

# 钾肥对镉污染土壤大白菜品质的效应研究

王小晶<sup>1,2</sup>, 陈怡<sup>1</sup>, 王菲<sup>1</sup>, 王正银<sup>1\*</sup>

(1.西南大学资源环境学院, 重庆 400716; 2.重庆市北碚区农业委员会, 重庆 400700)

**摘要:**为进一步阐明钾对镉污染土壤上大白菜的品质影响,通过盆栽试验研究了2种镉污染土壤不同钾肥用量对大白菜生长、生理特性和重金属含量的影响。结果表明,大白菜地上部及地下部鲜重在低镉胁迫下分别下降2.6%和19.8%,在高镉胁迫下分别下降7.1%和45.5%;低镉胁迫下,土壤增施钾肥后大白菜地上部鲜重提高0.3%~34.0%,地下部鲜重降低1.2%~7.4%;高镉胁迫下,增施钾肥后大白菜地上部鲜重无明显变化,地下部鲜重显著提高41.8%~87.3%。低镉胁迫大白菜叶片中叶绿素a、叶绿素b含量略有升高,增施钾肥后,叶绿素a含量显著升高,叶绿素b含量变化不大;高镉胁迫大白菜叶片中叶绿素各含量明显降低,增施钾肥后,叶绿素各含量变化不大。低镉胁迫大白菜叶片中抗氧化系统酶(CAT、SOD、POD)活性增强,高镉胁迫大白菜叶片中各抗氧化系统酶活性降低,2种镉污染土壤增施钾肥各种酶活性呈增强趋势。镉污染土壤增施钾肥能有效提高大白菜叶片中维生素C、还原糖的含量,并促进游离氨基酸转化为粗蛋白。镉胁迫大白菜叶片中重金属镉、砷含量显著升高,铅、铬、汞含量均有效降低。结果表明,镉污染土壤上增施钾肥能有效提高大白菜品质,特别是降低大白菜叶片中各种重金属的含量,低镉胁迫下最佳施钾浓度为200~400 mg·kg<sup>-1</sup>,高镉胁迫下最佳施钾浓度为400~600 mg·kg<sup>-1</sup>。

**关键词:** 镉;钾肥;大白菜;品质;生理特性;重金属

**中图分类号:** S143.3; Q945.78 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-6819(2015)01-0040-08 **doi:** 10.13254/j.jare.2014.0192

## Effects of Potash Fertilizer on Cabbage's Quality in Cadmium Polluted Soils

WANG Xiao-jing<sup>1,2</sup>, CHEN Yi<sup>1</sup>, WANG Fei<sup>1</sup>, WANG Zheng-yin<sup>1\*</sup>

(1.College of Resources and Environmental Science, Southwest University, Chongqing 400716, China; 2.Beibei Agriculture Committee, Chongqing 400700, China)

**Abstract:** In order to further explain how potassium affect the quality of cabbage growing in cadmium contaminated soils, a pot experiment was carried out to study the effect of different dosages of potash fertilizer on the cabbage yield, physiological characteristics (the concentration of chlorophyll and the activity of antioxidative enzyme) and heavy metal concentration in two cadmium contaminated soils. The result showed that cabbage's fresh weight above ground and underground decreased 2.6% and 19.8% respectively in low cadmium stress, while decreased 7.1% and 45.5% in high cadmium stress. After increasing the dosage of potash fertilizer in low concentration cadmium polluted soil, cabbage's fresh weight above ground increased by 0.3%~34.0% and the underground part decreased by 1.2%~7.4%. At the same time, after application of potash fertilizer in high concentration stress, cabbage's fresh weight above ground had no significant change while the underground part significantly increased by 41.8%~87.3%. The concentration of chlorophyll a and chlorophyll b in cabbage leaves increased slightly in low cadmium stress, after application of potash fertilizer, the concentration of chlorophyll a increased greatly but chlorophyll b had no obvious change. The concentration of chlorophyll a and chlorophyll b in cabbage leaves decreased greatly in high cadmium stress and it had no tremendous change after application of potash fertilizer. The activity of antioxidative enzymes (CAT, SOD and POD) in cabbage leaves were strengthened in low cadmium stress while the activity of kinds of antioxidative enzymes in cabbage leaves were weakened in high cadmium stress. After application of potash fertilizer in two cadmium polluted soils, all kinds of enzyme activity had a trend to increase. Applying potash fertilizer into the cadmium contaminated soils could effectively increase the concentration of vitamin C, reducing sugar and promote the free amino acids transforming into crude protein. The concentration of heavy metal cadmium and arsenic significantly increased, but lead, chromium and mercury universally decreased in cadmium stress. From this study we found that application of potash fertilizer could effectively improve the quality of cabbage, especially decrease the concentration of various heavy metals in cabbage's leaves and the recommended dosage was 200~400 mg·kg<sup>-1</sup> in low cadmium stress and 400~600 mg·kg<sup>-1</sup> in high cadmium stress.

**Keywords:** cadmium; potash fertilizer; cabbage; quality; physiological characteristics; heavy metal

收稿日期:2014-07-25

基金项目:国家公益性行业(农业)科研专项(201203013-5);国际植物营养研究所(IPNI)资助项目(2012-Chongqing-02)

作者简介:王小晶(1986—),女,硕士,主要从事植物营养与品质方面的研究。E-mail: crystalprincess86@163.com

\*通信作者:王正银 E-mail: wang\_zhengyin@163.com

土壤重金属污染是当今世界面临的主要环境问题之一,其中镉(Cadmium, Cd)是人体非必需且生物毒性最强的重金属元素之一,极易被植物吸收并积累<sup>[1]</sup>。有研究表明,早在20世纪90年代初,中国镉污染耕地已达 $1.3 \times 10^4 \text{ hm}^2$ ,而且还有继续显著增加的趋势<sup>[2]</sup>。近年来,由于农业生产中使用含镉的肥料,灌溉含镉的污水及大气中漂浮的镉在土壤表面发生沉积,农产品镉污染现象时有发生<sup>[3-4]</sup>。大白菜(*B. rassica campestris* L. var. *pekinensis*)是我国南方地区广泛栽培和食用的叶类蔬菜,极易受到土壤中镉的毒害,表现出生长缓慢、植株矮小、退绿等症状,严重影响产量,同时通过食物链进一步危害人类健康<sup>[5]</sup>。目前对大白菜与镉的相关研究主要集中在基因型差异和吸收机制上,对大白菜植株如何解镉毒害的研究特别是抗氧化系统如SOD、POD、CAT等如何消除镉胁迫的研究较少<sup>[4]</sup>。钾是植物生长所必需的营养元素,同时施用钾肥也是重要的农业增产措施之一<sup>[6]</sup>。施用钾肥能增加蔬菜产量及提高品质,但增施钾肥对大白菜生理特性及重金属吸收的影响报道较少<sup>[7]</sup>。本试验研究了不同镉污染水平土壤上增施钾肥及其用量对大白菜产量、生理特性、食用品质及重金属含量的影响,旨在为发展安全优质蔬菜生产的科学施肥提供理论依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 供试材料

