

镉胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响

王耀晶^{1,2}, 付田霞¹, 苏 璞¹, 刘鸣达^{2*}

(1.沈阳农业大学理学院, 沈阳 110866; 2.沈阳农业大学土地与环境学院, 沈阳 110866)

摘 要:在中和硅酸钾的碱性和消除钾离子影响的基础上,通过水培试验研究了镉胁迫下硅对草莓生长及生理特性的影响。结果表明:供硅可减轻镉对草莓叶片的伤害,提高镉胁迫下植株的相对生长速率和根冠比,增加植株生物量;硅能提高光合色素含量,降低镉胁迫下草莓叶片和根系的质膜透性,使叶片丙二醛含量减少,减轻膜脂过氧化程度;适量浓度的硅可使游离脯氨酸和可溶性糖含量保持在一定水平,保证植株在镉胁迫条件下对水分的吸收和利用;镉胁迫下,草莓叶片 SOD、POD、CAT 活性降低,供硅可提高 SOD、POD、CAT 活性,减轻活性氧及自由基对草莓叶片的毒害。上述结果说明,供硅改善了草莓逆境生理状况,缓解了镉的毒害作用,促进了草莓的生长发育。

关键词:硅;草莓;生理特性;镉胁迫

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)12-2335-05

Effects of Silicon on Growth and Physiological Characteristics of Strawberry (*Fragaria ananassa* Duch.) Under Cadmium Stress

WANG Yao-jing^{1,2} FU Tian-xia¹, SU Ying¹, LIU Ming-da^{2*}

(1.College of Science, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China; 2.College of Land and Environmental Sciences, Shenyang Agricultural University, Shenyang 110866, China)

Abstract: The water culture experiment of strawberry growth and physiology at different silicon levels under cadmium stress was conducted, and the H_2SO_4 was used to neutralize the alkalinity of K_2SiO_3 , and the different concentration of SO_4^{2-} and K^+ between treatments was balanced with the addition of K_2SO_4 , thus the effect of pH and accompanying ions by added silicate on cadmium was eliminated. The results showed that silicon supplying relieved injury on strawberry and promoted its plant biomass under cadmium stress. Silicon could increase the content of photosynthetic pigments, lower leaves permeability of plasma membrane, decrease the content of MDA and alleviate the grade of membrane lipid peroxide. The effects of silicon also maintained the content of free proline and soluble sugar in certain level, promoted the activity of SOD, POD and CAT, relieved the poisoning effects of active oxygen and free-radicals to strawberry leaves. These results suggested that silicon supplying could improve physiological characteristics of strawberry and promote the growing of strawberry by alleviating the toxicity of cadmium.

Keywords: silicon; strawberry; physiological characteristics; cadmium stress

镉(Cd)是土壤中普遍存在的一类有毒重金属元素,它能在植物体中积累,并通过食物链富集到人体和动物体中。由于人类寿命较长,长期食用被镉污染的食物会使其持续蓄积于体内,所以镉对人的毒性远高于动物^[1]。20 世纪 60 年代日本富山县神通川流域

因土壤镉污染出现了“痛痛病”后,镉污染问题开始引起全世界的关注。研究表明,镉对植物具有很强的毒害作用,它通过伤害光合作用、呼吸作用和营养代谢等强烈抑制植物生长,甚至导致植物死亡^[2-3]。我国农田镉污染面积已达 2 万 hm^2 ,每年生产的镉含量超标的农产品达 14.6×10^8 kg^[4]。因此,开展土壤及植物镉污染防治研究十分必要。

