

# 草莓对镉的吸收积累特性及调控研究

张金彪<sup>1</sup> 黄维南<sup>3</sup> 柯玉琴<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 福建农林大学测试中心, 福州 350002; <sup>2</sup> 福建农林大学生命科学学院, 福州 350002; <sup>3</sup> 福建亚热带植物研究所, 厦门 361006)

**摘 要:** 在草莓体内, 镉 (Cd) 按照富集系数根 > 茎 > 叶 > 果的规律分布; 在营养液中, 草莓对镉的吸收量随时间的延长而增加, 草莓对镉的吸收速率在 40 min 时达到高峰, 随后逐渐降低。水培试验表明, 钙、磷能够降低草莓对镉的吸收; 土培试验表明,  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  均能降低镉在草莓果实中的积累, 这种降低与土壤酸度的降低有关,  $\text{CaCO}_3$  对降低草莓果实镉的积累更为明显, 这种降低可能还与钙对镉的拮抗有关。土壤中添加  $\text{CaCO}_3$  是一种切实可行的降低草莓果镉积累的措施。

**关键词:** 草莓; 镉 (Cd); 积累

**中图分类号:** S 668.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2003) 05-0514-05

镉是一种稀有分散元素, 未污染土壤中镉主要来源于其成土的母质, 中国土壤的背景值为 0.097 mg/kg; 在天然水中, 镉的含量为 0.01 ~ 3  $\mu\text{g/L}$ <sup>[1]</sup>, 在大多数植物中, 镉含量在 0 ~ 1.2 mg/kg 之间。目前我国受镉、砷、铬、铅等重金属污染的耕地面积近 2000 万  $\text{hm}^2$ , 约占总耕地面积的 1/5, 镉 (Cd) 污染问题日益严重<sup>[2~5]</sup>。我国 11 个灌区遭受镉污染的农田有 12,000  $\text{hm}^2$ <sup>[1]</sup>, 镉是危害植物生长发育最终危害人体健康的有毒重金属元素之一。土壤重金属污染对草莓所引起的问题未受到足够的重视。据研究, 不同含量的镉对草莓的生长及一些生理指标都有不同程度的影响<sup>[6]</sup>。另据报道, 草莓容易吸收土壤中的镉并积累<sup>[7]</sup>, 镉在草莓果实中的积累则直接危害到人们的身体健康。作者通过盆栽与水培相结合的办法, 研究镉在草莓体内的积累规律、草莓对镉的吸收特性及相应的化学调控措施, 以期对草莓的无公害生产提供指导, 同时也将有助于土壤—植物系统中镉污染的深入研究。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

试验材料为草莓 (*Fragaria ananassa* Duch.) ‘丰香’品种, 由福州蔬菜研究所提供。本试验于 2000 年 10 月至次年 2 月在福建农林大学进行。

### 1.2 试验方法

1.2.1 镉在草莓中的积累研究 把丰香苗定植于 25 cm × 30 cm 的圆筒塑料盆中。土壤取自福建农林大学试验田, 土壤本底含镉量 0.021 mg/kg, pH 4.55, 速效钾 125.9 mg/kg, 有效磷 22.91 mg/kg, 水解性氮 148.5 mg/kg, 按土 砂 = 3 1 的比例配制, 并添加硫酸镉, 拌匀、装盆。镉的用量分别为 0、2.5、5、10、25、50 和 100 mg/kg, 每处理 4 次重复, 共处理 125 d。收集根、茎、叶及果, 测定镉含量, 并计算草莓各器官相对于土壤含镉量的百分率 (即富集系数)。

1.2.2 草莓对镉的吸收量与培养时间的关系 用 400 mL 山崎营养液培养草莓植株, 镉浓度为 2 mg/L, 每小时取 2 mL 营养液测定其中镉含量, 计算草莓对镉的吸收量, 共 10 h, 重复 3 次。

1.2.3 培养时间对草莓吸收镉速率的影响 试验 1: 营养液体积、镉浓度同 1.2.2, 每小时换 1 次营养液, 使镉含量保持 2 mg/L, 如此重复, 共 10 h, 计算 1 ~ 10 h 内的镉吸收速率变化。试验 2: 同试