试验于2013年10月—2014年1月采用温室土壤盆栽的方式在西南大学一号玻璃温室中进行,供试土壤为中性紫色土,其基本农化性状:pH(H<sub>2</sub>O) 6.35,有机质 14.9 g·kg<sup>-1</sup>,碱解氮 79.5 mg·kg<sup>-1</sup>,有效磷 28.61 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾 148.7 mg·kg<sup>-1</sup>;供试土壤重金属含量:全镉 0.158 mg·kg<sup>-1</sup>,全铅 15.0 mg·kg<sup>-1</sup>,全铬 22.9 mg·kg<sup>-1</sup>,全汞 0.041 5 mg·kg<sup>-1</sup>,全砷 2.53 mg·kg<sup>-1</sup>(供试土壤重金属含量均在国家规定的限量标准 GB 15612—1995 范围内);供试品种:大白菜品种为‘华新抗 70 一代杂交’。供试肥料为尿素(N, 46%)、磷酸二氢铵(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 52%; N, 12%)、硫酸钾(分析纯);外源重金属添加剂为二水合氯化镉(CdCl<sub>2</sub>·2H<sub>2</sub>O, 分析纯)。

### 1.2 试验方案及方法

盆栽试验共设 11 个处理,分别为:(1)CK(没有添加 Cd,不施钾肥);(2)2 种 Cd 添加浓度:2 mg·kg<sup>-1</sup>(G1)和 10 mg·kg<sup>-1</sup>(G2);(3)K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 肥浓度为 0、100、200、400、600 mg·kg<sup>-1</sup>(以 K<sub>2</sub>O 计)分别为 J0、J1、J2、J3、J4。每个处理 7 次重复,随机排列。试验采用 17 cm×

25 cm 的塑料盆,将添加的镉与 2.5 kg 供试土壤混匀装在盆中,平衡 4 周。各处理均施 N 200 mg·kg<sup>-1</sup>、P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 100 mg·kg<sup>-1</sup>。试验时磷肥全部和氮肥的 40%一次性施入,剩余氮肥分 2 次追施;钾肥按预设的浓度一次性施用。在 60%的田间持水量下平衡 15 d 后播种,三叶期每盆定苗 3 株。根据土壤水分状况每 1~2 d 浇灌 1 次去离子水,以保持土壤达到田间持水量的 80%左右。并进行常规栽培管理。

采样在试验进行 60 d 时进行,收获大白菜的地上部及地下部。将收获的地下部用水洗净,擦干称重。用去离子水快速将收获地上部分(可食用部分)的泥土冲洗干净,滤纸吸干,记录大白菜的生物量。取每个处理中长势有代表性的大白菜同一位置叶片样品,用不锈钢剪刀剪碎混匀待测大白菜生理活性及食用品质。同时另取代表性大白菜样品用不锈钢剪刀剪碎,混匀,80~90 °C 杀青 10 min 后,于 65 °C 烘箱中干燥。植株烘干样品用不锈钢粉碎机粉碎待测重金属含量。

### 1.3 测定内容和方法

供试土壤基本理化性状的测定:土壤碱解氮采用碱解扩散法测定,速效磷采用 NaHCO<sub>3</sub> 法测定,速效钾采用 NH<sub>4</sub>OAc 浸提,火焰光度法测定<sup>[8]</sup>。大白菜生长生理指标的测定:叶绿素 a、叶绿素 b 及叶绿素总量采用 80%丙酮提取,分光光度法测定;过氧化氢酶(CAT)活性用高锰酸钾滴定法测定;过氧化物酶(POD)活性用愈创木酚法测定;超氧化物歧化酶(SOD)活性用氮蓝四唑(Nitrobluetetrazolium, NBT)光化还原法测定。大白菜还原糖采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,维生素 C 采用 2,6-二氯酚酚滴定法测定,游离氨基酸采用水合茚三酮溶液显色法测定,硝酸盐含量采用紫外分光光度法测定<sup>[9-10]</sup>。土壤和大白菜重金属含量的测定:土壤采用 V<sub>HCl</sub>:V<sub>HNO<sub>3</sub></sub>:V<sub>HClO<sub>4</sub></sub>=3:1:2 消解,大白菜采用 V<sub>HNO<sub>3</sub></sub>:V<sub>HClO<sub>4</sub></sub>=4:1 消解,都采用原子吸收分光光度计法测定<sup>[8]</sup>。

### 1.4 数据处理

试验测得数据采用 SAS (Statistical analysis system)软件,方差分析的差异显著性用新复极差法(SSR法,即Duncan法)进行平均数的多重比较,并进行相关分析<sup>[11]</sup>。

## 2 结果与讨论

### 2.1 钾肥对镉污染土壤大白菜生物量的影响

由表 1 可见,未施钾肥条件下与 CK 相比,土壤镉胁迫使大白菜地上部及地下部鲜重均显著 ( $P <$

0.05)下降,低镉胁迫不施钾肥大白菜地上部及地下部鲜重分别降低 2.6%和19.8%;高镉胁迫分别降低 7.1%和45.5%。低镉污染土壤增施钾肥,大白菜地上部鲜重显著增加,增幅为 0.3%~34.0%,且在施钾浓度为 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时增幅最大;大白菜地下部鲜重降低 1.2%~7.4%,以施钾浓度为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时降幅最大。高镉污染土壤增施钾肥,大白菜地上部鲜重显著增加 7.6%~30.8%;与低镉胁迫相反,高镉污染土壤增施钾肥后大白菜地下部鲜重显著增加,增幅为 41.8%~87.3%。由此可见低镉胁迫土壤增施钾肥对大白菜地上部与地下部生长影响作用相反,根冠比显著降低;高镉胁迫土壤增施钾肥对大白菜地上部与地下部生长影响作用相同,根冠比显著升高。

