

镉对花椰菜光合作用的影响及其在亚细胞中的分布

汤惠华^{1,2}, 杨涛², 胡宏友¹, 汤朝凤¹, 卢昌义^{1*}

(¹ 厦门大学环境科学研究中心, 福建厦门 361000; ² 厦门市农产品质量安全检验检测中心, 福建厦门 361000)

摘要: 研究 Cd 在花椰菜的残留分布及其对光合作用的影响, 设置 0、5、15、30 mg · L⁻¹ 4 个 Cd 浓度的水培试验, 测定生长期间叶片的叶绿素含量, 光合作用参数, Cd 的亚细胞分布, 化学形态分布和器官(根、茎、叶、花球)分布。结果表明, Cd 处理两周后, 叶片叶绿素 a 和 b 含量明显比对照降低, 气孔导度、净光合速率和蒸腾速率亦显著降低, 胞间 CO₂ 浓度变化不大。不同浓度 Cd 处理的叶片中 Cd 在亚细胞中的分布主要以细胞质组分为主 (70.19% ~ 74.40%), 其次为细胞壁组分 (22.56% ~ 27.12%), 叶绿体和线粒体组分仅占 0.90% ~ 2.49%。叶片中 Cd 的化学形态分布比率大小顺序为氯化钠提取态 > 去离子水提取态 > 醋酸提取态 > 乙醇提取态 > 盐酸提取态 > 残渣态。在不同器官分布上, Cd 5 mg · L⁻¹ 处理下, 花球 Cd 累积最少 (14.50 mg · kg⁻¹), 其次是茎叶 (78.30 ~ 87.30 mg · kg⁻¹), 而根的累积达 857.90 mg · kg⁻¹。

关键词: 花椰菜; 叶绿素; 光合作用; 镉残留分布

中图分类号: S 635.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 0513-353X (2008) 09-1291-06

Effects of Cadmium and Its Subcellular Distribution on the Photosynthesis of Cauliflower

TANG Hui-hua^{1,2}, YANG Tao², HU Hong-you¹, TANG Chao-feng¹, and LU Chang-yi^{1*}

(¹ Environmental Science Research Center, Xiamen University, Xiamen, Fujian 361000, China; ² Xiamen Agriculture Product Quality and Safety Testing Center, Xiamen, Fujian 361000, China)

Abstract: The effects of cadmium (Cd) (5, 15, 30 mg · L⁻¹) on chlorophyll levels and photosynthesis of cauliflower (*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*) were studied under different concentrations of Cd using hydroponics system. Meanwhile, the differential centrifugation techniques and sequential extraction methods were used to determine the subcellular distribution and chemical form of Cd in leaves. Cd contents in different parts of plant were also measured after harvest. The results showed that, after different contents of Cd were supplied for two weeks, except intercellular CO₂ concentration (Ci), the levels of chlorophyll a and b, net photosynthesis rate (Pn), stomatal conductance (Gs) and transpiration rate (Tr) all decreased significantly compared with the control. For the leaves, Cd was mainly distributed in the fractions of cytoplasm (70.19% ~ 74.40%) and cell wall (22.56% ~ 27.12%), and less distributed in the fractions of mitochondrion and chloroplast (0.90% ~ 2.49%). The sequential extraction results of Cd in leaves indicated that NaCl extractable Cd was predominated (33% ~ 39%), and the distribution of six Cd forms in leaves was as following: F_{NaCl} > F_{H₂O} > F_{HAC} > F_{Alcohol} > F_{HCl} > F_{Residue}. Most of Cd absorbed by plant was accumulated in roots, little of them was transported to the aboveground portions. The order of Cd accumulation in different plant parts was: roots > stems, leaves > flowers.