收稿日期: 2002 - 10 - 15; 修回日期: 2003 - 01 - 21

基金项目: 福建省教委资助项目 (K99010)

验 1, 但每 10 min 更换镉含量 2 mg/L 的营养液, 测定 10~60 min 之间的吸收速率变化。

1.2.4 钙、磷对草莓吸收速率的影响 培养方法同 1.2.2, 设以下处理: Cd 2 mg/L, Cd 2 mg/L + Ca 0.5 mmol/L, Cd 2 mg/L + Ca 1.5 mmol/L, Cd 2 mg/L + P 0.25 mmol/L, Cd 2 mg/L + P 0.75 mmol/L, 6 h 后取出草莓苗, 补充去离子水至 400 mL (称重法), 测定试验前后营养液中镉的浓度变化, 计算草莓对镉的吸收速率, 每处理重复 3 次。Cd、Ca 和 P 分别以  $\text{CdSO}_4$ 、 $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$  和  $\text{NH}_4\text{HPO}_4$  的形态加入。

1.2.5 土壤中施  $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  对草莓吸收镉的影响 把草莓苗定植于 25 cm × 30 cm 的圆筒塑料盆中, 装盆方法同 1.2.1, 设 7 个处理, 分别为 CK、Cd、Cd + 0.2%  $\text{CaCO}_3$ 、Cd + 0.4%  $\text{CaCO}_3$ 、Cd + 0.8%  $\text{CaCO}_3$ 、Cd + 0.4%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 、Cd + 0.8%  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ , 镉浓度为 10 mg/kg, 每处理重复 4 次。

1.2.6 测定 土壤有效镉含量用  $\text{CaCl}_2$  0.05 mol/L 浸提, 原子吸收法测定。电位法<sup>[8]</sup>测定土壤 pH 值。

## 2 结果与分析

### 2.1 镉在草莓体内的分布

结果 (表 1) 表明, 草莓各器官中镉的含量依次为根 > 茎 > 叶 > 果。镉在根中的富集系数最大, 其次是茎和叶, 果中最低。就同一器官而言, 尽管草莓随土壤中镉浓度的增高其吸收镉的量也不断增大, 但富集系数却随着土壤中镉浓度的增大而降低, 相应地观察到随镉处理浓度增大, 根由长变短, 由白变褐, 直至变黑, 所以, 富集系数的降低应该是由草莓 (特别是根系) 受镉毒害后, 吸收能力下降的缘故。统计分析结果表明, 草莓各器官的镉含量与土壤镉的添加量之间的相关均达极显著水平, 表明镉在草莓中的积累与土壤中镉的浓度之间存在着明显的剂量效应。

表 1 镉在草莓中的分布  
Table 1 Distribution of Cd in strawberry

土壤镉含量 Cd content in soil (mg/kg)	镉含量 Cd content (mg/kg)				富集系数 Accumulation factor			
	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit	根 Root	茎 Stem	叶 Leaf	果 Fruit
2.5	86.17 ±0.71	43.17 ±0.53	2.42 ±0.13	0.158 ±0.016	34.47	17.23	0.968	0.0632
5.0	141.21 ±0.92	72.64 ±0.61	4.13 ±0.12	0.306 ±0.015	28.24	14.53	0.826	0.0612
10.0	254.37 ±2.11	128.98 ±1.98	8.17 ±0.22	0.532 ±0.026	25.43	12.89	0.817	0.0532
25.0	503.75 ±4.91	270.51 ±2.99	18.18 ±0.48	1.130 ±0.096	20.15	10.82	0.727	0.0452
50.0	870.79 ±6.81	501.57 ±13.11	32.59 ±0.45	1.983 ±0.088	17.42	10.03	0.652	0.0397
100.0	1494.10 ±13.7	823.24 ±25.91	54.68 ±2.53	2.721 ±0.118	14.94	8.23	0.547	0.0272

