究表明,镉能显著降低糙米中赖氨酸含量,提高天冬氨酸含量;铅能降低缬氨酸占总量的百分数,提高苯丙氨酸含量及苯丙氨酸和天冬氨酸占总量的百分数。糙米直链淀粉含量与铅的添加量呈显著负相关,支链淀粉含量与镉的添加量呈显著正相关^[6]。郑文娟等在土壤中加入 28 mg·kg⁻¹ 镉时,糙米中粗淀粉、直链淀粉、赖氨酸和粗蛋白含量均明显降低^[7]。本试验研究表明,锌铬复合污染对稻米糙米率、精米率、整精米率及粒形的影响规律不明显。然而,随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米垩白米率呈增加的趋势。从稻米蒸煮食味品质来看,随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米直链淀粉含量呈降低的趋势,这与前人的研究结果一致。

从稻米营养品质来看,随土壤中锌、铬浓度增加,稻米粗蛋白含量均呈增加的趋势,与郑文娟等^[6]研究

结果相反,这可能与不同重金属元素与蛋白质组分的结合不同有关^[24-28]。水稻子粒锌含量随土壤中锌浓度的增加而呈增加的趋势,与土壤中铬浓度变化规律不明显。然而,随土壤中锌、铬浓度的增加,水稻子粒铬含量增加。同时,土壤中锌、铬浓度对水稻子粒铬含量产生了协同效应,而对子粒锌含量未产生复合效应。

4 结论

锌铬复合污染对稻米碾米品质及粒形的影响规律不明显。随土壤中锌、铬浓度的增加,稻米垩白米率、粗蛋白含量均呈增加的趋势,而直链淀粉含量的呈降低的趋势。水稻子粒锌含量随土壤中锌浓度的增加而呈增加的趋势,子粒铬含量随土壤中锌、铬浓度的增加而增加。同时,土壤中锌、铬浓度对水稻子粒铬含量产生了协同效应。

参考文献:

- [1] 吴攀,刘从强,张国平,等. 黔西北炼锌地区河流重金属污染特征[J]. 农业环境保护, 2002, 21(5):443-446.
WU Pan, LIU Cong-qiang, ZHANG Guo-ping, et al. Characteristics of heavy metal pollution in stream of zinc smelting area, northwest of Guizhou[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2002, 21(5):443-446.
- [2] 张汉波,段昌群,胡斌,等. 不同年代废弃的铅锌矿渣堆中重金属的动态变化[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(1):67-69.
ZHANG Han-bo, DUAN Chang-qun, HU Bin, et al. Dynamic of heavy metals in a lead-zinc tailing's deposited in different years[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2003, 22(1):67-69.
- [3] Liu H Y, Probst L, Bohan A. Metal contamination of soils and crops affected by the Chenzhou lead/zinc mine spill (Hunan, China)[J]. *Science of the Total Environment*, 2005, 339(3):153-166.
- [4] 常文越,陈晓东,冯晓斌,等. 含铬(VI)废物堆放场所土壤/地下水的污染特点及土著微生物的初步生物解毒实验研究[J]. 环境保护科学, 2002, 28(6):31-33.
CHANG Wen-yue, CHEN Xiao-dong, FENG Xiao-bin, et al. Characteristic of soil/underground water of chromium waste stock and experimental study on biological detoxication of aboriginal microbe[J]. *Environmental Protection Science*, 2002, 28(6):31-33.
- [5] 郑泽群,边淑萍,郑建民,等. 从西安的硼、铬污染农田论农业环境保护[J]. 西北农学院学报, 1984, 4:82-91.
ZHENG Ze-qun, BIAN Shu-ping, ZHENG Jian-min, et al. From boron and chromium pollution of agricultural farmland in Xi'an province on agro-environmental protection[J]. *Journal of Northwest Agricultural College*, 1984, 4:82-91.
- [6] Khoshgofarmanesh A H, Kalbasi M. Effect of municipal waste leachate on soil properties and growth and yield of rice[J]. *Communications in Soil Science & Plant Analysis*, 2002, 33(13):2011-2015.
- [7] Mamata M, Sahu R K, Sahu S K. Effect of vermicomposted municipal solid wastes on growth, yield and heavy metal contents of rice (*Oryza*

