

doi: 103969/j.issn.0490-6756.2017.03.028

镉胁迫对转 *PprI* 基因油菜生理生化的影响

谢 甜, 冯 刚, 闫庆龙, 魏 涛, 王茂林, 赵 云

(四川大学生命科学院, 成都 610064)

摘要: 利用露天盆栽试验研究了不同浓度 Cd 胁迫下转 *PprI* 基因油菜和野生型油菜对 Cd 的吸收特性以及生理响应。结果表明:随着 Cd 胁迫浓度的升高,转基因和野生型油菜对 Cd 的吸收均显著增加,且二者地下部分的吸收都大于地上部分;在 0.5 mg/kg Cd 处理下,转基因和非转基因油菜对 Cd 的吸收差异不显著,但 1 和 2 mg/kg 处理下转基因油菜对 Cd 的吸收显著低于非转基因油菜。两种油菜对 Cd 的富集系数和转运系数均随处理浓度的升高而降低;随着 Cd 浓度的增加,超氧化物歧化酶(SOD)活性呈现先上升后下降的趋势,且在相同处理浓度下,转基因油菜的 SOD 活性均高于非转基因油菜;丙二醛(MDA)含量呈上升趋势,且其在转基因油菜中的含量均低于非转基因油菜;叶绿素 a 和叶绿素 b 的含量随 Cd 浓度的升高而下降。因此 *PprI* 基因的导入,显著降低了油菜对 Cd 的吸收,提高了其可食部分安全性。

关键词: *PprI* 基因; 镉; 油菜; 抗氧化酶; 叶绿素; 丙二醛

中图分类号: Q945 **文献标识码:** A **文章编号:** 0490-6756(2017)02-0387-06

Effects of Cd stress on the physiological responses of oilseed rape transformed by *PprI*

XIE Tian, FENG Gang, YAN Qing-Long, WEI Tao, WANG Mao-Lin, ZHAO Yun

(College of Life Sciences, Sichuan University, Chengdu 610064, China)

Abstract: The absorption characteristics and physiological responses of oilseed rape transformed by *PprI* were analyzed by the outdoor pot experiment under the cadmium stress. Results indicated that the accumulation of Cd in both transgenic and wild type plants all increased significantly as the increase of Cd concentration in soil, and the content in roots was higher than upon-ground part. Under the 0.5 mg/kg Cd in soil, there were no significant differences between the accumulations of Cd in the two genotype plants, but the accumulation of Cd in the transgenic plants was significantly lower than that in wild type at 1 and 2 mg/kg Cd treatments. The accumulation coefficient and translocation coefficient of plant reduced gradually with the increasing concentration of Cd. Under the Cd stress, superoxide dismutase (SOD) activity in all plants showed a trend of first increasing and then decreasing and SOD activity in all transgenic plants were higher than that in wild type plants. The content of malondialdehyde was increased, and the content of transgenic plants was lower than that of wild type plants. The content of chlorophyll a and chlorophyll b in all plants decreased with the increase of Cd concentration. Therefore, the introduction of *PprI* gene significantly reduced the absorption of Cd in rapeseed, and increased the safety of the edible part.

收稿日期: 2016-02-23

基金项目: 四川省育种攻关项目(2016NYZ0031)

作者简介: 谢甜(1990-),女,四川德阳人,硕士,从事植物分子遗传学研究,E-mail:835319851@qq.com

通讯作者: 赵云.E-mail: zhaoyun@scu.edu.cn

Keywords: Gene *PprI*; cadmium; *Brassica napus*; Antioxidant enzyme; Chlorophyll; Malondialdehyde