从镉在草莓不同叶位叶片中的分布 (图 1) 看, 上位叶 (新叶) 含量最高, 下位叶 (老叶) 最低, 中位叶 (成熟叶) 居中。下位叶中镉含量最低是否为下位叶积累的镉向中位叶或上位叶输送而引起的, 有待证实。从每条根镉由基部到根尖的分布 (图 2) 看, 镉的平均含量依次是根尖 > 根中 > 根基部 (把每条根平均分成以上 3 段)。表明镉在草莓根中的分布也呈递度变化, 即从根尖向上积累递减, 这种效应可能与镉的运输形态有关。镉可能呈离子态或以阳离子化合物形式被运输, 而草莓的木质部可以看成是一个阳离子交换柱, 镉在运输过程中被吸附而在木质部汁液中的镉含量逐步降低。

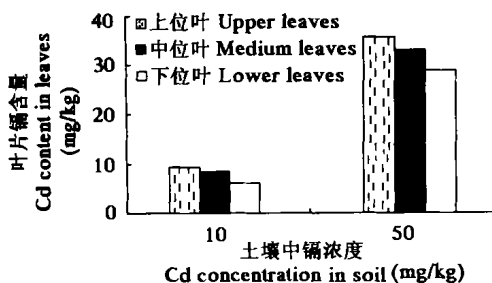


图 1 不同叶龄叶中的镉含量

Fig. 1 Cd content in leaves of different ages

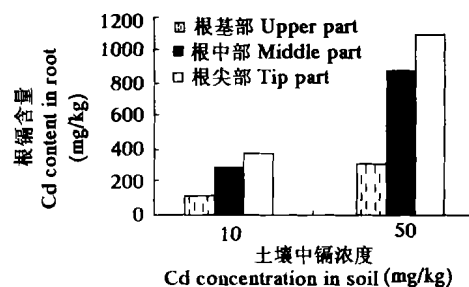


图 2 镉在草莓根部的分布

Fig. 2 Distribution of Cd in root of strawberry

## 2.2 草莓对镉的吸收特性

水培试验表明 (图 3), 草莓对镉的吸收量随时间延长而增加, 但增加的幅度随时间延长而减少, 在 6 h 之内, 草莓对含镉营养液中镉的吸收基本上已趋于饱和, 这种现象除了因外界镉浓度降低外, 可能与草莓中镉的含量增加有关。因此测定了在同样镉浓度 (2 mg/L) 下草莓对镉的吸收速率随时间变化的趋势, 结果表明 (图 4, a), 吸收速率是随时间延长而逐渐降低的, 在 6 h 后吸收速率已很小, 比 1 h 时降低了 77.36 %, 这说明, 在外界镉浓度一定时, 草莓中镉的积累也有一定限度, 换句话说, 草莓对镉吸收速率的降低与草莓体内镉的含量有关, 因为草莓体内镉含量增加, 就会减小与外界镉的浓度差, 使吸收速率下降。草莓对镉的吸收速率在 40 min 有一个高峰 (图 4, b), 在 40 min 内, 对镉的吸收速率缓慢升高, 之后由于体内已积累一定量的镉, 使根内外的镉浓度差变小, 吸收速率随时间下降。

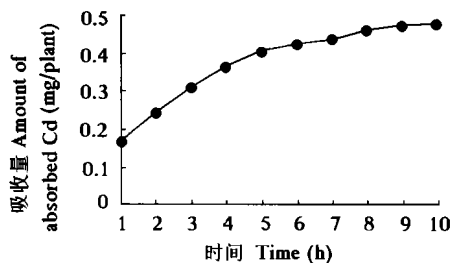


图 3 草莓对镉的吸收量与时间的关系

Fig. 3 Relationship between amount of absorbed Cd in strawberry and time

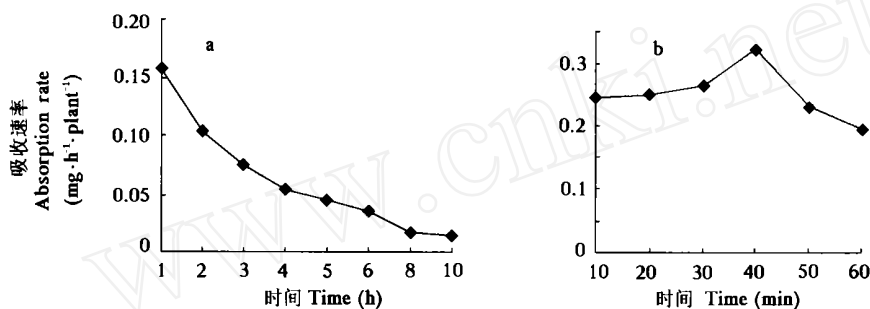


图 4 草莓对镉的吸收速率变化  
于含 Cd 2 mg/L 的营养液中

Fig. 4 Changes of Cd absorption rate of strawberry at different time  
In nutrient solution with Cd 2 mg/L