2.2 钾肥对镉污染土壤大白菜生理特性的影响

2.2.1 叶绿素含量

叶绿素含量是植物生长重要的生理参数之一,其

高低表征了植物的生产能力。Perronnet 等<sup>[4]</sup>报道,叶绿素含量降低是植物受镉毒害的最先症状,他们认为抑制叶绿素合成是镉抑制植物光合作用的第一步。表 2 表明,与 CK 相比,低镉土壤上不施钾肥大白菜中叶绿素 a 含量略有升高 (2.7%),施钾肥量在 100~400 mg·kg<sup>-1</sup> 时,能明显提高大白菜中叶绿素 a 含量,增幅为 2.7%~13.1%,施钾量达到 100~200 mg·kg<sup>-1</sup> 时,叶绿素 b 含量升高 0.4%~3.3%,施钾浓度达 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜叶片中叶绿素 b 含量反而降低。高镉胁迫大白菜叶绿素 a 和叶绿素 b 含量均显著减低,与 CK 相比,降幅分别为 5.9%~19.5%和 13.5%~17.5%,高镉胁迫下增施钾肥叶绿素 a 含量升高,但对叶绿素 b 含量影响不大。

叶绿素 a/叶绿素 b 值是衡量叶片感受重金属胁迫相对敏感的一个生理指标,从表 2 中可以看出,各处理条件下,叶绿素 a/叶绿素 b 的值基本稳定在 3:1,

表 1 镉污染土壤不同钾肥处理大白菜生物量  
Table 1 Fresh weight of cabbage in different treatments in cadmium polluted soil

处理	地上部鲜重 /g·株 <sup>-1</sup>	与对照组相比 / ± %	地下部鲜重 /g·株 <sup>-1</sup>	与对照组相比 / ± %	根冠比	与对照组相比 / ± %
CK	38.1 ± 0.76de	—	1.01 ± 0.020a	—	0.026 5	—
G1J0	37.1 ± 0.74e	-2.6	0.81 ± 0.016cd	-19.8	0.022 9	-13.7
G1J1	37.2 ± 0.74e	-2.4	0.75 ± 0.009f	-25.7	0.020 2	-23.9
G1J2	46.8 ± 0.93ab	22.8	0.77 ± 0.015def	-23.8	0.016 5	-37.9
G1J3	49.7 ± 0.99a	30.4	0.76 ± 0.015ef	-24.8	0.015 3	-42.3
G1J4	42.4 ± 0.84c	11.3	0.80 ± 0.016ede	-20.8	0.018 9	-28.8
G2J0	35.4 ± 0.70e	-7.1	0.55 ± 0.011g	-45.5	0.014 8	-44.1
G2J1	38.1 ± 0.76de	0.0	0.78 ± 0.016def	-22.8	0.020 5	-22.7
G2J2	43.9 ± 0.87bc	15.2	1.03 ± 0.021a	2.0	0.023 5	-11.5
G2J3	46.3 ± 1.04ab	8.1	0.83 ± 0.017c	-17.8	0.020 1	-24.0
G2J4	41.2 ± 0.92cd	21.5	0.92 ± 0.018b	-8.9	0.019 9	-25.0

注:表中数据均为 7 次重复平均数,同列数字后不同小写字母表示 Duncan's 新复极差检验 5%显著水平,下同。

Note: Data in the table are averages of seven repeat and different small letters in a row indicate significant difference at α=0.05 by Duncan's test. The same as below.

表 2 镉污染土壤不同钾肥处理大白菜叶绿素含量  
Table 2 Chlorophyll content of cabbage in different treatments in cadmium polluted soil

处理 Treatments	叶绿素 a Chlorophyll a		叶绿素 b Chlorophyll b		叶绿素总量 Chlorophyll contents		叶绿素 a/叶绿素 b
	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 / ± %	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 / ± %	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 / ± %	
CK	0.815 ± 0.038 3cd	—	0.267 ± 0.009 9ab	—	1.08 ± 0.040 0c	—	3.05
G1J0	0.837 ± 0.039 3c	2.7	0.271 ± 0.010 0a	1.4	1.11 ± 0.041 1bc	2.6	3.09
G1J1	0.901 ± 0.042 3ab	10.6	0.268 ± 0.009 9ab	0.4	1.17 ± 0.043 3ab	8.3	3.36
G1J2	0.852 ± 0.040 0bc	4.5	0.276 ± 0.010 2a	3.3	1.13 ± 0.041 8abc	4.4	3.09
G1J3	0.922 ± 0.043 3a	13.1	0.255 ± 0.009 4bc	-4.6	1.18 ± 0.043 7a	8.9	3.62
G1J4	0.769 ± 0.036 1de	-5.7	0.243 ± 0.009 0cd	-9.1	1.01 ± 0.037 4d	-6.4	3.17
G2J0	0.656 ± 0.030 8g	-19.5	0.227 ± 0.008 4e	-15.1	0.883 ± 0.032 7f	-18.3	2.89
G2J1	0.711 ± 0.033 4efg	-12.8	0.226 ± 0.008 4e	-15.3	0.937 ± 0.034 7ef	-13.3	3.14
G2J2	0.767 ± 0.036 0de	-5.9	0.220 ± 0.008 1e	-17.5	0.987 ± 0.036 5de	-8.6	3.48
G2J3	0.719 ± 0.033 8ef	-11.8	0.224 ± 0.008 3e	-16.0	0.943 ± 0.034 9ef	-12.7	3.21
G2J4	0.697 ± 0.032 8fg	-14.5	0.231 ± 0.008 5de	-13.5	0.928 ± 0.034 3ef	-14.1	3.02

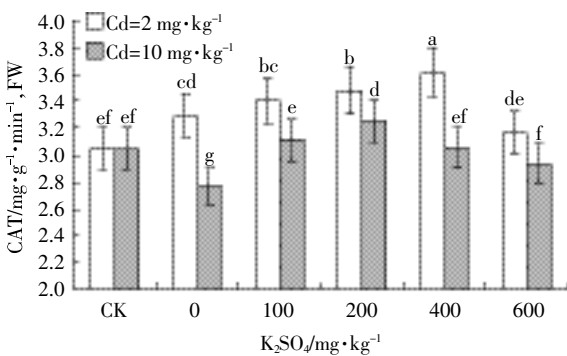
高镉污染土壤上不施钾肥处理大白菜叶绿素 a/叶绿素 b 的值小于 3:1,从植物外部形态上来看,植株叶片明显较其他处理系列偏黄,表现出明显的受毒害现象。

