

# 土壤 Pb Cd 污染的植物效应 II

## ——Cd 污染对水稻生长和 Cd 含量的影响

郑春荣<sup>1</sup>, 孙兆海<sup>1</sup>, 周东美<sup>1</sup>, 刘凤枝<sup>2</sup>, 陈怀满<sup>1,3</sup>

(1. 中国科学院南京土壤研究所, 江苏 南京 210008; 2. 农业部环境监测总站, 天津 300191; 3. 钟山学院环境工程系, 江苏 南京 210049)

**摘要:** 采用盆栽试验方法, 研究了 3 种不同类型的人为污染土, 即草甸棕壤 (辽宁)、红壤 (湖北)、灰色石灰土 (广西) 中不同 Cd 的含量对水稻生长和吸收 Cd 的影响。结果表明, 除了辽宁土壤中 10 mgCd · kg<sup>-1</sup> 处理使稻谷产量与对照相比减产约 17% 外, 其余处理对稻草和稻谷产量均无明显影响。水稻吸收的 Cd 与土壤中的总量 Cd (实测值) 和 DTPA 可提取 Cd 含量之间均有着极显著的相关性, 并由此计算了 Cd 的表观临界含量, 其中湖北土壤对 Cd 的污染十分敏感 (表观临界含量为 0.22 mgCd · kg<sup>-1</sup>)。

**关键词:** Cd; 重金属; 水稻; 土壤污染临界值

**中图分类号:** X503.231 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672 – 2043(2004)05 – 0872 – 05

### Plant Responses to Soil Lead and Cadmium Pollution II. Effects of Soil Cadmium Pollution on Wetland Rice Growth and Its Uptake of Cadmium

ZHENG Chun-rong<sup>1</sup>, SUN Zhao-hai<sup>1</sup>, ZHOU Dong-mei<sup>1</sup>, LIU Feng-zhi<sup>2</sup>, CHEN Huai-man<sup>1,3</sup>

(1. Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. Environmental Monitoring Centre of Agricultural Ministry, Tianjin 300191, China; 3. Department of Environmental Engineering, Zhong Shan College, Nanjing 210049, China)

**Abstract:** Cadmium (Cd) is a dangerous and insidious pollutant of the environment, causing a number of diseases in human and animals. It appears that the major hazard to human is by ingestion of foodstuffs contaminated by excessive Cd and soil exposure. In general, the relationship between food production and soil is very closed, and food quality is correlated very significant to soil quality, specially the cleaning extent. To understand dose – response relationship of soil Cd concentration with Cd uptake by wetland rice (*Oryza sativa* L.) is very crucial to prevent cadmium contamination in food chains. Different Cd concentration on the effect of growth and Cd concentration of wetland rice were investigated through the greenhouse experiment conducted in Institute of Soil Science, Chinese Academy of Science, Nanjing in 2002. Three types of soil, meadow brown earth from Liaoning province, red earth from Hubei province and gray limestone soil from Guangxi province were used. Five – kilogram portion of the soils were applied nitrogen and phosphors fertilizer at the rate of 0.4 g · kg<sup>-1</sup> as urea and 0.88 g · kg<sup>-1</sup> as KH<sub>2</sub>PO<sub>4</sub>, and cultivated for 1 week, and then treated with Cd<sup>2+</sup> at the rate of 0, 0.5, 1, 3, 5, 10 mg · kg<sup>-1</sup>. Rice plants (No. 86 – 8, offered by Jiangsu Agricultural Institute) were grown up to maturity under continuous flooded condition. The results showed that all treatments had no significant effect on the biomass of wetland rice except 10 mg · kg<sup>-1</sup> treatment in meadow brown earth with a 17% rice grain yield reduction. However, Cd uptake by rice obviously increased with the increase of soil Cd concentration. The concentration of Cd in different parts of wetland rice varied in the order of root > straw > brown rice. The proportions of Cd in brown rice, straw and root to soil Cd concentration were 0.04% ~ 1.48%, 0.3% ~ 16.8% and 0.05% ~ 1.04%, respectively. Among the three soils, Cd mobilized most easily in red earth from soil to plant due to its low pH value. Very significant correlations between Cd concentration of brown rice with the spiked soil Cd concentration, total soil Cd concentration and DTPA extracted soil Cd concentration were obtained. According to the simulation equations, apparent cadmium critical value of the meadow brown earth, red earth and gray limestone soil were calculated as 2.39, 0.22 and 2.17 mg · kg<sup>-1</sup>, respectively. Red earth had a lowest Cd critical value, suggesting the red earth more sensitive to Cd pollution. These results were important to regulate the loading capacity of soil for Cd and soil environmental quality standard concerning soil types.