1 引言

土壤是人类赖以生存的重要资源,随着工业化、城市化、农业现代化的发展,使得重金属镉逐步进入农田土壤.土壤受镉污染后,生长在其上的蔬菜和作物的生长发育及品质将受到影响,并通过食物链危害人类健康^[1].2010年,中国水稻研究所与农业部稻米及制品质量监督检验测试中心发布的《我国稻米质量安全现状及发展对策研究》称,目前我国 1/5 的耕地受到了重金属污染,而镉污染的耕地涉及 11 个省 25 个地区,每年生产“镉米” 5.0×10^7 kg^[2].古语云食为民天,人们食用的大部分食物都来自农产品,因此,农产品的质量安全与人类的健康密切相关,农产品中镉超标,会引发诸如水俣病、骨痛、甚至癌症等影响人体健康的疾病^[3,4].Cd 污染已成为危及我国食品安全的主要因素之一,受到广泛关注.从自然界中寻找或通过基因工程手段构建对重金属抗性强的农作物品种,为保障重金属污染地区的食品安全提供了一个有效的途径.

PprI 是从耐辐射球菌中发现的一个可作为全局调控因子的 DNA 损伤修复开关基因,在逆境胁迫下被一些损伤信号或某些中间信号分子激活,从而提高各修复基因的表达,开启生物体中的胁迫应答和防御机制,增强其抗逆性^[5].重金属胁迫会打破植物体原有的代谢平衡,引起氧化胁迫,阻碍养分吸收和同化作用,抑制光合作用和蒸腾作用等.已有研究表明能够将 *PprI* 基因导入其他生物异源表达,如导入大肠杆菌和植物后能显著增强大肠杆菌的抗氧化性能以及植物的耐钠盐抗旱能力^[6,7].目前对于 *PprI* 基因在重金属胁迫下的抗性研究未有报道.

甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)是我国第一大油料作物,具有生物量大,容易栽培,根系发达可以改良土壤等优点;油菜幼苗富含的钙、铁、维生素 C 和膳食纤维,作为食用蔬菜具有很高的营养价值;籽粒中含有大量的脂肪酸和蛋白质,可用于食用油和生物柴油的生产,菜饼经加工后可作为良好的饲料;此外焚烧的秸秆回收后可以作为肥料还田,环保而且具有很好的经济价值^[8-10].

本研究以携带 *PprI* 的转基因甘蓝型油菜和非转基因甘蓝型油菜为材料,通过土壤中不同浓度的 Cd 胁迫,研究转基因油菜和非转基因油菜对 Cd

的吸收特征以及其在 Cd 胁迫下的生理生化指标的响应,为进一步研究 *PprI* 基因是否参与以及如何参与作物抗 Cd 胁迫提供理论依据和实践基础,有助于中轻度镉污染土壤的高效利用的同时为我国食品重金属污染问题的解决提供科学依据.

2 材料与方法

2.1 材料

84100-18 为甘蓝型油菜(*Brassica napus* L.)波里马细胞质雄性不育恢复系,由本课题组选育;84100-18-*PprI* 是以 84100-18 为受体的转 *PprI* 基因品系,其携带目的基因 *PprI* 和选择标记基因 *Npt-II*,种子由中国农科院生物技术研究所林敏教授惠赠.

2.2 方法

2.2.1 植株培育与镉处理 供试土壤采自四川省成都市温江区无污染的郊区农田,土壤质量良好,其理化性质如表 1 所示.土壤自然风干,去除石块和杂质后,将相应的镉浓度梯度溶液加入试验土壤中搅拌均匀,土壤中镉浓度分别为 0、0.5、1 和 2 mg/kg,老化一个月后装盆.油菜种子用 0、0.5、1 和 2 mg/L 的无菌 Cd 溶液浸泡 12 h 后,播种于相应的镉浓度土壤中,实验期间定期浇水,保持 75% 的土壤湿度,待植株生长到八叶一心期,选取从上到下第 4 片叶子进行各项生理指标的测定,之后收获整株植物,分离地上部分和地下部分,用于 Cd 含量的测定.