2.2.2 抗氧化活性酶活性

植物体内的超氧化物歧化酶(Superoxide dismutase, SOD)、过氧化氢酶(Catalase, CAT)和过氧化物酶(Peroxidase, POD)是一类重要的保护酶,在清除重金属等诱导产生的氧自由基和过氧化物、抑制膜脂过氧化、保护细胞免遭伤害等方面起着重要作用<sup>[12-14]</sup>。SOD 和 CAT 共同作用能把·O<sup>2-</sup>和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 转化成 O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,抑制高活性的·OH 等的形成;POD 和 CAT 则可催化 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 形成 H<sub>2</sub>O,从而有效阻止·O<sup>2-</sup>和 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 的积累,限制这些自由基对膜脂过氧化的启动<sup>[13-15]</sup>。

低镉污染土壤上增施钾肥明显提高 CAT 的活性,增幅为 3.6%~10.0%,当施钾量达到 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中 CAT 活性最高。高镉污染土壤上大白菜叶片中 CAT 活性较低,增施钾肥后 CAT 活性提高 6.1%~17.7%,施钾量为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时提高效果最优(图 1)。

由图 2 可知,低镉胁迫大白菜对逆境做出适应性反应,大白菜叶片中 SOD 活性提高 1.9%,当土壤中镉含量过高时,大白菜受镉毒害严重,叶片中 SOD 活性降低 13.7%。与不施钾肥相比,2 种镉浓度胁迫下增施钾肥浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 和 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时,大白菜叶片中 SOD 活性增强,增幅分别为 3.5%~4.2%和 3.0%~5.7%,施钾浓度达 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时,大白菜叶片中 SOD 活性开始降低。



不同字母表示 5% 水平差异显著。下同  
Different letters mean significant difference at 5% level.  
The same as follows.

图 1 钾肥对镉污染土壤大白菜叶片中 CAT 活性的影响  
Figure 1 Effect of potassium treatments on the CAT activity in the leaves of *B. brassica campestris* L.var. *pekinensis*. growing in Cd contaminated soil

低镉胁迫下大白菜叶片中 POD 活性升高 11.7%, 增施钾肥浓度为 100~400 mg·kg<sup>-1</sup> 时叶片中 POD 活性提高,增幅为 5.8%~11.0%,当施钾浓度达 600 mg·kg<sup>-1</sup> 时,POD 活性降低 6.8%;高镉胁迫下,大白菜叶片中 POD 活性降低 19.8%,增施钾肥后,叶片中 POD 活性提高 18.6%~20.2%,以施钾浓度为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 效果最优(图 3)。

2.3 钾肥对镉污染土壤大白菜食用品质的影响

2.3.1 维生素 C(Vc)

维生素 C 是一种还原剂,它能使植物体内 SOD 酶活性增强,从而提高机体的免疫力,对人类防癌和抗衰老有重要作用<sup>[6]</sup>。与对照相比(表 3),低镉污染大白菜维生素 C 含量升高 12.8%,高镉污染大白菜维生素 C 含量升高 5.1%。与不施钾肥相比,低镉污染土壤增施钾肥大白菜维生素 C 含量略有提高,增幅为 4.3%~9.9%,施钾量为 600 mg·kg<sup>-1</sup> 时效果最优。与不施钾肥相比,高镉污染土壤增施钾肥大白菜中维生素 C 含量提高

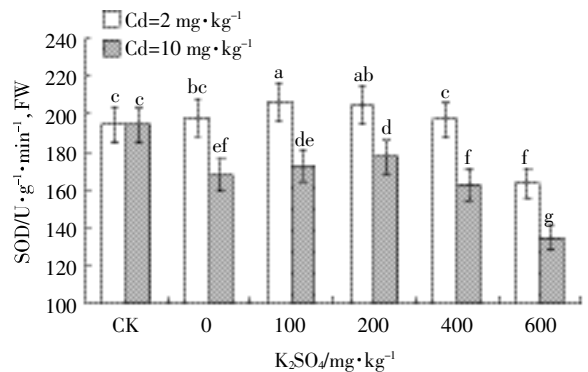


图 2 钾肥对镉污染土壤大白菜叶片中 SOD 活性的影响  
Figure 2 Effect of potassium treatments on the SOD activity in the leaves of *B. brassica campestris* L.var. *pekinensis*. growing in Cd contaminated soil

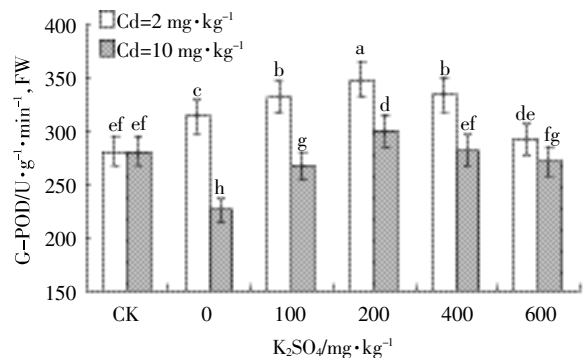


图 3 钾肥对镉污染土壤大白菜叶片中 POD 活性的影响  
Figure 3 Effect of potassium treatments on the POD activity in the leaves of *B. brassica campestris* L.var. *pekinensis*. growing in Cd contaminated soil

0.5%~13.0%,施钾量为 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时效果最优。

### 2.3.2 游离氨基酸

与对照相比(表 3),低镉胁迫显著提高大白菜中游离氨基酸含量(增幅为 33.4%),高镉胁迫对大白菜中游离氨基酸含量的影响作用不明显。与不施钾肥相比,低镉污染土壤上增施钾肥大白菜中游离氨基酸含量显著降低,降幅为 8.5%~29.0%,钾肥施用量为 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中游离氨基酸含量最低。与不施钾肥相比,高镉污染土壤上增施钾肥对大白菜中游离氨基酸含量的影响作用不一致,施钾量为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中游离氨基酸含量升高,施钾量达到 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中游离氨基酸含量开始降低,降幅为 4.5%~24.9%,施钾量为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中游离氨基酸含量最低。