**Keywords:** cadmium; heavy metals; wetland rice; pollutant critical value of soils

收稿日期: 2004 – 01 – 14

基金项目: 科技部社会公益研究专项资金资助项目 (2001DIA10022)

作者简介: 郑春荣 (1943—), 女, 副研究员, 主要从事土壤环境化学和分析化学研究。

联系人: 陈怀满, E-mail: hmchen@issas.ac.cn

Cd 是一种危险的环境污染物质,它能引起人和动物的一些疾病<sup>[1,2]</sup>。动物试验表明,Cd 能抑制生长,引起高血压等疾病,以及对酶系统、生育力和某些必需元素的不良影响,甚至可能影响胎儿的性别。Cd 对人类的最大危害途径是过量 Cd 所污染的食品链。日本的骨痛病就是因为消费者长期食用被矿山和冶炼厂所污染了的稻米和大豆所引起的。对人和动物来说,Cd 是一种累积性的剧毒元素,人体某些器官的 Cd 含量随着年龄的增长而增加,长期生活于低 Cd 含量的大气中,饮用低 Cd 含量的水和食品,都有可能引起严重的疾病甚至死亡。

人体中 Cd 的累积主要来自于食品链,而食品生产与土壤有着十分密切的关系。Cd 浓度的增加对植物的生长有可能产生抑制作用,当土壤中外源 Cd 浓度  $\geq 20 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时,严重抑制棉花、水稻幼苗的生长、发育,植株矮小且呈现严重受害症状<sup>[3]</sup>。但不同植物对 Cd 毒的敏感性不同,禾本科植物的耐性普遍高于蔬菜类<sup>[4]</sup>,而卷心菜和白三叶草对 Cd 毒敏感性的差异性与 Fe、Mn、Ca、Mg 的积累受 Cd 影响程度密切相关<sup>[5]</sup>。其原因可能是由于减少了光合作用的速度,引起禾苗缺水和减少了养分吸收等。秦天才等<sup>[6]</sup>从光合作用色素、光合组织、光合作用过程、光合速率等方面概述了 Cd 对光合作用影响的研究,对理解 Cd 的毒害机理有很好的参考价值。除光合作用外,人们还从植物生长、气孔功能、水分关系、酶活性等方面阐述了 Cd 对维管植物的毒害机理和耐性机制<sup>[7,8]</sup>。一般来说,土壤中 Cd 的浓度增加时,植物吸收 Cd 的浓度亦有增高的趋势。与对照土壤相比,在污染土壤中生产的糙米平均 Cd 含量亦较高。然而,植物对 Cd 的吸收和累积与土壤类型和性质有着十分密切的关系,了解和掌握 Cd 在不同土壤中的有效性及其植物效应,是制订土壤环境质量标准、防止 Cd 污染的重要的基础性资料。本文报道了在人为污染的 3 种不同性质土壤中 Cd 对水稻生长和 Cd 含量的影响。

## 1 材料与方法

供试土壤采自辽宁沈阳(草甸棕壤,沈阳市农业环保站提供,简称辽宁土)、湖北大冶(红壤,湖北省农业环保站提供,简称湖北土)和广西河池(灰色石灰土,河池市农业环保站提供,简称广西土),原土中 Cd 的含量分别为  $0.26$ 、 $0.051$ 、 $1.37 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,其余的基本性质参见文献[9]。水稻盆栽试验采用容量为  $6 \text{ kg}$  的塑料盆、内衬聚乙烯塑料袋进行,每盆装土  $5 \text{ kg}$ ,添