## 2.3 钙、磷对草莓吸收镉的影响

结果表明, 钙、磷均能降低草莓对镉的吸收。如表 2 所示, Ca 0.5 和 1.5 mmol/L 处理, 草莓对镉的吸收量降低了 10.42 % 和 44.79 %, 根中镉含量则分别降低了 7.77 % 和 44.50 %, 同时根中的 Ca 升高; P 0.25 和 0.75 mmol/L 处理, 草莓对镉的吸收量分别降低了 5.32 % 和 39.69 %, 同时根中磷的含量升高。这些结果表明钙和磷对镉在草莓中的积累有抑制作用, 其中钙对草莓吸收镉的影响比较大, 也表明钙和磷可用于调控草莓对镉的吸收。

## 2.4 施 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 对镉在草莓中的积累以及土壤 pH 值和土壤有效镉含量的影响

研究  $\text{CaCO}_3$  和  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  在土培条件下对降低草莓中特别是果中镉积累的影响, 结果 (表 3) 显示, 施  $\text{CaCO}_3$  能使镉在草莓根、叶和果中的积累减少, 当施  $\text{CaCO}_3$  0.8 % 时, 草莓根、叶、果中的含镉量分别降低了 55.35 %、84.32 % 和 86.85 %。施  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  也能使镉在草莓体内的积累降低, 但不如

表 2 钙和磷对草莓吸收镉的影响

Table 2 Effect of Ca and P on Cd uptake in strawberry

处理 Treatment			镉吸收量 Cd amount absorbed	根中含量 Content in root		
Cd (mg/L)	Ca (mmol/L)	P (mmol/L)	(mg/plant)	Cd (mg/kg)	Ca (%)	P (%)
2			0.451 aA	314.27 aA	0.369 cC	0.150 cB
2	0.5		0.404 bB	289.85 bB	0.513 bB	
2		0.25	0.427 bA	310.02 aA		0.168 bA
2		0.75	0.272 cB	264.03 bB		0.174 aA

$\text{CaCO}_3$  明显。另外,  $\text{CaCO}_3$  处理使土壤 pH 值升高, 升高的幅度随  $\text{CaCO}_3$  的加入量增加而加大, 同时, 土壤中有效镉的含量则随  $\text{CaCO}_3$  加入量的增大而减少, 说明  $\text{CaCO}_3$  降低草莓对镉的吸收量的一个重要原因, 就是降低土壤的酸度, 使土壤中镉的形态发生改变, 可溶态、交换态镉等有效成分的含量降低, 因而土壤有效镉含量下降。 $\text{CaCO}_3$  的加入, 也使土壤溶液中钙的含量升高, 钙对镉有拮抗作用, 这是土壤施用  $\text{CaCO}_3$  处理的另一效果。从表 4 中还可以看出, 施入  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  对土壤 pH 的升高和有效镉含量的降低幅度较小, 因而其降低镉在草莓中积累的效应也较不明显。

## 2.5 施 $\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 对草莓叶及果中其它元素含量的影响

土壤中施入  $\text{CaCO}_3$  或  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  均能够降低镉在草莓中的积累, 测定草莓中钾、钙、镁、磷和果中钙的含量 (表 4), 除草莓叶片中钾含量稍有升高外, 钙、镁、磷和果中钙含量均降低, 加  $\text{CaCO}_3$  处理后, 叶中钾、钙、镁、磷含量均有升高, 且超过对照, 说明  $\text{CaCO}_3$  的加入, 不但抵消了镉对这几种元素的影响, 而且草莓对这几种元素的吸收还有所增加, 但增加量太多时, 叶中镁和磷的含量有下降的趋势,  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  除了降低草莓叶中钙的含量外, 也增加钾、镁、磷在草莓叶中的积累。