### 2.3.3 还原糖

与对照相比(表 3),低镉胁迫显著提高大白菜中还原糖含量(增加 9.9%),高镉胁迫下大白菜中还原糖也略有升高(升高 5.9%)。与不施钾肥相比,低镉污染土壤上增施钾肥对大白菜中还原糖含量的影响作用不一致,低施钾量(钾肥用量 100~200 mg·kg<sup>-1</sup>)下大白菜中还原糖含量升高 1.9%~3.2%,高施钾量(钾肥用量 400~600 mg·kg<sup>-1</sup>) 时大白菜中还原糖含量降低 4.5%~12.6%,最佳施钾量为 100 mg·kg<sup>-1</sup>。与不施钾肥相比,高镉污染土壤上施钾肥大白菜中还原糖含量显著提高,增幅为 4.0%~8.3%,最佳施钾量为 400 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 2.3.4 粗蛋白

从表 3 中可以看出,在镉污染土壤上增施钾肥能显著提高大白菜粗蛋白含量。与对照相比,在低镉污

染土壤上不施钾肥大白菜中粗蛋白含量略有降低(降低 4.0%),增施钾肥后大白菜粗蛋白含量升高 4.9%~13.4%,钾肥施用量为 100~200 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中粗蛋白的含量最高;在高镉污染土壤上各处理大白菜中粗蛋白含量均有所增加,增幅为 4.0%~17.5%,达到最高时所需钾肥施用量为 400 mg·kg<sup>-1</sup>。

## 2.4 钾肥对镉污染土壤大白菜重金属含量的影响

### 2.4.1 镉

由表 4 可知,镉污染胁迫下大白菜中镉含量急剧上升,增幅为 46.3%~271.5%。可见,大白菜是一种易富集镉的蔬菜,对人体健康存在潜在危害。低镉胁迫增施钾肥浓度为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 和 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时,大白菜中镉含量比不施钾肥处理分别降低了 6.4% 和 7.8%;高镉胁迫下钾肥施用量为 100 mg·kg<sup>-1</sup> 和 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时,大白菜中镉含量比不施钾肥处理分别降低了 5.3% 和 1.3%。由此说明,镉污染土壤上施钾量为 100~200 mg·kg<sup>-1</sup> 时能有效降低大白菜对镉的吸收。

### 2.4.2 铅

从表 4 可以看出,与 CK 相比,镉污染土壤大白菜中铅含量显著降低,低镉污染各处理降幅为 7.1%~28.7%,高镉污染各处理降幅为 3.1%~23.3%。镉胁迫下降低了大白菜对铅的吸收,表明大白菜对镉和铅的吸收存在一定的竞争相关性,增施钾肥后,大白菜中铅含量显著降低,并且在相同镉浓度胁迫下,大白菜中铅含量与钾肥用量成反比,由此表明在镉胁迫下增施钾肥能有效降低大白菜对铅的吸收。

### 2.4.3 铬

与 CK 相比,镉胁迫降低了大白菜对铬的吸收,

表 3 镉污染土壤不同钾肥处理大白菜食用品质指标含量

Table 3 The concentration of nutrition quality index of cabbage in different treatments in cadmium polluted soil

处理	Vc		游离氨基酸		还原糖		粗蛋白		硝酸盐	
	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照组相比 /±%
CK	322.5 ± 6.19f	—	291.3 ± 13.8d	—	0.702 ± 0.009 1e	—	23.9 ± 0.179f	—	3 560 ± 59.3c	—
G1J0	363.7 ± 14.7d	12.8	388.6 ± 9.05a	33.4	0.771 ± 0.010 0c	9.9	22.9 ± 0.172g	-4.0	3 478 ± 77.2d	-2.3
G1J1	391.9 ± 4.91ab	21.5	355.6 ± 4.38b	22.1	0.796 ± 0.010 3ab	13.4	27.1 ± 0.203bc	13.4	3 311 ± 43.0e	-7.0
G1J2	379.5 ± 5.07bcd	17.7	296.8 ± 5.86d	1.9	0.786 ± 0.010 2bc	12.0	26.8 ± 0.201cd	12.0	2 595 ± 13.7i	-27.1
G1J3	393.8 ± 25.1ab	22.1	276.1 ± 5.59ef	-5.2	0.674 ± 0.009 8f	-4.0	26.3 ± 0.197d	9.9	3 030 ± 30.4g	-14.9
G1J4	399.7 ± 15.2a	23.9	291.5 ± 10.8d	0.1	0.736 ± 0.009 6d	4.9	25.1 ± 0.188e	4.9	2 848 ± 47.0h	-20.0
G2J0	338.8 ± 4.40ef	5.1	284.7 ± 3.70de	-2.3	0.743 ± 0.009 7d	5.9	25.3 ± 0.190e	5.9	3 845 ± 45.9a	8.0
G2J1	340.6 ± 4.43ef	5.6	317.8 ± 7.13c	9.1	0.773 ± 0.010 0c	10.1	24.9 ± 0.187e	4.0	3 556 ± 26.2c	-0.1
G2J2	364.9 ± 4.74cd	13.1	213.4 ± 2.77h	-26.7	0.796 ± 0.010 6ab	13.4	26.4 ± 0.198d	10.4	3 649 ± 47.4b	2.5
G2J3	382.7 ± 4.98abc	18.7	271.8 ± 2.53f	-6.7	0.805 ± 0.011 2a	14.7	28.1 ± 0.210a	17.5	3 037 ± 39.5g	-14.7
G2J4	344.4 ± 4.48e	6.8	253.9 ± 5.70g	-12.8	0.793 ± 0.011 0ab	13.0	27.4 ± 0.206b	14.7	3 222 ± 31.9f	-9.5

表4 镉污染土壤不同钾肥处理大白菜重金属含量  
Table 4 Heavy metal content of cabbage in different treatments in cadmium polluted soil