加的 N 和 P 肥料为  $0.2 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  土(尿素  $0.4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  土,  $\text{KH}_2\text{PO}_4$   $0.88 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$  土),以  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$  用于 Cd 污染的处理,处理浓度为  $0$ 、 $0.5$ 、 $1$ 、 $3$ 、 $5$ 、 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。先将土壤与肥料(水溶液)混和,1 周后与 Cd ( $\text{CdCl}_2$  水溶液)混匀、淹水,25 d 后插秧,每盆 3 穴,每穴 2 株,每个处理重复 3 次。水稻品种为 86 优 8 号(粳稻, *Oryza sativa* L., 南京农业科学院提供),生长期 160 d,整个生长期以自来水浇灌,且保持渍水状态。水稻生长期间,根据生长情况追肥 2 次(尿素和  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  各  $0.3 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ )。水稻成熟时将根、茎和稻谷分别收获,并在  $70^\circ\text{C}$  左右烘干,粉碎。

供试物料基本性质中的重金属含量用  $\text{HF}-\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$  消化,植株经  $\text{HNO}_3-\text{HClO}_4$  消化后,用原子吸收分光光度计(Hitach 180-80)测定。土壤养分含量按常规分析方法<sup>[10]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 Cd 污染对水稻生长的影响

供试土壤的分析表明,来自于辽宁和湖北的土壤属壤质黏土,而广西的土壤则为粉(砂)质壤土。原土 pH 有较大差异,从  $4.69$ (湖北)  $\rightarrow 7.11$ (广西)  $\rightarrow 7.81$ (辽宁),但在水稻栽培过程中,这种 pH 的差异逐渐减少,不同土壤间及 Cd 处理间的 pH 最后趋于一致,原位测定,见图 1。

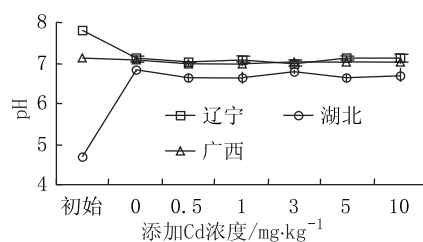


图 1 土壤淹水 4 个月后的 pH 变化

Figure 1 Changes of pH after soil flooded for 4 months

在同一种土壤中,不同浓度 Cd 处理对植物生长在前期略有差异,但随着生长期的延长,这种差异性逐渐变得不甚明显。在 3 种土壤中生长的水稻,从株高、产量看,湖北土壤中的水稻生长较好,成熟较晚,其株高、稻草重和谷粒重最高。广西土壤中的水稻生长较差些,由于广西土壤的 Zn 含量较高,生长 1 个月后叶片发黄,经施肥处理后缓解,成熟较早,其株高和辽宁土壤上的水稻相近,但稻草和谷粒产量最低。湖北土和广西土各处理间的差异不明显,辽宁土壤中  $10 \text{ mgCd} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理者与对照相比其谷粒重减少了 17%,见图 2、图 3。图 3 表明,在一些处理中稻草和谷

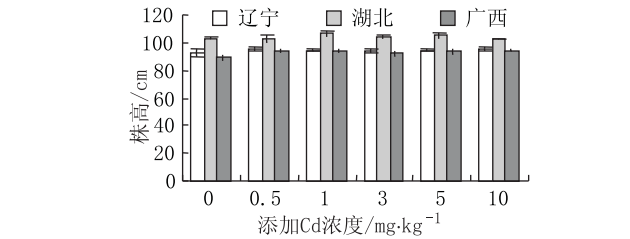


图 2 Cd 处理对水稻株高的影响

Figure 2 Effect of Cd treatments on the plant height of wetland rice

粒的产量较对照为高,虽然对这一现象的原因尚需进一步探索,但这种现象却在一定程度上增加了 Cd 污染的隐蔽性和潜在危害性,因为从植物产量来看难以判断其污染状况。

2.2 Cd 污染对水稻吸收 Cd 元素的影响

3 种土壤中水稻对 Cd 的吸收均随着浓度的增大而增加,从总体看,其吸收系数为根> 稻草> 糙米。湖北土在添加浓度为 1 mgCd · kg<sup>-1</sup> 以下时,根中的浓度略小于稻草中的浓度。从植物在各部位的吸收量分配来看,其分配比例与 Cd 污染浓度有关,当外源 Cd> 1 mgCd · kg<sup>-1</sup> 时,辽宁和广西土中植物吸收