Key words: cauliflower; chlorophyll; photosynthesis; Cd residues distribution

收稿日期: 2008-05-23; 修回日期: 2008-07-08

基金项目: 厦门市科技计划项目 (3502Z20071098)

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: lucy@xmu.edu.cn)

致谢: 本文承蒙庄伊美教授审阅, 深表感谢。

近年来,随着农村城市化进程的加快,有些蔬菜产区施肥不合理,造成不同程度镉(Cd)污染,从而影响蔬菜食用安全(汤惠华等,2007)。

Cd影响植物光合作用等多种生理过程,抑制生长发育(Moya et al., 1992)。环境中Cd毒性不仅与其总量有关,还与植物的特性相关。有关叶菜类蔬菜Cd的污染累积及Cd对其光合作用的影响已有研究,Cd在植物中的亚细胞和形态分布也有人涉及(廖斌等,2004;李德明等,2005),但在花椰菜上把它同光合作用联系起来的研究较少。

本研究中以花椰菜为材料,进行0、5、15、30 mg·L⁻¹4个Cd浓度的水培试验,探讨Cd在器官和亚细胞水平的积累、分布特点及对光合作用的影响,为控制Cd对花椰菜的污染及蔬菜食用安全提供科学依据。

1 材料与方 法

试验于2004年10月在厦门市农业科学研究所进行。供试花椰菜(*Brassica oleracea* L. var. *botrytis*)为‘夏花杂交4号’。

无土育苗36d时选择生长一致的植株移植于Hoagland全营养液水培系统中,6d后添加Cd(NO₃)₂·4H₂O,进行不同浓度Cd(0、5、15、30 mg·L⁻¹)处理。每处理3个重复,每重复20株,随机排列。营养液每周更换1次,定期观察各处理的植株生长状况。

处理7d和14d时测定叶片叶绿素;14d后测定光合作用;随后分别进行Cd的亚细胞分布和形态分布分析。每项指标每次测定时采集植株顶叶下数第4片完整叶,每处理采集10株共10片叶混匀后测定。Cd处理60d(蕾期)进行终期采样,收获花球,每处理采集3株,按根、茎、叶、花球解析,洗净、风干、磨碎过筛,供Cd含量测定。

处理组叶片光合作用参数采用美国产LI-6400光合仪测定,叶绿素用丙酮法测定。

Cd的亚细胞分布测定参照周卫等(1999)方法略有改动:按料液比1:10的比例,取鲜样2g,以预冷的匀浆液[250 mmol·L⁻¹蔗糖,50 mmol·L⁻¹ Tris-HCL (pH 7.4),1 mmol·L⁻¹二硫赤藓糖醇(C₄H₁₀O₂S₂)]在4℃下研磨匀浆。匀浆液依次在600×g离心10 min,1 000×g离心15 min,10 000×g离心20 min,依次得沉淀为细胞壁、叶绿体、线粒体组分;最后上清液为细胞质组分(含液泡及核糖和蛋白等)。各组分供Cd含量测定。

叶片中Cd的化学形态分析采用连续提取法(廖斌等,2004)。取鲜样2g,加10 mL提取剂,所用的提取剂依次为:80%乙醇、去离子水、1 mol·L⁻¹氯化钠、2%醋酸、0.6 mol·L⁻¹盐酸。每种形态分2次提取,第1次震荡提取22 h,5 000×g离心,回收提取液,残渣再加入同样体积提取剂经振荡提取1 h再离心回收提取液,两次提取液合并,供Cd含量测定。

Cd含量的测定采用4 mL HNO₃+2 mL H₂O₂消解,原子吸收分光光度计法(岛津AA-6800火焰模式;德国耶拿Vario-6石墨炉模式)测定Cd含量。

试验结果采用SPSS和EXCEL2000进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 镉对花椰菜叶绿素含量和光合作用的影响

Cd处理7d后,低、中浓度Cd(5、15 mg·L⁻¹)处理没有显著影响叶绿素a和b含量(表1),但高浓度Cd(30 mg·L⁻¹)处理时两者分别比对照降低15.69%和16.82%,叶绿素a/b值仅在Cd 15 mg·L⁻¹处理出现下降(比对照减少14.98%)。Cd处理14d后,3个处理的叶绿素a和b含量均显著低于对照,叶绿素a/b值各处理间均无差异。这表明,Cd对植物叶绿素的毒害不仅与浓度有关,还具有时间累积效应。

表 1 不同浓度 Cd 对花椰菜叶片叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of different concentrations of Cd on the chlorophyll contents