处理	镉 Cd		铅 Pb		铬 Cr		汞 Hg		砷 As	
	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照 组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照 组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照 组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照 组相比 /±%	含量 /mg·kg <sup>-1</sup>	与对照 组相比 /±%
CK	0.032 3 ± 0.001 1g	—	0.095 4 ± 0.003 1a	—	0.401 ± 0.013 2cde	—	0.004 67 ± 0.000 1b	—	0.024 8 ± 0.000 8e	0.0
G1J0	0.051 3 ± 0.001 7ef	58.7	0.088 6 ± 0.002 9bc	-7.1	0.337 ± 0.011 1f	-16.0	0.004 53 ± 0.000 2bc	-2.9	0.032 2 ± 0.001 0abc	29.8
G1J1	0.048 0 ± 0.001 6f	48.6	0.081 6 ± 0.002 7de	-14.5	0.361 ± 0.011 9ef	-9.9	0.005 00 ± 0.000 1b	7.2	0.034 2 ± 0.001 1a	37.9
G1J2	0.055 0 ± 0.001 8de	70.3	0.083 8 ± 0.002 8cd	-12.2	0.407 ± 0.013 4bcd	1.5	0.004 41 ± 0.000 1bc	-5.4	0.033 8 ± 0.001 0ab	36.3
G1J3	0.047 3 ± 0.001 6f	46.3	0.074 6 ± 0.002 5f	-21.8	0.372 ± 0.012 2def	-7.2	0.004 69 ± 0.000 1b	0.6	0.026 4 ± 0.000 8de	6.5
G1J4	0.057 0 ± 0.001 9d	76.5	0.068 0 ± 0.002 2g	-28.7	0.437 ± 0.014 4bc	8.9	0.004 49 ± 0.000 1bc	-3.8	0.031 3 ± 0.001 0abc	26.2
G2J0	0.112 8 ± 0.003 7b	249.1	0.092 4 ± 0.003 0ab	-3.1	0.370 ± 0.012 2def	-7.8	0.005 90 ± 0.000 2a	26.5	0.031 1 ± 0.001 0abc	25.4
G2J1	0.106 8 ± 0.003 5c	230.5	0.087 4 ± 0.002 9bcd	-8.4	0.360 ± 0.011 8ef	-10.2	0.004 88 ± 0.000 2b	4.6	0.029 6 ± 0.000 9cd	19.4
G2J2	0.111 3 ± 0.003 7bc	244.4	0.083 8 ± 0.002 8cd	-12.2	0.402 ± 0.013 2cde	0.2	0.003 97 ± 0.000 1c	-14.8	0.030 2 ± 0.000 9bcd	21.8
G2J3	0.120 0 ± 0.003 9a	271.5	0.073 2 ± 0.002 4fg	-23.3	0.448 ± 0.014 7b	11.6	0.003 98 ± 0.000 1c	-14.7	0.029 4 ± 0.000 9cd	18.5
G2J4	0.114 8 ± 0.003 8b	255.3	0.076 8 ± 0.002 5ef	-19.5	0.539 ± 0.017 7a	34.5	0.004 39 ± 0.000 1bc	-6.0	0.031 4 ± 0.001 0abc	26.6

这与镉污染土壤上大白菜对铅吸收的影响作用相似。与不施钾肥相比,低镉污染土壤上增施钾肥大白菜中铬含量显著升高,增幅为 7.1%~29.7%,高镉胁迫下,除了 G2J1 处理外,其余各处理均提高大白菜中铬含量。由此认为,镉污染土壤上增施钾肥可能导致大白菜对镉和铬的协同吸收。

#### 2.4.4 汞

镉胁迫下钾肥对大白菜中汞含量的影响作用不一致。与对照相比在低镉胁迫下钾肥用量为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中汞含量最低,降幅为 5.4%;在高镉胁迫下钾肥用量为 200 mg·kg<sup>-1</sup> 和 400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中汞含量显著降低,降幅为 14.8%和 14.7%。同时从表 4 还可看出,高镉污染土壤降低大白菜对汞的吸收所需钾肥施用量要高于低镉污染土壤。

#### 2.4.5 砷

低、高镉污染土壤上大白菜叶片对砷的吸收显著升高,增幅分别为 29.8%和 25.4%。低镉污染增施钾肥浓度为 400~600 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜叶片中砷含量降低 2.8%~18.0%,最佳施钾量为 400 mg·kg<sup>-1</sup>。高镉污染土壤增施钾肥浓度为 100~400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜叶片中砷含量降低 2.9%~5.5%,最佳施钾量为 400 mg·kg<sup>-1</sup>,各处理间差异不显著。

### 3 讨论

#### 3.1 钾肥对镉污染土壤上大白菜生长的影响

大量研究表明,镉对植物生理生化的影响有 2 个方面:小剂量时,可提高或加速某些生理生化反应,即镉在低浓度时对植物有积极的“刺激作用”;大剂量时

则对植物产生抑制和毒害<sup>[16-19]</sup>。由于植物根系是重金属的最先接纳者,且重金属在根部明显富集,因此根系往往是最直接、最严重的受害器官之一。本研究结果表明,镉胁迫大白菜地上部及地下部鲜重显著降低,低镉污染土壤增施钾肥对大白菜地上部及地下部生长影响作用相反,大白菜地上部鲜重提高 0.3%~34.0%,地下部鲜重降低 1.2%~7.4%;高镉污染土壤增施钾肥对大白菜地上部及地下部生长影响作用相同,大白菜地上部鲜重提高 7.6%~30.8%,地下部鲜重提高 41.8%~87.3%。Arduini 等<sup>[20]</sup>也发现不同浓度的 Cd 处理对 *Miscanthus* 的生物量影响不同,对于钾肥影响 Cd 污染土壤上大白菜根系生长的原因,可能与 K<sup>+</sup>影响 Cd 超级化细胞原生质膜,提高细胞跨膜电位,从而提高植物对离子的吸收有关。

#### 3.2 钾肥对镉污染土壤上大白菜生理特性的影响

叶绿素含量是植物生长重要生理参数,其高低水平表征了植物的生产能力,叶绿素含量降低,光合作用减弱,会导致植物生长受抑制,生物量下降<sup>[17]</sup>。本试验研究表明,低镉胁迫大白菜中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量略有升高,这可能是因为低浓度重金属离子是细胞分裂素代谢中酶的触媒剂<sup>[18-19,21-23]</sup>,可以刺激生长,从而增加了大白菜体内叶绿素含量的积累;高镉胁迫大白菜中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量显著降低,可能的原因是高浓度重金属被植物吸收后,细胞内的重金属离子与叶绿素合成的原叶绿素酯还原酶、氨基乙酰丙酸合成酶、胆色素原脱氨酶等肽链富含-SH 的部分结合,影响这些酶的合成或抑制酶的活性,从而阻碍了叶绿素的合成<sup>[24-25]</sup>。低镉污染土壤施钾浓度为 100~

400 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜叶片中叶绿素 a 和叶绿素 b 含量明显提高,表明镉污染土壤上增施钾肥能有效刺激细胞生长,提高大白菜叶片中叶绿素含量;高镉污染土壤上增施钾肥,大白菜叶片中叶绿素 a 含量略有提高,对叶绿素 b 含量的影响作用不同,显示出高镉污染土壤上大白菜受镉毒害严重,增施钾肥对促进大白菜叶片中叶绿素 a、叶绿素 b 合成的作用不大,但增施钾肥使大白菜叶片叶绿素 a/叶绿素 b 值稳定在 3 左右,增强叶片光合作用,有利于抵抗镉毒害。