Cd 的分配为稻草> 稻根> 糙米,而湖北土在稻草中占绝大部分,但在添加浓度 <1 mgCd · kg<sup>-1</sup> 时其在根中的分配小于糙米,表明了 Cd 在实验条件下的易迁移性。方差分析表明,除了辽宁和广西土壤中水稻根对 Cd 的吸收没有差异外,其余土壤中根、稻草和糙米之间吸收 Cd 均有极显著的差异性 ( $P < 0.01$ ),见图 4、表 1。试验表明,在试验条件下糙米、稻草和根吸收的 Cd 占土壤总 Cd 量的百分数分别为 0.04% ~ 1.48%、0.3% ~ 16.8% 和 0.05% ~ 1.04%。无论是从浓度、吸收系数来比较,均表明湖北土上的水稻植株从土壤中带走的 Cd 是最多的,这与土壤的性质有着十分密切的关系,特别是湖北土的低 pH(pH 4.69)使 Cd 在其中的移动性较之广西土 (pH 7.11) 和辽宁土 (pH 7.81) 为高。

2.3 土壤 Cd 总量、提取量与水稻吸收 Cd 的关系

水稻对 Cd 的吸收与土壤中 Cd 的总量和 DTPA 可提取 Cd 量(DTPAexCd)之间的关系如表 2 所示。由表 2 可见,水稻各部位所吸收的 Cd 与土壤中的 Cd 有极显著相关性。由此以国家所规定的粮食卫生标准 Cd 含量

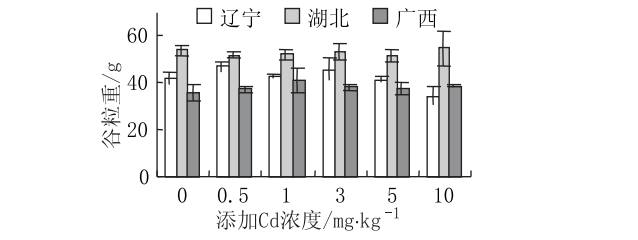
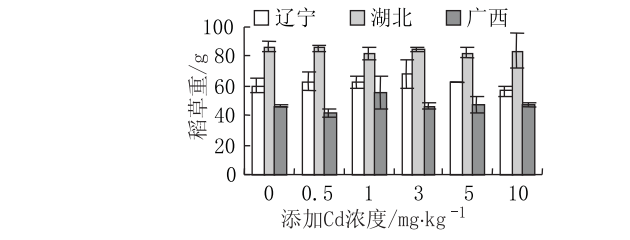


图 3 Cd 处理对稻草和稻谷产量的影响

Figure 3 Effect of Cd treatments on straw and grain yield of wetland rice

| 表 1 水稻吸收 Cd 在植物中的分配 (%) 和吸收系数                                      |                                    |      |      |      |      |       |      |      |      |
|--------------------------------------------------------------------|------------------------------------|------|------|------|------|-------|------|------|------|
| Table 1 Cd distribution and absorption coefficient in wetland rice |                                    |      |      |      |      |       |      |      |      |
| 项目                                                                 | 添加 Cd 浓度<br>/mg · kg <sup>-1</sup> | 辽宁   |      |      | 湖北   |       |      | 广西   |      |
|                                                                    |                                    | 稻根   | 稻草   | 糙米   | 稻根   | 稻草    | 糙米   | 稻根   | 糙米   |
| Cd 的分配                                                             | 0                                  | 3.5  | 86.2 | 10.4 | 2.7  | 90.6  | 6.6  | 24.3 | 62.1 |
|                                                                    | 0.5                                | 20.9 | 62.7 | 16.4 | 3.9  | 88.2  | 7.9  | 15.9 | 70.5 |
|                                                                    | 1                                  | 32.5 | 54.3 | 13.2 | 4.2  | 89.8  | 6.0  | 19.9 | 69.0 |
|                                                                    | 3                                  | 31.6 | 57.9 | 10.5 | 7.3  | 87.9  | 4.8  | 29.6 | 60.1 |
|                                                                    | 5                                  | 38.7 | 52.0 | 9.3  | 6.9  | 88.2  | 4.8  | 28.1 | 61.8 |
|                                                                    | 10                                 | 34.4 | 57.6 | 8.0  | 10.9 | 84.6  | 4.5  | 35.7 | 56.3 |
|                                                                    | 平均                                 | 26.9 | 61.8 | 11.3 | 6.0  | 88.2  | 5.8  | 25.6 | 63.3 |
| 吸收系数                                                               | 0                                  | 0.73 | 0.98 | 0.17 | 3.64 | 6.17  | 0.73 | 1.81 | 0.34 |
|                                                                    | 0.5                                | 2.22 | 0.45 | 0.16 | 7.90 | 9.58  | 1.43 | 1.53 | 0.50 |
|                                                                    | 1                                  | 2.78 | 0.31 | 0.11 | 9.65 | 10.07 | 1.07 | 1.48 | 0.43 |
|                                                                    | 3                                  | 2.65 | 0.30 | 0.08 | 11.0 | 7.36  | 0.65 | 2.30 | 0.39 |
|                                                                    | 5                                  | 2.89 | 0.22 | 0.06 | 8.25 | 6.22  | 0.55 | 2.17 | 0.35 |
|                                                                    | 10                                 | 3.22 | 0.31 | 0.07 | 5.09 | 2.67  | 0.27 | 2.43 | 0.31 |
|                                                                    | 平均                                 | 2.42 | 0.43 | 0.11 | 7.59 | 7.01  | 0.78 | 1.95 | 0.39 |