尽管至今未能证明硅是植物的必需元素,但硅提高作物抗逆性的研究已经引起国内外学者的关注。研究表明,供硅能有效地缓解镉胁迫对作物的伤害,提

收稿日期:2012-07-06

作者简介:王耀晶(1972—),女,内蒙古呼伦贝尔人,博士,副教授,从事土壤与植物营养和环境化学等方面的研究。

E-mail:wyjsau@163.com

* 通信作者:刘鸣达 E-mail:mdsauoil@163.com

高作物的生物学产量,改善作物的生理生化指标^[5-8]。但多数研究直接使用硅酸盐会使介质 pH 有不同程度提高,进而使镉的有效性降低;同时,上述试验还引入了相应的伴随离子,现已发现钙、镁、钾、钠等元素均能抑制植物对镉的吸收或转运^[9]。所以,未消除因硅酸盐改变土壤 pH 和引入伴随离子影响的试验结果未必能反映硅对镉的真正影响。草莓植株对重金属毒害敏感,但关于供硅对草莓镉胁迫条件下逆境生理特性影响的研究尚少。本试验在调节 pH 和消除陪伴离子影响的基础上,采用水培法研究外源硅对镉胁迫下的草莓生长及相关生理特性的影响,并探讨供硅缓解镉胁迫的作用机理,以期对草莓的安全生产提供参考。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为草莓(*Fragaria ananassa* Duch.),品种为幸香,由沈阳农业大学园艺学院草莓园提供。配制水培营养液的试剂和所选用的镉(CdSO_4)为分析纯试剂,使用的硅酸钾(K_2SiO_3)为化学纯试剂。

1.2 试验处理

试验只设 1 个镉浓度,为 $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (D),不同硅浓度下各设 4 个处理,分别为 $\text{Si0}:0.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (SiO_2); $\text{Si1}:0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (SiO_2); $\text{Si2}:1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (SiO_2)和 $\text{Si3}:1.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ (SiO_2)。另设 CK 处理(即无镉无硅处理)。以上共 5 个处理,其序号依次为:CK,DSi0,DSi1,DSi2,DSi3。

水培试验在沈阳农业大学保持通风的实验温室里进行,处理液为 Hoagland 营养液,各处理中加入 CdSO_4 和不同剂量的 K_2SiO_3 。 K_2SiO_3 的碱性用 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 H_2SO_4 中和,各处理间硫和钾的差异以 K_2SO_4 补齐。选取 $10 \text{ cm} \times 6.5 \text{ cm} \times 5 \text{ cm}$ 的塑料盆,每盆加入 300 mL 营养液,以打有孔洞的塑料薄膜为漂浮载体,将 5 株长势均匀的草莓苗移栽至载体的孔中进行水培,每处理设 10 次重复。处理后每隔 2 d 更换一次营养液,试验第 10 d 取样测定各项生理指标。

1.3 测定方法

1.3.1 相对生长速率(RGR)的测定

参照韩晓日等^[10]的方法。在处理后第一周和第二周分别取 10 株植株,剪取地上部和地下部,70 °C 烘干至恒重,分别称重。 W_1 表示第一周地上部植株干重, W_2 表示第二周地上部植株干重,相对生长速率按下式计算: $RGR=(W_2-W_1)/(T_2-T_1)$ 。

式中: T_2 和 T_1 分别表示两次测定的时间。

1.3.2 草莓植株生物量和根冠比的测定

逆境胁迫处理第 15 d,将整株植株从培养盆中取出,先用自来水快速冲洗干净,再用蒸馏水迅速将植株冲洗三次,用滤纸吸干表面水分,分成地上部和地下部,立即称取植株地上部鲜重和地下部鲜重,植株地上部和地下部鲜重之和为生物量,地下部和地上部鲜重的比值即为根冠比。

1.3.3 生理指标的测定

叶绿素采用丙酮法测定;细胞质膜透性采用电导法测定,以煮前和煮后两次电导的比值即相对电导率来表示;游离脯氨酸采用酸性茚三酮法测定;可溶性糖采用蒽酮法测定^[11]。SOD 采用 NBT 还原法,以抑制 NBT 光化还原 50% 的酶为一个酶活力单位;POD 采用愈创木酚法,以 5 min 内平均每分钟 OD_{470} 变化值表示酶活力单位;CAT 采用滴定法,酶活力大小以每克鲜重每分钟分解的 H_2O_2 的量表示;MDA 采用硫代巴比妥酸(TBA)法测定^[12]。

1.4 统计分析方法

应用 Excel 2003 和 SAS 软件对试验数据进行统计分析,用 Duncan 检验进行显著性分析($\alpha=0.05$)。

2 结果与分析

2.1 镉胁迫下各处理草莓植株的受害情况及供硅对镉胁迫下草莓植株生长的影响

图 1 是试验处理至第 8 d,各处理草莓植株的受害情况,可以看出,镉对叶片的毒害首先从叶柄处开始,逐渐扩展至整叶。镉中毒的草莓叶脉间和叶尖失绿,叶片卷曲。供硅后草莓叶片镉中毒症状减轻,DSi1



图 1 $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CdSO_4 胁迫下各处理的伤害情况
Figure 1 Effects of damage on all treatments under $0.02 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ CdSO_4 stress