表 1 土壤的理化性质

Tab. 1 Physical and chemical properties of soil

pH	有机质	全氮	全磷	全钾
	Organic Matter (g/kg)	Total nitrogen (g/kg)	Total phosphorus (g/kg)	Total potassium (g/kg)
6.663±0.039	43.813±0.458	3.620±0.115	1.095±0.025	19.966±0.212

2.2.2 镉含量的测定 植物样品:将不同处理的待测植株用去离子水洗净后,将植株的根和地上部分开,105℃下杀青 15 min,75℃下烘干至恒重研细.取干粉 0.2 g,采用石墨消解仪消解(HNO₃和 HClO₄法消化,二者体积比为 5:1),先于 70℃下保持 15 min,接着升温到 155℃,维持 50 min,然后在 180℃下保持 15 min,消解完成后进行赶酸,当样品溶液蒸至近干时(约 1 mL),停止赶酸,定容到 50 mL.用电

感耦合等离子质谱(ICP-MS; Inductively coupled plasma mass spectrometry)对植物根、地上部分中 Cd 含量进行测定,各样品 3 次重复.植物样品 Cd 的分析过程中采用国家标准参比物质 GBW07603(灌木枝叶成分分析标准物质)进行质量控制.

土壤样品:准确称取经风干至恒重、粉碎过筛(100 目)的待测土壤样品 0.2 g 于消解管中,用少量水润湿,分步加入消解试剂 HCl、HNO₃、HF、HClO₄,于石墨消解仪中,先加入 5 mL HCl,150℃ 保持 60 min,接着加入 5mL HNO₃,150℃ 保持 60 min,然后蒸发至 5 mL,再加入 3 mL HF,150℃ 保持 10 min,最后加入 3 mL HClO₄,190℃ 保持 100 min,消解完成后进行赶酸,以除去氮氧化物和氢氟酸.当样品溶液蒸至近干时(约 1 mL),停止赶酸,加入 1 mL HNO₃后定容到 50 mL.用 ICP-MS 对土壤样品中 Cd 含量进行测定,各样品 3 次重复.土壤样品 Cd 的分析过程中采用国家标准参比物质 GBW07408(土壤成分分析标准物质)土壤标准样品进行质量控制.

2.2.3 生理生化指标的测定 丙二醛(MDA)含量采用硫代巴比妥酸法测定^[11],叶绿素含量采用丙酮乙醇混合法测定^[12],用试剂盒测定氧化物歧化酶(SOD)活性,试剂盒购自南京建成生物工程研究所(<http://www.njjcbio.com>).

2.3 数据处理

试验数据采用 SPSS19.0 软件进行统计分析,以 EXCL 作图.以 a、b 和 c 等小写英文字母表示不同处理之间的差异显著性($P < 0.05$).

3 结果与分析

3.1 油菜对 Cd 的吸收特性

在不同 Cd 浓度胁迫下,油菜幼苗对 Cd 的吸收随着镉浓度的升高而显著增加($P < 0.05$).在同

一浓度下,无论是转基因(84100-18-*PprI*)还是非转基因油菜幼苗(84100-18)根系的 Cd 含量均高于地上部分的含量.说明油菜幼苗吸收 Cd 后主要累积在根部,随着生育进程逐步转到地上部分.在 0.5 mg/kg Cd 处理下,转基因油菜幼苗(84100-18-*PprI*)地上与地下部分的 Cd 浓度分别为 1.97、2.02 mg/kg,非转基因幼苗(84100-18)的分别为 1.86 和 2.13 mg/kg,二者的地上与地下部分 Cd 含量差异不显著($P > 0.05$);在 2 mg/kg 处理下,转基因幼苗(84100-18-*PprI*)地上部分和根部 Cd 含量均低于非转基因幼苗(84100-18)中的含量,各降低了 9.38% 和 5.75%,差异达到显著性水平($P < 0.05$,详见表 2).结果显示,在土壤镉污染严重的情况下,由于 *PprI* 的导入,降低了油菜对 Cd 的吸收.