注:吸收系数指植物吸收浓度与土中实测浓度之比。

<0.2 mg · kg<sup>-1</sup> 来计算、以水稻为指示植物的土壤表观临界含量列于表 3。由表 3 可见湖北土对 Cd 污染十分敏感,其表观临界含量为 0.22 mgCd · kg<sup>-1</sup>,该值比有关文献所报道的<sup>[11]</sup>土壤 Cd 临界含量的值要低得多,表明在确定土壤临界值和制定标准时,需要综合考虑

多方面的因素。表 3 还表明,植物所吸收的 Cd 与土壤总 Cd 或 DTPA 可提取 Cd 在土壤各自之间均有着良好的相关性,但将 3 种土壤进行综合统计时,其相关系数显著下降,它亦说明了土壤类型不同时在 Cd 的植物效应之间的比较受到了限制。

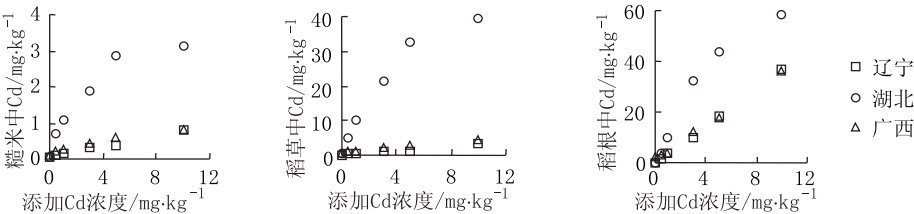


图 4 Cd 处理对水稻吸收 Cd 的影响

Figure 4 Effect of Cd treatments on the uptake of Cd by wetland rice

表 2 水稻吸收 Cd 与土壤中 Cd 浓度的相关性(*r* 值)

Table 2 Correlations between uptake of Cd by wetland rice and Cd concentration in soils

| 土壤               | 项目       | Cd 总量     | DTPAexCd  | 米 Cd      | 稻草 Cd     |
|------------------|----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| 辽宁               | DTPAexCd | 0.985 9** | 1.000 0   |           |           |
| 湖北               | 米 Cd     | 0.367 3** | 0.292 9** | 1.000 0   |           |
| 广西               | 稻草 Cd    | 0.273 7*  | 0.186 2   | 0.980 5** | 1.000 0   |
| ( <i>n</i> = 54) | 根 Cd     | 0.728 8** | 0.659 9** | 0.845 9** | 0.796 9** |
| 辽宁               | DTPAexCd | 0.998 0** | 1.000 0   |           |           |
| ( <i>n</i> = 18) | 米 Cd     | 0.979 8** | 0.987 4** | 1.000 0   |           |
|                  | 稻草 Cd    | 0.969 8** | 0.980 5** | 0.985 1** | 1.000 0   |
|                  | 根 Cd     | 0.993 7** | 0.996 4** | 0.987 0** | 0.979 8** |
| 湖北               | DTPAexCd | 0.989 5** | 1.000 0   |           |           |
| ( <i>n</i> = 18) | 米 Cd     | 0.682 9** | 0.738 5** | 1.000 0   |           |
|                  | 稻草 Cd    | 0.722 1** | 0.774 8** | 0.982 8** | 1.000 0   |
|                  | 根 Cd     | 0.804 2** | 0.811 7** | 0.910 8** | 0.927 7** |
| 广西               | DTPAexCd | 0.998 6** | 1.000 0   |           |           |
| ( <i>n</i> = 18) | 米 Cd     | 0.930 5** | 0.938 0** | 1.000 0   |           |
|                  | 稻草 Cd    | 0.933 4** | 0.939 2** | 0.990 4** | 1.000 0   |
|                  | 根 Cd     | 0.990 2** | 0.988 7** | 0.943 2** | 0.952 6** |