## 3 讨论

### 3.1 镉在草莓体内的分布规律

镉经根部吸收后, 大部分积累在草莓的根部, 另有一部分则转移到其它器官。草莓对镉吸收率为根 > 茎 > 叶 > 果, 这与其它作物中的规律<sup>[9]</sup>一致。因为镉与钙一样, 能与细胞壁中的果胶酸盐结合, 使大部分的镉沉积于细胞壁中, 限制了镉的移动性, 此外, 镉还能与根内蛋白质、多糖类、核酸类等形成稳定的大分子结合物或不溶性的有机大分子而沉积下来<sup>[9]</sup>。

### 3.2 影响草莓对镉吸收的因子

试验结果显示, 镉对草莓的吸收量随时间延长而增加, 吸收速率则随时间延长而降低, 根本原因可能是草莓对镉的吸收速率与草莓根系内外的镉浓度差有关。试验中还发现, 草莓在与溶液中的镉接触后 40 min, 有一个吸收高峰, 这可能是溶液中的镉到达草莓根系并建立平衡要有一定的时间, 在这之前, 根毛区镉的浓度较低, 因此吸收速率就低, 在 40 min 后, 由于草莓根细胞中已积累了一定量的镉, 吸收速率又趋于降低。

本研究表明, 钙、磷均能抑制草莓对镉的吸收, 这种抑制作用与离子间普遍存在拮抗有关<sup>[10,11]</sup>, 也与镉的运输受到抑制有关<sup>[12]</sup>, 因钙与镉的离子半径相近, 易竞争镉的吸收位点, 所以在钾、钙、钠、镁等离子中, 钙对镉的抑制作用最强; 有报道磷不但能降低镉在细胞中的积累, 而且对细胞中镉的分布也有影响, 镉与磷之间存在拮抗作用<sup>[13,14]</sup>; 亦有报道磷对镉在细胞中的形态也有影响<sup>[15]</sup>。

表 3 不同处理对草莓中镉的积累以及土壤 pH 和有效镉的影响

Table 3 Effects of different treatment on Cd accumulation in strawberry and soil pH and available Cd							
处理 Treatment			镉 Cd (mg/kg)			有效镉	土壤 pH
Ca (mg/kg)	CaCO <sub>3</sub> (%)	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> (%)	根 Root	叶 Leaves	果 Fruit	Available Cd (mg/kg)	pH in soil
10			242.31	9.12	0.547 aA	4.35	4.54
10	0.2		213.72	7.54	0.368 cC	3.13	5.05
10	0.4		149.79	2.98	0.231 dD	2.08	5.91
10	0.8		108.19	1.43	0.071 eE	0.65	6.93
10		0.4	250.61	5.67	0.481 bB	3.89	5.66
10		0.8	234.92	3.59	0.374 cC	2.73	6.51

表 4 不同处理对草莓中矿质元素含量的影响

处理 Treatment			叶片 In leaves (mg/ kg)				果 Ca
Cd (mg/ kg)	CaCO <sub>3</sub> ( % )	Na <sub>2</sub> SiO <sub>3</sub> ( % )	K	Ca	Ca	P	Ca in fruit ( % )
对照 Control			2. 247	0. 764	0. 325	0. 207	0. 053
10			2. 390	0. 728	0. 296	0. 192	0. 049
10	0. 2		2. 855	0. 847	0. 311	0. 312	0. 062
10	0. 4		2. 933	1. 549	0. 362	0. 293	0. 085
10	0. 8		3. 021	1. 552	0. 357	0. 252	0. 061
10		0. 4	3. 025	0. 558	0. 322	0. 296	0. 048
10		0. 8	3. 034	0. 502	0. 277	0. 289	0. 043

### 3.3 $\text{CaCO}_3$ 和 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ 对调控镉在草莓体内的积累具有重要的作用

$\text{CaCO}_3$ 、 $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  通过降低土壤酸度, 使土壤中镉的形态发生改变, 部分有效态镉变成不易被草莓所吸收的形态, 进而降低了镉在草莓体内 (特别是果中) 的积累,  $\text{CaCO}_3$  对草莓中镉的积累作用比  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  更为明显, 这可能与  $\text{CaCO}_3$  具有降低土壤酸度和拮抗镉的吸收双重作用有关, 而且  $\text{CaCO}_3$  价格便宜, 施用方便, 又对草莓吸收主要矿质营养元素的影响不大, 是较理想、切实可行的调控制剂。