转运系数可以反映重金属由植物根部迁移至地上部分的能力,是地上部分 Cd 含量与地下部 Cd 含量的比值.如表 3 所示,随着 Cd 处理浓度的增加,两种基因型油菜的转运系数随之降低,但 1 和 2mg/kg 处理组之间差异不显著($P > 0.05$);且转基因油菜(84100-18-*PprI*)转运系数显著低于非转基因幼苗(84100-18)的($P < 0.05$),由此可见,转基因油菜(84100-18-*PprI*)对 Cd 的转运能力低于非转基因油菜(84100-18)的.由表 3 还可以看出,两种基因型油菜幼苗在不同 Cd 浓度处理下,其富集系数随 Cd 浓度的增加而显著降低($P < 0.05$).富集系数是植物中重金属含量与土壤中重金属含量的比值,可以表征土壤-植物系统中重金属元素迁移的难易程度,同时也可以反映植物吸收重金属的能力.转基因油菜(84100-18-*PprI*)的富集系数显著低于非转基因油菜(84100-18)的($P < 0.05$),表明非转基因(84100-18)对镉的吸收能力比转基因植株(84100-18-*PprI*)强.结果显示由于 *PprI* 的导入,降低了油菜对 Cd 的富集.

表 2 油菜幼苗对 Cd 的吸收和分布

Tab. 2 The uptake and distribution of Cd in rapeseed seedlings

Cd 浓度 Cd concentrations (mg/kg)	84100-18		84100-18- <i>PprI</i>	
	地上部分 Above-ground(mg/kg)	根系 Roots(mg/kg)	地上部分 Above-ground(mg/kg)	根系 Roots(mg/kg)
0.5	1.967±0.142 a	2.019±0.096 a	1.862±0.041 a	2.126±0.049 a
1	2.996±0.124 c	3.870±0.082 b	2.731±0.085 b	4.006±0.145 b
2	4.870±0.038 e	6.938±0.347 d	4.413±0.079 d	6.539±0.146 c

表 3 对 Cd 胁迫下油菜幼苗的转运系数、富集系数以及净化率

Tab. 3 Bioaccumulation factor, translocation factor and removal rate of rape seedlings in different concentrations cadmium stress

Cd 浓度 Cd concentrations (mg/kg)	84100-18		84100-18- <i>PprI</i>	
	转运系数 Translocation factor	富集系数 Bioaccumulation factor	转运系数 Translocation factor	富集系数 Bioaccumulation factor
0.5	2.237±0.216 c	0.056±0.003 e	1.919±0.059 b	0.052±0.001 d
1	1.969±0.043 b	0.043±0.001 c	1.668±0.105 a	0.037±0.001 b
2	1.979±0.083 b	0.023±0.001 a	1.599±0.029 a	0.021±0.001 a

3.2 Cd 对油菜幼苗 MDA 含量的影响

重金属胁迫下,植物细胞通过膜脂过氧化作用来消除或是减轻活性氧物质造成的伤害,MDA 就是植物在重金属胁迫逆境中膜脂过氧化的产物之一,其含量的变化可反映植物细胞膜脂过氧化的程度以及对逆境响应的强弱.如图 1 所示,转基因油菜(84100-18-*PprI*)在 Cd 胁迫下,随处理浓度的增加呈先上升后下降趋势,2 mg/kg Cd 浓度处理组与 0 mg/kg 处理组油菜中 MDA 含量差异不显著($P>0.05$);非转基因油菜幼苗(84100-18)中 MDA 的含量随着 Cd 处理浓度的增加呈逐渐升高趋势,与其 0 处理组相比,1 和 2 mg/kg 处理条件下 MDA 含量分别增加了 24.19% 和 41.76%.结果表明,较高 Cd 浓度处理下,非转基因油菜(84100-18)的膜脂过氧化程度比转基因油菜(84100-18-*PprI*)严重,说明由于 *PprI* 的导入,缓解了镉对油菜的毒害.