和 DSi2 处理在镉胁迫条件下叶尖失绿和叶片卷曲现象不明显。

镉胁迫抑制了草莓植株生长,DSi0 处理相对生长速率低于对照和各供硅处理(如表 1 所示);供硅提高了镉胁迫下植株的相对生长速率,供硅处理的相对生长速率高于 DSi0 处理但低于对照处理。各供硅处理的地上部相对生长速率分别比 DSi0 处理增加 25.85%、36.75%和 14.65%。

由表 1 可知,镉胁迫条件下,植株根冠比降低,供硅后根冠比有所提高。各供硅处理根冠比分别比 DSi0 处理提高 19.35%、12.90%和 16.13%。镉胁迫下植株根冠比减小,说明植株地下部比地上部对镉敏感性更强,因此抑制了地上部和地下部的干物质积累,并影响干物质的分配比例,供硅后可缓解这种抑制作用,改善干物质的分配比例。镉胁迫下,DSi0 处理生物量(鲜重)低于对照和各供硅处理,各供硅处理的生物量高于 DSi0 处理但低于对照处理,各供硅处理的生物量分别比 DSi0 处理增加 21.25%、17.95%和 15.38%。

表 1 镉胁迫下硅对草莓植株生长的影响
Table 1 Effects of silicon on growth of strawberry under cadmium stress

处理	相对生长速度	根冠比	生物量/g·株 ⁻¹
CK	0.33±0.02a	0.34±0.02a	3.48±0.29a
DSi0	0.20±0.01b	0.31±0.01b	2.43±0.17b
DSi1	0.25±0.03a	0.37±0.02a	3.31±0.26a
DSi2	0.27±0.02a	0.36±0.02a	3.22±0.23a
DSi3	0.23±0.01a	0.35±0.02a	3.15±0.15a

注:同列不同字母表示在 $P<0.05$ 水平上差异显著。下同。
Note:The same column with different letters mean significant difference among treatments at $P<0.05$. The same as below.

2.2 镉胁迫下硅对草莓叶片光合色素含量的影响

光合色素是判断植物光合生理能力、反映环境胁迫状况的重要指标。其中,叶绿素是绿色植物进行光作用的主要色素,叶绿素含量的变化,既可直接反映植物叶片光合作用功能的强弱,也可用以表征逆境胁迫下植物组织、器官的损害程度和衰老状况^[13]。由表 2 可知,镉胁迫条件下,DSi0 处理叶片 Chl.a、Chl.b、Chl.a+ Chl.b 含量低于对照和各供硅处理,供硅可提高 Chl.a、Chl.b、Chl.a+ Chl.b 含量。各供硅处理 Chl.a+ Chl.b 含量分别比 DSi0 处理增加 19.08%、17.76%和 13.82%。另外,供硅可提高 Chl.a/b 的比值,说明硅能增加 Chl.a 在叶绿素总量中的比例。

表 2 镉胁迫下硅对草莓叶片光合色素含量的影响
Table 2 Effects of silicon on photosynthetic pigment content of strawberry leaf under cadmium stress

处理	叶绿素 a/ mg·g ⁻¹	叶绿素 b/ mg·g ⁻¹	叶绿素 a+b/ mg·g ⁻¹	叶绿素 a/ 叶绿素 b
CK	1.42±0.24a	0.41±0.05a	1.83±0.23a	3.46±0.12a
DSi0	1.15±0.12b	0.37±0.02b	1.52±0.15b	3.11±0.06b
DSi1	1.38±0.20a	0.43±0.03a	1.81±0.11a	3.21±0.08a
DSi2	1.37±0.15a	0.42±0.02a	1.79±0.08a	3.26±0.07a
DSi3	1.33±0.11a	0.40±0.02a	1.73±0.02a	3.33±0.05a

2.3 镉胁迫下硅对膜伤害的影响

逆境条件下植物受到的伤害是多方面的,其中非常重要是对细胞膜的伤害。可以用电解质相对电导率的数值来判断植物受到逆境伤害程度和细胞膜的稳定性。丙二醛是膜脂过氧化分解的产物,其含量的高低是反映膜脂过氧化作用强弱和质膜破坏程度的重要指标^[11]。