- sativa* L.) [J]. *Fresenius Environmental Bulletin (Germany)*, 2005, 14(7):584-590.
- [8] 刘荣乐. 我国商品有机肥料和有机废弃物中重金属的含量现状与分析[J]. 农业环境与发展, 2005, 22(2):49.
LIU Rong-le. Analysis and the status quo of China's commodity organic fertilizers and organic waste in the content of heavy metals[J]. *Agricultural Environment and Development*, 2005, 22(2):49.
- [9] 后藤茂子,茅野充男,山岸顺子,等. 长期施用污肥导致重金属在土壤中蓄积[J]. 水土保持科技情报, 1999, 3:1-4.
MAO Zi Hou-rattan, Mitsuo Tino, SHAN AN Shun-zi, et al. Long-term application of fertilizer pollution caused accumulation of heavy metals in the soil[J]. *Scientific and Technical Information of Soil and Water Conservation*, 1999, 3:1-4.
- [10] 金棵,王晓娟,李成才,等. 利用垃圾堆肥改良水稻土 II: 对水稻土中重金属含量和花卉生长的影响 [J]. 应用与环境生物学报, 2003, 9(4):400-403.
JIN Ke, WANG Xiao-juan, LI Cheng-cai, et al. Use compost garbage improved paddy soils II: effects on heavy metal content in the soil of rice and growth of flowers[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2003, 9(4):400-403.
- [11] 刘海洋,浦燕泳. Cr⁶⁺、Cr³⁺对水稻生长影响的研究[J]. 环境与开发, 1992, 7(4):152-153.
LIU Hai-yang, PU Yan-yong. Effects of Cr⁶⁺ and Cr³⁺ on growth of rice [J]. *Environment and Development*, 1992, 7(4):152-153.
- [12] 朱红霞,杨小勇,葛才林,等. 重金属对水稻过氧化物酶同功酶的影响[J]. 核农学报, 2004, 18(3):233-236.
ZHU Hong-xia, YANG Xiao-yong, GE Cai-lin, et al. Effect of heavy metals on the peroxidase isoenzymes in rice[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2004, 18(3):233-236.
- [13] 葛才林,杨小勇,朱红霞,等. 重金属胁迫对水稻叶片过氧化氢酶活性和同功酶表达的影响[J]. 核农学报, 2002, 16(4):197-201.
GE Cai-lin, YANG Xiao-yong, ZHU Hong-xia, et al. Effect of heavy metal stress on the catalase activity and expression of isoenzymes in the leaves of rice seedling[J]. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2002, 16(4):197-201.
- [14] 胡莹,朱永官,黄益宗,等. 钒镉复合污染对水稻吸收积累镉、钒和磷的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(2):198-202.
HU Ying, ZHU Yong-guan, HUANG Yi-zong, et al. Effects of combined contaminations of vanadium and cadmium on cadmium, vanadium and phosphorus uptake by rice in solution culture[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2005, 25(2):198-202.
- [15] Chen H M, Zheng C R, Sun X H. Effects of different lead compounds on growth and heavy metal uptake of wetland rice[J]. *Pedosphere*, 1991, 1(3):253-264.
- [16] 王凯荣,郭焱,何电源,等. 重金属污染对稻米品质的影响的研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(6):254-257.
WANG Kai-rong, GUO Yan, HE Dian-yuan, et al. Effect of heavy metal pollution on quality of rice grain[J]. *Agro-Environmental Protection*, 1993, 12(6):254-257.
- [17] 郑文娟,邓波儿. 铬和镉对作物品质的影响[J]. 土壤, 1993, 25(6):324-326.

ZHENG Wen-juan, DENG Bo-er. Effects of Cr and Cd on quality of crop[J]. *Soils*, 1993, 25(6):324-326.