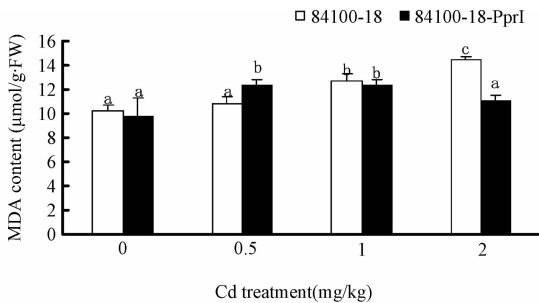


图 1 Cd 胁迫对油菜 MDA 含量的影响

Fig. 1 Effects of cadmium stress on the MDA content in rapeseed seedling

3.3 Cd 对油菜幼苗 SOD 活性的影响

超氧化物歧化酶(SOD)能通过歧化反应催化超氧化物转化为氧气和过氧化氢,是一种重要的抗氧化剂,保护暴露于氧气中的细胞.如图 2 所示,随着镉处理浓度的增加,转基因幼苗(84100-18-*PprI*)呈先上升后下降趋势,0.5 mg/kg 处理酶活

性最高,活性升高了 20.02%,非转基因油菜幼苗(84100-18)的 SOD 活性呈下降的趋势.在各处理浓度下,转基因油菜叶片(84100-18-*PprI*)的 SOD 活性均高于非转基因(84100-18)的活性,在 0.5, 1 和 2mg/kg 这三个处理浓度下均达到了显著水平($P<0.05$).结果表明,同一浓度下,转基因油菜(84100-18-*PprI*)的 SOD 活性高于非转基因(84100-18)的,且两种基因型的油菜在低浓度的 Cd 胁迫下对酶的活性表现出促进作用,高浓度的 Cd 表现出抑制作用.说明转基因油菜(84100-18-*PprI*)在镉胁迫下具有更高的抗氧化能力.

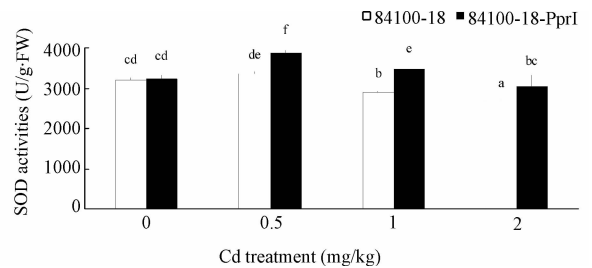


图 2 Cd 胁迫对油菜 SOD 活性的影响

Fig. 2 Effects of cadmium stress on the activities of SOD in rapeseed seedling

3.4 Cd 对油菜幼苗叶绿素含量的影响

叶绿体中的叶绿素是植物进行光合作用的主要色素,其含量高低能在一定程度上反映光合作用水平.油菜受到 Cd 胁迫后,转基因(84100-18-*PprI*)和非转基因油菜(84100-18)叶绿素 a、b 含量均逐渐减少,在 Cd 处理为 2mg/kg 处最低,与其各自的 0 处理组对比,转基因(84100-18-*PprI*)和非转基因油菜幼苗(84100-18)叶绿素 a 分别降低了 34.68% 和 36.40%,叶绿素 b 分别降低了 35.01% 和 35.43%(图 3 a、b).结果说明,重金属 Cd 会破坏植物体的叶绿素.