由表 3 可知,镉胁迫条件下,根与叶片的质膜透性有相同的变化趋势,即 DSi0 处理的相对电导率大于对照和各供硅处理,供硅可以降低镉胁迫下根和叶片的质膜透性,各供硅处理的相对电导率大于对照处理但低于 DSi0 处理。另外,根组织电导率大于叶片组织电导率。各供硅处理叶片相对电导率分别比 DSi0 处理降低 16.44%、20.57%和 11.06%,根系相对电导率降低 19.33%、30.83%和 14.17%。镉胁迫下,DSi0 处理丙二醛含量高于对照和各供硅处理,供硅后能够降低丙二醛的含量,各供硅处理丙二醛含量高于对照但低于 DSi0 处理。各供硅处理丙二醛含量比 DSi0 处理分别降低 19.39%、28.60%和 15.14%。

2.4 镉胁迫下硅对草莓叶片渗透调节物质的影响

游离脯氨酸和可溶性糖是植物体内重要的有机渗透调节物质。在逆境胁迫条件下,其含量的增加可

表 3 镉胁迫下硅对草莓叶片和根系质膜透性及丙二醛含量的影响

Table 3 Effects of silicon on strawberry leaves and root plasma membrane permeability and malondialdehyde content under cadmium stress

处理	叶片质膜透性/%	根系质膜透性/%	丙二醛含量/ nmol·g ⁻¹ FW
CK	44.27±4.32c	53.56±3.72c	42.36±3.92c
DSi0	60.58±3.81a	82.58±4.91a	69.15±5.53a
DSi1	50.62±5.28b	66.62±5.58b	55.74±2.89b
DSi2	48.12±3.51b	57.12±3.76c	49.37±2.91c
DSi3	53.88±4.81b	70.88±4.92b	58.68±3.41b

提高逆境条件下植物细胞汁液浓度、降低细胞水势,增强植株吸水功能,提高植株对逆境胁迫的抵抗能力^[14]。由表 4 可知,镉胁迫条件下游离脯氨酸大量积累,DSi0 处理游离脯氨酸含量比对照增加 3.97 倍;供硅后降低了游离脯氨酸的含量,各供硅处理游离脯氨酸含量分别比对照增加了 1.69、0.97 倍和 2.31 倍。镉胁迫下可溶性糖含量增加,供硅可降低可溶性糖含量。DSi0 处理和各供硅处理可溶性糖含量分别比对照处理增加了 0.44、0.28、0.18 倍和 0.22 倍。

表 4 镉胁迫下硅对草莓叶片渗透调节物质含量的影响
Table 4 Effects of silicon on osmotic adjustment substances content of strawberry leaf under cadmium stress

处理	游离脯氨酸含量/mg·g ⁻¹ FW	可溶性糖含量/mg·g ⁻¹ FW
CK	0.32±0.08c	5.54±0.38c
DSi0	1.59±0.14a	7.98±0.52a
DSi1	0.86±0.10b	7.08±0.42a
DSi2	0.63±0.05c	6.51±0.47b
DSi3	1.06±0.07b	6.75±0.35b

2.5 镉胁迫下硅对草莓叶片活性氧清除系统的影响

当植物遇到不良环境时其代谢过程就会产生自由基破坏细胞膜,作为植物自身的保护酶系统的重要组成部分,SOD、POD、CAT 能清除自由基^[15]。由表 5 可知,镉胁迫条件下,DSi0 处理 SOD、POD 和 CAT 活性降低,其含量低于对照和各供硅处理,供硅后可提高 SOD、POD 和 CAT 活性。镉胁迫条件下,各供硅处理 SOD 活性分别比 DSi0 处理提高 64.40%、51.60%和 32.85%;POD 活性提高 43.41%、39.78%和 16.08%;CAT 活性提高 32.43%、22.95%和 14.81%。

3 讨论

3.1 硅提高草莓植株的抗镉胁迫能力

镉是毒性最强的重金属之一,当植物组织中镉

(Cd)含量达 10⁻⁶ mg·kg⁻¹ 水平时,植物就会受害甚至减产^[16]。在 0.02 mmol·L⁻¹ 镉溶液中培养 8 d 后草莓幼苗出现明显的镉毒害症状,镉中毒的草莓叶脉间和叶尖失绿,叶片卷曲。在镉溶液中添加 0.5~1.5 mmol·L⁻¹ 的 K₂SiO₃(以 SiO₂ 计)后,硅对提高草莓植株抗镉胁迫作用明显,草莓幼苗镉中毒的症状得到改善,植株生物量增加。这与史新慧等研究结果类似,即硅酸钾预处理可减轻镉对水稻的毒害^[17]。