#### 参考文献:

- 1 廖自基. 微量元素的环境化学及生物效应. 北京: 中国环境科学出版社, 1993. 299 ~ 302
- 2 郭笃发. 环境中铅和镉的来源及其对人和动物的危害. 环境科学进展, 1994, 2 (3): 71 ~ 76
- 3 吴燕玉, 陈 涛, 张学询, 等. 沈阳张士灌区 Cd 污染生态研究. 生态学报, 1989, 9 (1): 21 ~ 26
- 4 苏年华, 张金彪, 王玉纵, 等. 福建省土壤重金属污染及评价. 福建农业大学学报, 1994, 23 (4): 434 ~ 439
- 5 陈怀满, 陈能场, 陈英旭. 土壤—植物系统中的重金属污染. 北京: 科学出版社, 1996. 71 ~ 87
- 6 张金彪, 陈玉森, 黄维南, 等. 镉污染对草莓生长的影响. 福建农业大学学报, 2001, 30 (4): 528 ~ 531
- 7 Szeke B, Jedrzejczak R. Influence of the environmental factors on cadmium content in strawberry fruit. Fruit Science Reports, 1998, 16 (1): 1 ~ 6
- 8 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法. 北京: 中国农业出版社, 2000. 12 ~ 14
- 9 吴启堂, 陈 卢, 王文寿. 水稻不同品种对 Cd 吸收累积的差异和机理研究. 生态学报, 1999, 19 (1): 104 ~ 107
- 10 王焕校. 污染生态学基础. 昆明: 云南大学出版社, 1990. 71 ~ 148
- 11 Hagemeyer, Waisel Y. Uptake of  $\text{Cd}^{2+}$  and  $\text{Fe}^{2+}$  by excised roots of *Tamarix aphylla*. Physiol. Plant, 1989, 77: 247 ~ 253
- 12 Hardiman R T, Jacoby B. Absorption and translocation of Cd in bush beans (*Phaseolus vulgaris*). Physiol. Plant, 1984, 61: 670 ~ 674
- 13 Pawlik B, Skowronski T. Transport and toxicity of cadmium: its regulation in the cyanobacterium *synechocystis Aquatilis*. Environ. and Experi. Botany, 1994, 34: 225 ~ 233
- 14 杨志敏, 郑绍建, 柯玉琴, 等. 镉磷在小麦细胞内的积累和分布特性及其交互作用. 南京农业大学学报, 1998, 21 (2): 54 ~ 58
- 15 杨志敏, 郑绍建, 赵秀兰, 等. 磷对小麦细胞镉、锌的积累及在亚细胞内分布的影响. 环境科学学报, 1999, 19 (6): 693 ~ 695

## Cadmium Absorption Characteristics of Strawberry and Regulative Measures

Zhang Jinbiao<sup>1</sup>, Huang Weinan<sup>3</sup>, and Ke Yuqin<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> Test Center, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; <sup>2</sup> College of Life Science, Fujian Agricultural and Forestry University, Fuzhou 350002, China; <sup>3</sup> Fujian Institute of Subtropical Botany, Xiamen 361006, China)

**Abstract:** In strawberry, Cadmium regularly distributed in accordance with accumulation factors. In light of cd-decreasing order the arrangements were root, stems, leaves and fruit. Cadmium absorption amount in strawberry increased with time, while the cadmium absorption rate gradually decreased in the meantime. In the nutrition liquid, the cadmium absorption rate reached the peak after 40 minutes, and then the absorption rate gradually reduced. The experiment of hydroponics culture showed that Ca and P could reduce the cadmium absorption. The pot experiment showed  $\text{CaCO}_3$  and  $\text{Na}_2\text{SiO}_3$  could decrease the accumulation of cadmium in strawberry's fruit and other organs. The reduction of cadmium in strawberry may be relevant to the reduction of soil acid degree and the resistance of Ca to cadmium.  $\text{CaCO}_3$  appeared more significant in reducing the accumulation of cadmium in strawberry's fruit and other organs. It was a practical regulative measure to add some  $\text{CaCO}_3$  into the soil in order to decrease the accumulation of cadmium.

**Key words:** Strawberry; Cadmium; Accumulation