[18] 莫 争, 王春霞, 陈 琴, 等. 重金属 Cu, Pb, Zn, Cr, Cd 在水稻植株中的富集和分布[J]. 环境化学, 2002, 21(2):110-116.

MO Zheng, WANG Chun-xia, CHEN-Qin, et al. Distribution and enrichment of heavy metals of Cu, Pb, Zn, Cr and Cd in paddy plant[J]. *Environmental Chemistry*, 2002, 21(2):110-116.

[19] 王广林, 刘登义. 冶炼厂污灌区土壤—水稻系统重金属积累特征的研究[J]. 土壤, 2005, 37(3):299-303.

WANG Guang-lin, LIU Deng-yi. Characteristics of heavy metals accumulation in soil-rice, system in the sewage irrigated area near a smeltery[J]. *Soils*, 2005, 37(3):299-303.

[20] 周启星, 吴燕玉, 熊先哲. 重金属 Cd-Zn 对水稻的复合污染和生态效应[J]. 应用生态学报, 1994, 5(4):438-441.

ZHOU Qi-xing, WU Yan-yu, XIONG Xian-zhe. Compound pollution of Cd and Zn and its ecological effect on rice plant [J]. *Chinese Journal of Applied*, 1994, 5(4):438-441.

[21] Fazeli M S, Khosravan F, Hossini M, et al. Enrichment of heavy metals in paddy crops irrigated by paper mill effluents near Nanjangud, Mysore District, Karnataka, India[J]. *Environmental Geology*, 1998, 34(4):297-302.

[22] 王 新, 梁仁禄. 土壤——水稻系统中重金属复合污染物交互作用及生态效应的研究[J]. 生态学报, 2000, 19(4):38-42.

WANG Xin, LIANG Ren-lu. Interaction and ecological effect of combined pollution for heavy metals on soil-rice paddy system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19(4):38-42.

[23] 鲍士旦. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.

BAO Shi-dan. *Agricultural Soil Analysis*(3rd ed.)[M]. Beijing: China Agricultural Press, 2000.

[24] 杨居荣, 何孟常, 查 燕, 等. 水稻籽实中 Pb 的分布及其结合形态[J]. 农业环境保护, 2001, 20(3):129-132.

YANG Ju-rong, HE Meng-chang, ZHA Yan, et al. The distribution and binding forms of lead in rice seed[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(3):129-132.

[25] 杨居荣, 查 燕, 刘 虹. 污染稻、麦籽实中 Cd、Cu、Pb 的分布及其存在形态初探[J]. 中国环境科学, 1999, 19(6):500-504.

YANG Ju-rong, ZHA Yan, LIU Hong. The distribution and chemical forms of Cd、Cu and Pb in polluted seeds [J]. *China Environmental Sci*, 1999, 19(6):500-504.

[26] 杨居荣, 何孟常, 查 燕, 等. 稻、麦籽实中 Cd 的结合形态[J]. 中国环境科学, 2000, 20(5):404-408.

YANG Ju-rong, HE Meng-chang, ZHA Yan, et al. Banding forms of Cd in the rice and wheat seed[J]. *China Environmental Sci*, 2000, 20(5):404-408.

[27] 何孟常, 杨居荣, 查 燕, 等. 污染作物籽实中 As 的分布及其结合形态初探[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4):625-628.

HE Meng-chang, YANG Ju-rong, ZHA Yan, et al. The distribution and forms of As in the polluted crop seed[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2000, 11(4):625-628.

[28] 杨居荣, 查 燕, 刘 虹, 等. 污染作物籽实中 Cu 的分布、结合形态及其毒性[J]. 农业环境保护, 2001, 20(4):199-201.

YANG Ju-rong, ZHA Yan, LIU Hong, et al. Distribution, binding forms of Cu in polluted seeds of crops and its toxicity[J]. *Agro-Environmental Protection*, 2001, 20(4):199-201.