3.2 硅提高草莓植株的抗镉胁迫机理

Cd²⁺会对植物产生伤害,强烈抑制细胞和整个植株生长,影响叶绿素合成及光合机构,引起叶绿素总量下降,导致植物失绿^[18-19],因此叶绿素含量的变化能反映镉胁迫对植物的伤害程度^[20]。本试验结果表明,0.02 mmol·L⁻¹ 镉胁迫下草莓叶片叶绿素 a 和叶绿素 b 显著降低,供硅后含量都有所提高(表 2)。说明硅对镉胁迫下草莓幼苗叶绿体有保护作用,这可能也是提高镉胁迫下光合速率的另一个重要因素^[21]。

镉可结合酶活性中心或蛋白巯基,取代蛋白反应中心的必需金属钙、铁、锌,释放自由离子,诱发氧化胁迫引起膜脂的过氧化^[22],并由此产生丙二醛,破坏膜系统的结构和功能。逆境胁迫下,植物会合成一些小分子有机物质以增强其渗透调节能力,游离脯氨酸和可溶性糖就是植物体内有效的渗透调节物质。镉胁迫下,草莓叶片和根系的质膜透性增加,叶片丙二醛含量增加,供硅可以降低镉胁迫下根和叶片的质膜透性和丙二醛的含量;各供硅处理的游离脯氨酸和可溶性糖含量高于对照但低于 0.02 mmol·L⁻¹ CdSO₄ 处理,表明供硅使叶片中游离脯氨酸和可溶性糖的含量保持在一定水平,使其既可维持镉胁迫条件下的渗透调节能力,又可避免其大量积累而对作物产生毒害。

研究发现,高浓度镉则会明显抑制抗氧化酶活性,加剧活性氧的释放,导致植物生长严重受抑^[23-24]。这说明镉促进活性氧的增加是其损害植物体的重要原因。在本试验中,草莓受到镉胁迫后,SOD、POD 和 CAT 活性明显受到抑制,说明镉能使草莓的抗氧化酶系统遭到破坏,导致活性氧代谢失调;供硅提高了镉胁迫下植株叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性,抑制了自由基的积累,从而增强植株的抗镉胁迫能力,这与陈翠芳等的研究结果类似^[25]。

4 结论

在调节 pH 和消除陪伴离子影响的基础上,供硅可调节植物体内的生理过程,抑制植物体内自由基的

表 5 镉胁迫下硅对草莓叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响
Table 5 Effects of silicon on SOD、POD and CAT activity of strawberry leaf under cadmium stress

处理	超氧化物歧化酶活性/U·g ⁻¹ FW	过氧化物酶活性/U·g ⁻¹ FW	过氧化氢酶活性/U·g ⁻¹ FW
CK	140.78±6.29a	145.85±8.37b	80.12±5.32a
DSi0	96.52±5.88c	118.27±9.34c	71.91±4.56b
DSi1	155.78±7.76a	169.61±10.11a	95.23±4.23a
DSi2	146.32±6.71a	165.32±7.45a	88.41±5.11a
DSi3	128.23±5.11b	137.29±8.43b	82.56±3.78a

产生,提高酶促防御系统的防护能力,降低膜的过氧化程度并稳定质膜的透性,进而有效地缓解镉对草莓的毒害,促进草莓生长并提高其生物量。

参考文献:

- [1] Tudoreanu L, Phillips C J C. Modeling cadmium uptake and accumulation in plants[J]. *Advances in Agronomy*, 2004, 84: 121-157.
- [2] Sanitadi T L, Gabbrielli R. Response to cadmium in higher plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 1999, 41: 105-130.
- [3] Foy C D, Chaney R I, White M C. The physiology of metal toxicity in plants[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1978, 29: 511-516.
- [4] 赵步洪, 张洪熙, 奚岭林, 等. 杂交水稻不同器官镉浓度与累积量[J]. 中国水稻科学, 2006, 20(3): 306-312.
ZHAO Bu-hong, ZHANG hong-xi, XI ling-lin, et al. Concentrations and accumulation of cadmium in different organs of hybrid rice[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2006, 20(3): 306-312.
- [5] Liang Y C, Wong J W C, Wei L. Silicon-mediated enhancement of cadmium tolerance in maize (*Zea mays* L.) grown in cadmium contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2005, 58(4): 475-483.
- [6] Liu C P, Li F B, Luo C L, et al. Foliar application of two silica sols reduced cadmium accumulation in rice grains[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2009, 161(2-3): 1466-1472.
- [7] Waldemar T, Grzegorz C. Effect of silicon application on cadmium uptake and distribution in strawberry plants grown on contaminated soils [J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2005, 28(6): 917-929.
- [8] Shi X H, Zhang C C, Wang H, et al. Effect of Si on the distribution of Cd in rice seedlings[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272(1-2): 53-60.
- [9] 周 卫, 汪 洪, 李春花, 等. 添加碳酸钙对土壤中镉形态转化与玉米叶片镉组分的影响[J]. 土壤学报, 2001, 38(2): 219-225.
ZHOU Wei, WANG Hong, LI Chun-hua, et al. Effect of calcium carbonate addition on transformation of cadmium species in soil and cadmium forms in leaves of maize[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2001, 38(2): 219-225.
- [10] 韩晓日, 侯玉慧, 姜琳琳, 等. 硅对盐胁迫下黄瓜幼苗生长和矿质元素吸收的影响[J]. 土壤通报, 2006, 37(6): 1162-1165.
HAN Xiao-ri, HOU Yu-hui, JIANG Lin-lin, et al. Effects of silicon on cucumber seedling growth and plant nutrition under salt stress[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2006, 37(6): 1162-1165.
- [11] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.
LI He-sheng. The principle and technology of plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000.
- [12] 张志良, 瞿伟菁. 植物生理学实验指导[M]. 第3版. 北京: 高等教育出版社, 2003.
ZHANG Zhi-liang, QU Wei-jing. The experimental guide for plant physiology[M]. Third edition. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [13] Cutraro J, Goldstein N. Cleaning up contaminants with plants[J]. *Bio-cycle*, 2005, 46: 30-32.
- [14] 翟凤林, 曹鸣庆. 植物的耐盐性及其改良[M]. 北京: 农业出版社, 1989.
ZHAI Feng-lin, CAO Ming-qing. Plant salt tolerance and its improvement[M]. Beijing: Agricultural Publishing Press, 1989.
- [15] Fridovich I. The superoxide radical is an agent of oxygen toxicity superoxide dismutases provide an important defence[J]. *Science*, 1978, 201: 875-880.
- [16] 夏汉平. 土壤-植物系统中的镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, 3(3): 289-298.
XIA Han-ping. Study on cadmium in soil-plant system[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 1997, 3(3): 289-298.
- [17] 史新慧, 王 贺, 张福锁. 硅提高水稻抗镉毒害机制的研究[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1112-1116.
SHI Xin-hui, WANG He, ZHANG Fu-suo. Cadmium resistance improved by silicon and corresponding mechanisms in *Oryza sativa* L. seedlings[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2006, 25(5): 1112-1116.
- [18] 苏 玲, 章永松, 林咸永, 等. 维管植物的镉毒和耐性机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(1): 106-112.
SU Ling, ZHANG Yong-song, LIN Xian-yong, et al. Cadmium toxicity and tolerance in vascular plants[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2000, 6(1): 106-112.
- [19] Padmaja K, Prasad D D K, Prasad A R K. Inhibition of chlorophyll synthesis in *Phaseolus vulgaris* L. seedlings by cadmium acetate[J]. *Photosynthetic*, 1990, 24: 399-405.
- [20] Milone M T, Sgherri C, Clijsters H, et al. Antioxidative responses of wheat treated with realistic concentration of cadmium[J]. *Environment and Experimental Botany*, 2003, 50: 265-276.
- [21] 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.
- [22] Stohs S J, Bagchi D. Oxidative mechanisms in the toxicity of metal ions [J]. *Free Radical Biology and Medicine*, 1995, 18(2): 321-336.
- [23] Sandalio L M, Dalurzo H C, Gomez M, et al. Cadmium-induced changes in the growth and oxidative metabolism of pea plants[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2001, 52(364): 2115-2126.
- [24] Shah K, Kumar R G, Verma S, et al. Effect of cadmium on lipid peroxidation, superoxide anion generation and activities of antioxidant enzymes in growing rice seedlings[J]. *Plant Science*, 2001, 161(6): 1135-1144.
- [25] 陈翠芳, 钟继洪, 李淑仪. 硅对受土壤中镉污染的白菜生长和抗胁迫能力的影响[J]. 植物生理学通讯, 2007, 43(3): 479-482.
CHEN Cui-fang, ZHONG Ji-hong, LI Shu-yi. Effect of silicon on growth and anti-stress ability of chinese cabbage (*Brassica pekinensis* Rupr.) in cadmium contaminated soil[J]. *Plant Physiology Communications*, 2007, 43(3): 479-482.