镉作为毒性最强的重金属污染元素之一,尽管是非氧化还原活性的重金属,但已被证实能诱导植物组织产生活性氧<sup>[26-27]</sup>,从而导致植物细胞生理功能紊乱。低镉污染土壤上增施钾肥对提高大白菜中抗氧化酶的活性的效果不显著,过量增施钾肥反而降低大白菜中抗氧化酶的活性。这说明在低镉胁迫下,大白菜对逆境作出适应性反应,增施钾肥能够在一定范围内提高抗氧化酶活性,协助大白菜抵抗外界重金属毒害。与对照相比,高镉胁迫下各处理大白菜抗氧化酶活性均降低,说明偏酸性紫色土镉污染达到 10 mg·kg<sup>-1</sup> 时,已经不适合大白菜生长。增施钾肥并不能有效改善大白菜长势,过量施钾反而使镉毒害加重。

### 3.3 钾肥对镉污染土壤大白菜食用品质的作用

钾是公认的“品质元素”,因为它是生物体中很多酶的活化剂,与植物体内的许多代谢过程,如光合作用、呼吸作用及碳水化合物、脂肪和蛋白质的合成等密切相关,缺钾会扰乱叶片的新陈代谢,因此钾肥不仅对产量的提高有显著作用,而且亦可改善产品品质<sup>[27-28]</sup>。镉污染土壤上增施钾肥大白菜中维生素 C 的含量明显升高,增幅为 6.8%~23.9%;钾肥施用量大于 200 mg·kg<sup>-1</sup> 时大白菜中游离氨基酸的含量明显降低,从而促进大白菜中游离氨基酸转化为蛋白质;增施钾肥对大白菜中还原糖含量的影响作用不一致。

### 3.4 钾肥对镉污染土壤上大白菜重金属含量的影响

当土壤中施入钾肥,可改变土壤的性质如 pH 值和表面电荷或与重金属离子直接作用,从而导致重金属形态的变化,最终影响其活性。一方面主要表现在钾和金属离子在土壤表面的交换性竞争,降低了土壤交换态镉的含量,另一方面钾肥伴随阴离子影响重金属形态、吸附解吸过程及其生物有效性等方面<sup>[21-25]</sup>。在自然状态下,土壤溶液中 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的含量很少,一般只有 10 mg·L<sup>-1</sup>。一般情况下,在硫酸根浓度低时,土壤对硫酸根离子的吸附为专性吸附,专性吸附结果使土壤胶体所带的净负电荷增加,溶液的 pH 值升高,增强了

土壤对镉的吸持。增施钾肥后,SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 的加入增加了可变电荷土壤对镉的吸附,主要因为其增加了土壤负电荷密度和负电势,从而影响大白菜对土壤中重金属的吸收<sup>[29-30]</sup>。

## 4 结论

(1) 镉胁迫土壤上大白菜地上部及地下部鲜重显著降低,低镉污染土壤增施钾肥对大白菜地上部及地下部生长影响作用相反,高镉污染土壤增施钾肥对大白菜地上部及地下部生长影响作用相同。

(2) 镉污染土壤上增施钾肥浓度在 100~200 mg·kg<sup>-1</sup> 时,大白菜叶片中各抗氧化系统酶活性升高,对镉毒害的耐性增强。

(3) 两种镉污染土壤上增施钾肥均能显著提高大白菜的营养品质,在低镉污染土壤中适合施用低量(<400 mg·kg<sup>-1</sup>)的钾肥,在高污染土壤中适合施用高量(>400 mg·kg<sup>-1</sup>)的钾肥。

(4) 镉污染土壤增施钾肥能有效降低大白菜叶片对 5 种重金属的吸收,低镉污染土壤上最佳施钾量为 200 mg·kg<sup>-1</sup>,高镉污染土壤上最佳施钾量为 400 mg·kg<sup>-1</sup>。

### 参考文献:

- [1] 张红振, 骆永明, 章海波, 等. 土壤环境质量指导值与标准研究 V. 镉在土壤-作物系统中的富集规律与农产品质量安全[J]. 土壤学报, 2010(4): 38-48.  
ZHANG Hong-zhen, LUO Yong-ming, ZHANG Hai-bo, et al. Study on soil environmental quality guidelines and standards V. Modeling of cadmium uptake in soil-crop systems for human food safety in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2010(4): 38-48. (in Chinese)
- [2] 张树杰, 李玲, 张春雷, 等. 镉对油菜幼苗生长及微量元素含量的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(5): 836-842.  
ZHANG Shu-jie, LI Ling, ZHANG Chun-lei, et al. Influences of cadmium on the growth and micro-elements contents of oilseed rape seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(5): 836-842. (in Chinese)
- [3] 曹晓玲, 罗尊长, 黄道友, 等. 镉污染稻草还田对土壤镉形态转化的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(9): 1786-1792.  
CAO Xiao-ling, LUO Zun-zhang, HUANG Dao-you, et al. Effects of cd-contaminated rice straw incorporation on transformation of Cd forms in soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(9): 1786-1792. (in Chinese)
- [4] Perronnet K, Schwartz C, Cerard E, et al. Availability of cadmium and zinc accumulated in the leaves of *Thlaspi caerulescens* incorporated into soil[J]. *Plant and Soil*, 2000, 227: 257-263.
- [5] 邓爱珍, 刘传平, 沈振国. 镉处理下青菜和白菜 MDA 含量 POD 和 SOD 活性变化[J]. 湖北农业科学, 2005(1): 67-69.