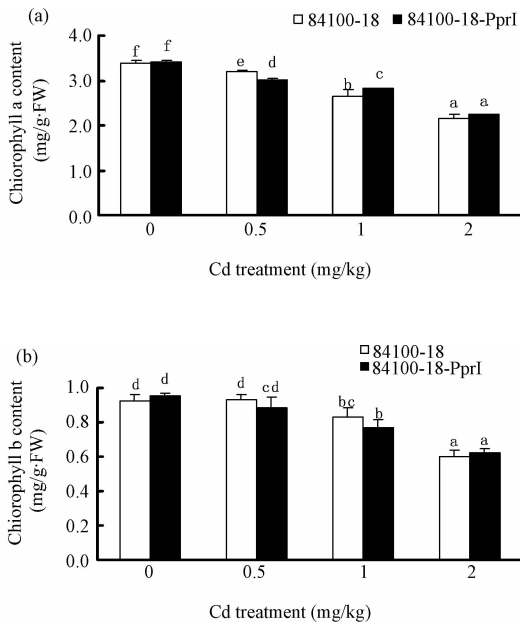


图 3 镉胁迫对油菜叶绿素含量的影响

Fig. 3 Effects of cadmium stress on the Chlorophyll content in rapeseed seedling

(a) 叶绿素 a 含量; (b) 叶绿素 b 含量

4 讨论

镉在生物体中不具有生物学功能,属于非必需元素,具有高毒性、高流动性和长期性等特点,且极易被植物吸收并积累在各器官,并通过食物链危害人类健康^[13]. 本研究表明油菜对镉的富集主要是根吸收后再转运到地上部位,且地上部分的镉含量低于根部,随着镉处理浓度的增加油菜各器官的镉含量也呈显著性的升高趋势. 这与 Wójcik 等^[14]和 Srivastava 等^[15]报道的镉胁迫下玉米和水稻幼苗中镉的分布结果相似. 植株对镉的富集系数和转运系数随着镉处理浓度的增加而降低,有可能是因为镉处理浓度逐渐升高,对植物的机能造成损害也随之加重,从而抑制了植株对土壤中 Cd 的吸收并导致大量的 Cd 积累在其根部.

有研究表明植物在逆境胁迫下,会打破植物体内原有的代谢平衡,引起氧化胁迫,出现细胞膜损伤,破坏叶绿体结构,进而影响植物的生长发育,最终影响农产品的品质^[16]. 植株 Cd 中毒后首先受胁迫的便是抗氧化还原系统,导致抗氧化酶活性受到抑制, H_2O_2 过量积累,膜脂过氧化水平增高,致使细胞受到损伤甚至死亡. Pan 等^[17]将 *PprI* 该基因转入大肠杆菌和油菜中,结果显示,在高浓度盐胁迫下,大肠杆菌中与氧化应激相关的蛋白过氧化氢酶 HPII(KatE)和色氨酸阻遏结合蛋白(WrbA)的活性显著增强,油菜中编码 Mn-SOD 的基因也显

著上调,推测 *PprI* 可能直接或间接参与了抗逆蛋白的表达调控,从而提高了大肠杆菌和油菜的抗逆能力. 本实验研究了 *PprI* 转基因油菜和非转基因油菜在 Cd 胁迫下的氧化应答,结果表明, SOD 活性随着镉浓度的增加呈先增后降的趋势. 在植物抗氧化防御系统中, SOD 能够清除逆境胁迫产生的活性氧(ROS),降低 ROS 对植物的损伤,其活性高低可以反映植物受胁迫的程度. 该研究中低浓度 Cd 胁迫产生的活性氧刺激植物的抗氧化系统,使得 SOD 活性增加. 然而随着 Cd 处理浓度的增加,植物受胁迫程度加深,产生大量 ROS 破坏了酶的结构,因而 SOD 活性降低. 与非转基因油菜相比,转基因油菜的 SOD 活性较高,可能是油菜中 *PprI* 基因参与抗氧化调节的结果. MDA 是重金属胁迫导致细胞膜脂过氧化的产物,是衡量膜脂过氧化水平的一个指标. 结果表明,MDA 含量随 Cd 处理浓度的增加而增多,说明两种基因型油菜的细胞膜都受到了一定程度的损伤,但是转基因油菜的 MDA 含量略低于非转基因油菜的含量,推测是转基因油菜抗氧化酶活性更高导致的. 与此同时,在 Cd 胁迫下参与细胞光合作用的叶绿素 a 和叶绿素 b 也产生了相应的响应,二者均随 Cd 处理水平的升高而呈显著下降趋势. 综上所述可以看出,镉胁迫会引起植物体的抗氧化应激,对植株起一定的保护作用,但浓度过高可能会对植物造成巨大的不可逆的损伤. 同非转基因油菜相比,转 *PprI* 油菜的抗氧化性更强.