表 3 供试土壤 Cd 的表观临界含量(mg · kg<sup>-1</sup>)

Table 3 Apparent critical cadmium concentrations in tested soils(mg · kg<sup>-1</sup>)

| 项目     | 土壤 | 相关方程                                            | <i>a</i> | <i>b</i> | <i>r</i> | <i>n</i> | 临界含量 |
|--------|----|-------------------------------------------------|----------|----------|----------|----------|------|
| 实测 Cd  | 辽宁 | <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>bx</i>                 | 0.049 8  | 0.063 0  | 0.979 8  | 18       | 2.39 |
|        | 湖北 | log <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>b</i> log <i>x</i> | -0.097 8 | 0.919 2  | 0.961 8  | 15       | 0.22 |
|        | 广西 | log <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>b</i> log <i>x</i> | -0.958 8 | 0.772 3  | 0.949 9  | 18       | 2.17 |
| DTPACd | 辽宁 | <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>bx</i>                 | 0.055 0  | 0.123 3  | 0.987 4  | 18       | 1.18 |
|        | 湖北 | log <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>b</i> log <i>x</i> | 0.198 6  | 0.820 9  | 0.956    | 15       | 0.08 |
|        | 广西 | log <i>Y</i> = <i>a</i> + <i>b</i> log <i>x</i> | -0.717 7 | 0.728 3  | 0.947 0  | 18       | 1.06 |

注:临界含量根据 Cd 的粮食卫生标准 0.2 mg · kg<sup>-1</sup> 计算。

3 小结

本文研究了 3 种不同性质的土壤中不同程度的 Cd 污染对水稻生长和吸收 Cd 的影响,并根据食品卫生标准计算了土壤 Cd 的表观临界含量。结果表明,

无论是以 Cd 总量(实测值)或 DTPA 可提取量所表示的土壤表观临界含量,在不同土壤之间均有较大的差别,其顺序为辽宁土> 广西土> 湖北土。由于土壤临界含量是制定土壤负载容量的重要依据,本研究结果为完善供试土壤类型和采样区 Cd 污染临界指标的确

定提供了依据。结果亦证明了 Cd 的植物效应在不同土壤类型间的比较受到一定的限制,表明了这是一个需要继续探索的问题。

参考文献:

[1] 陈怀满,等. 土壤-植物系统中的重金属污染[M]. 北京: 科学出版社, 1996.

[2] 陈怀满,等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.

[3] 秦普丰,铁柏青,周细红,等. 铅与镉对棉花和水稻萌发及生长的影响[J]. 湖南农业大学学报,2000, 26(3): 205-207.

[4] 杨居荣,贺建群,黄 翌,等. 农作物 Cd 耐性的种内种间差异 I. 种间差异[J]. 应用生态学报, 2000,9(1): 89-94.

[5] 杨明杰,林咸永,杨肖娥. Cd 对不同种类植物生长和养分积累的

影响. 应用生态学报,1998, 9(1): 89-94.

[6] 秦天才,阮 捷,王腊娇. 镉对植物光合作用的影响[J]. 环境科学与技术,2000, (增): 33-35.

[7] 苏 玲,章永松,林咸永,等. 维管植物的镉素和耐性机制[J]. 植物营养与肥科学报,2000, 6(1): 106-112.

[8] Prasad M N V. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants, Environ. Exper[J]. Botany, 1995, 35(4): 525-545.

[9] 郑春荣,孙兆海,周东美,等. 土壤铅、镉污染的植物效应 I. 铅污染对水稻生长和铅含量的影响[J]. 农业环境科学学报,2004, 23(3): 417-421.

[10] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1978.

[11] 夏增禄. 中国土壤环境容量[M]. 北京: 地震出版社,1992. 172-181.