- DENG Ai-zhen, LIU Chuan-ping, SHEN Zhen-guo. Effect of cadmium on MDA content, POD and SOD activities of *Brassica Pekinensis* and *Brassica Chinensis*[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2005(1): 67-69.(in Chinese)
- [6] 王正银. 蔬菜营养与品质[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 207-209.  
WANG Zheng-yin. Nutrition and quality of vegetables[M]. Beijing: Science Press, 2009: 207-209.(in Chinese)
- [7] 刘平. 钾肥伴阴离子对土壤铅和镉有效性的影响及其机制[D]. 北京: 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 2006: 15-20.  
LIU Ping. Effect of accompanny anions in potassium fertilizers on phytoavailability of Pb and Cd in soils and its mechanisms[D]. Beijing: Institute of Soil and Fertilizer, Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2006: 15-20.(in Chinese)
- [8] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999: 106-489.  
LU Ru-kun. Chemical analysis of soil agricultural[M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 1999: 106-489.(in Chinese)
- [9] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 130-138.  
WANG Xue-kui. Plant physiological and biochemical principles and experimental techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 130-138.(in Chinese)
- [10] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 108-116.  
HAO Zai-bing, CANG Jing, XU Zhong. Plant physiology experiment [M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2004: 108-116.(in Chinese)
- [11] 白厚义, 肖俊璋. 试验研究及统计分析[M]. 西安: 世界图书出版社, 1998: 120-128.  
BAI Hou-yi, XIAO Jun-zhang. Test and statistical analysis[M]. Xi-an: World Book Publishing, 1998: 120-128.(in Chinese)
- [12] 方晓航, 曾晓雯, 于方明, 等. Cd胁迫对白菜生理特征及元素吸收的影响研究[J]. 农业环境科学学报, 2006(1): 31-35.  
FANG Xiao-hang, ZENG Xiao-wen, YU Fang-ming, et al. Physiological characteristic and uptake of Cd, nutritious elements in cabbage grown on Cd-contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006(1): 31-35.(in Chinese)
- [13] 孙光闻, 朱祝军, 方学智. 镉对白菜活性氧代谢及 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>清除系统的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(12): 2012-2015.  
SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, FANG Xue-zhi. Effects of different cadmium levels on active oxygen metabolism and H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>-scavenging system in *Brassica campestris* L.ssp.Chinensis[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37(12): 2012-2015.(in Chinese)
- [14] 王兴明, 涂俊芳, 李晶, 等. 镉处理对油菜生长和抗氧化酶系统的影响[J]. 应用生态学报, 2006, 17(1): 106-110.  
WANG Xing-ming, TU Jun-fang, LI Jing, et al. Effects of Cd on rape growth and antioxidant enzyme system[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2006, 17(1): 106-110.(in Chinese)
- [15] 宋阿琳, 李萍, 李兆君, 等. 硅对镉胁迫下白菜光合作用及相关生理特性的影响[J]. 园艺学报, 2011, 38(9): 1675-1684.  
SONG A-lin, LI Ping, LI Zhao-jun, et al. Effect of silicon on photosynthesis and its related physiological parameters of *Brassica campestris* L. ssp.chinensis (L.) makino grown under Cd stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2011, 38(9): 1675-1684.(in Chinese)
- [16] Kennedy C D, Gonsalves F A N. The action of divalent zinc, cadmium, mercury, copper and lead on the trans-root potential and H<sup>+</sup>efflux of excised root[J]. *Experimental Botany*, 1987, 38: 800-817.
- [17] 张树清, 张夫道, 刘秀梅, 等. 重金属元素 Cu Zn 对大白菜幼苗的毒性效应[J]. 农业环境科学学报, 2005, 24(5): 838-842.  
ZHANG Shu-qing, ZHANG Fu-dao, LIU Xiu-mei, et al. Effect of copper and zinc on the growth of chinese cabbage seedling[J]. *Journal of Agro-environmental Science*, 2005, 24(5): 838-842.(in Chinese)
- [18] Chien H F, Kao C H. Accumulation of ammonium in rice leaves in response to excess cadmium[J]. *Plant Science*, 2000, 156: 111-115.
- [19] Wang Yong-qiang, Xiao Li-zhong, Li Shi-yin, et al. Effects of combined pollution of Pb and Cd on growth and yield of rice[J]. *Agricultural Science & Technology*, 2010, 11(5): 168-170.
- [20] Arduini I, Masoni A, Mariotti M, et al. Low cadmium application increase miscanthus growth and cadmium translocation[J]. *Environmental Experimental Botany*, 2004, 52: 89-100.
- [21] 何江华, 杜应琼, 周晓洪, 等. Cd对叶菜生长和产量的影响及其在叶菜体内的积累[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(3): 597-601.  
HE Jiang-hua, DU Ying-qiong, ZHOU Xiao-hong, et al. Effects of cadmium on the growths and yields of leaf vegetables and accumulation of cadmium[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(3): 597-601.(in Chinese)
- [22] Chernikova T J M, Lee E H, et al. Ozone tolerance and antioxidant enzyme activity in soybean cultivars[J]. *Photosynth Res*, 2000, 64: 15-26.
- [23] Ogawa K, Lwabuchi M. A mechanism for promoting the germination of *Zinnia elegans* seeds by hydrogen peroxide[J]. *Plant Cell Physiol*, 2001, 42: 286-291.
- [24] Ekmekci Y, Tanyolac D, Ayhan B.Effects of cadmium on antioxidant enzyme and photosynthetic activities in leaves of two maize cultivars[J]. *J Plant Physiol*, 2008, 165(6): 600-611.
- [25] Zhang G P, Fukami M, Sekimoto H. Influence of cadmium on mineral concentration and components in wheat genotypes differing in Cd tolerance at seeding stage[J]. *Field Crops Research*, 2002, 77: 93-98.
- [26] Sanitadi Toppi L, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 1999, 41(2): 105-130.
- [27] 陈苏, 孙丽娜, 孙铁珩, 等. 钾肥对铅的植物有效性的影响[J]. 辽宁工程技术大学学报, 2007(2): 127-130.  
CHEN Su, SUN Li-na, SUN Tie-heng, et al. Effects of potash fertilizer on phytoavailability of lead[J]. *Journal of Liaoning Technical University*, 2007(2): 127-130.(in Chinese)
- [28] 刘平, 徐明岗, 李菊梅, 等. 不同钾肥对土壤铅植物有效性的影响及其机制[J]. 环境科学, 2008, 29(1): 204-208.  
LIU Ping, XU Ming-gang, LI Ju-mei, et al. Effects of different potassium fertilizers on the phytoavailability of Pb in soil and its mechanisms [J]. *Environmental Science*, 2008, 29(1): 204-208.(in Chinese)
- [29] Zhang gangya, Brummer C W, Zhang xiaonian, Effect of sulfate cadmium by variable charge soils[J]. *Pedosphere*, 1998, 8(3): 245-250.
- [30] Zhu B, Alva A K. Differential adsorption of trace metals by soils as influenced by exchangeable cation and ionic strength[J]. *Soil Science*, 1993, 155(1): 61-66.