在重金属胁迫条件下,植物可通过根系形态和生理生化的适应性变化机制来调节自身活化和吸收元素的强度^[18]. 本研究中转基因油菜对 Cd 吸收富集能力低于非转基因油菜,且抗氧化性较强. 这种差异性显示了转 *PprI* 油菜对重金属污染的较高抗性,降低了油菜对 Cd 的吸收,有利于植株健康生长的同时又提高了其可食部分安全性. 研究结果为进一步阐明 *PprI* 基因参与重金属胁迫机理奠定了基础,同时为重金属污染区农副产品的安全生产提供科学依据.

参考文献:

- [1] Cunha K P V, Nascimento C W A, Pimentel R M, et al. Cellular localization of cadmium and structural changes in maize plants grown on a cadmium contaminated soil with and without liming[J]. J Hazard Mater, 2008, 160(1): 228.

- [2] 应兴华, 金连登, 徐霞, 等. 我国稻米质量安全现状及发展对策研究[J]. 农产品质量与安全. 2010(06): 40.
- [3] Peralta-Videa J R, Lopez M L, Narayan M, *et al.* The biochemistry of environmental heavy metal uptake by plants: Implications for the food chain[J]. *Int J Biochem Cell Biol*, 2009, 41(8-9): 1665.
- [4] Bertin G, Averbeck D. Cadmium: cellular effects, modifications of biomolecules, modulation of DNA repair and genotoxic consequences (a review)[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1549.
- [5] 冯德玉, 崔广艳, 鲜先毅, 等. ^{133}Cs 胁迫对转 *IrrE* 油菜生理活性的影响[J]. 绵阳师范学院学报. 2014, (02): 69.
- [6] 冯德玉, 代其林, 崔广艳, 等. 转 *pprI* 基因油菜对 ^{133}Cs 或 ^{88}Sr 胁迫的响应[J]. 核农学报. 2014(7): 1298.
- [7] Wang J, Guo C, Dai Q, *et al.* Salt tolerance conferred by expression of a global regulator *IrrE* from *Deinococcus radiodurans* in oilseed rape [J]. *Mol Breeding*, 2016, 36: 88.
- [8] 李晓丽. 重金属镉超富集植物油菜毛状根转基因诱导[J]. 北京农业. 2015(12): 20.
- [9] 苏德纯, 黄焕忠. 油菜作为超累积植物修复镉污染土壤的潜力[J]. 中国环境科学. 2002(01): 49.
- [10] 刘燕, 高喜明, 彭钟山, 等. Cd 胁迫对甘蓝型油菜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 种子, 2007, (09): 60.
- [11] Zhou W, Leul M. Uniconazole-induced tolerance of rape plants to heat stress in relation to changes in hormonal levels, enzyme activities and lipid peroxidation[J]. *Plant Growth Regulation*, 1999, 27(2): 99-104.
- [12] 徐芬芬, 叶利民, 徐卫红, 等. 小白菜叶绿素含量的测定方法比较[J]. 北方园艺. 2010(23): 32.
- [13] Fu X, Dou C, Chen Y, *et al.* Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in *Phytolacca americana* L [J]. *J Hazard Mater*, 2011, 186(1): 103.
- [14] Wójcik M, Tukiendorf A. Cadmium uptake, localization and detoxification in *Zea mays*[J]. *Biol Plant*, 2005, 49(2): 237.
- [15] Srivastava R, Pandey P, Rajpoot R, *et al.* Cadmium and lead interactive effects on oxidative stress and antioxidative responses in rice seedlings [J]. *Protoplasma*, 2014, 251(5): 1047.
- [16] Clemens S. Toxic metal accumulation, responses to exposure and mechanisms of tolerance in plants[J]. *Biochimie*, 2006, 88(11): 1707.
- [17] Pan J, Wang J, Zhou Z, *et al.* *IrrE*, a global regulator of extreme radiation resistance in *Deinococcus radiodurans*, enhances salt tolerance in *Escherichia coli* and *Brassica napus*[J]. *PLoS One*, 2009, 4(2): e4422.
- [18] 常学秀, 施晓东. 土壤重金属污染与食品安全[J]. 环境科学导刊, 2001, z1: 21.