处理 Treatment		叶绿素 Chlorophyll		
时间/d Time	Cd/ (mg · L ⁻¹)	叶绿素 a/(mg · g ⁻¹ FM) Chl. a	叶绿素 b/(mg · g ⁻¹ FM) Chl. b	叶绿素 a/b Chl. a/b
7	0	1.44 ± 0.05 a (100.00)	0.44 ± 0.01 a (100.00)	3.27 ± 0.14 a (100.00)
	5	1.25 ± 0.01 ab (87.08)	0.39 ± 0.00 ab(89.55)	3.18 ± 0.08 a (97.25)
	15	1.27 ± 0.04 ab (88.33)	0.46 ± 0.02 a (103.64)	2.78 ± 0.20 b (85.02)
	30	1.21 ± 0.05 b (84.31)	0.37 ± 0.01 b(83.18)	3.32 ± 0.03 a (101.53)
14	0	1.65 ± 0.02 a (100.00)	0.46 ± 0.01 a(100.00)	3.56 ± 0.06 a (100.00)
	5	1.03 ± 0.01 b (62.42)	0.30 ± 0.00 b(65.22)	3.46 ± 0.09 a (97.19)
	15	1.06 ± 0.01 b (64.24)	0.21 ± 0.00 b(45.65)	3.64 ± 0.14 a (102.25)
	30	0.77 ± 0.01 c (46.67)	0.25 ± 0.01 b(54.35)	4.86 ± 2.44 a (136.52)

注: 括号内数据为处理占对照的%。同列数值后注有不同英文字母表示差异显著性达 0.05 水平。下同。

Note: Datum in bracket is rate (%) of treatments/control. Means in the same column with different letters are significantly different at level of 0.05. The same below.

处理 14 d 时, 低 Cd 处理 (5 mg · L⁻¹) 未对净光合速率 (Pn) 造成显著影响, 但中、高 Cd (15、30 mg · L⁻¹) 呈显著抑制作用 (表 2)。进一步对光合作用参数分析表明, 低 Cd 处理显著抑制了气孔导度 (Gs), 从而影响到光合作用过程, 但可能由于处理时间较短, 并未影响净光合速率, 中、高 Cd 处理导致叶片气孔导度和蒸腾速率 (Tr) 显著下降, 其中, 气孔导度分别降为对照的 65.53% 和 29.67%, 而蒸腾速率降为对照的 81.27% 和 51.47%; 但 Cd 各处理间胞间 CO₂ 浓度 (Ci) 未见显著差异。

表 2 不同浓度 Cd 对花椰菜光合作用参数的影响

Table 2 Effects of different concentrations of Cd on the photosynthetic parameters

Cd/ (mg · L ⁻¹)	Pn/ (μmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Gs/ (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)	Ci/ (μL · L ⁻¹)	Tr/ (mmol · m ⁻² · s ⁻¹)
0	11.66 ± 0.80 a (100.00)	0.79 ± 0.07 a (100.00)	332.53 ± 9.21 a (100.00)	4.38 ± 0.13 a (100.00)
5	10.97 ± 1.28 ab (94.00)	0.54 ± 0.16 b (68.18)	312.32 ± 13.83 a (93.92)	3.71 ± 0.42 b(84.81)
15	9.54 ± 3.02 b (81.84)	0.52 ± 0.23 b (65.53)	315.41 ± 33.31 a (94.86)	3.56 ± 0.82 b(81.27)
30	6.16 ± 0.80 c (52.79)	0.24 ± 0.15 c (29.67)	309.62 ± 23.60 a (93.11)	2.25 ± 0.94 c(51.47)

2.2 镉在花椰菜叶片内的亚细胞分布

综合分析各处理组亚细胞 Cd 含量 (表 3) 表明, Cd 在亚细胞组分间呈不均匀分布, 其中以细胞质的分配率最高, 占总量的 70.19% ~ 74.40%; 其次为细胞壁; 叶绿体和线粒体中 Cd 含量较少, 仅占 0.90% ~ 2.49%。Cd 处理浓度增加, 叶片 Cd 总量和各亚细胞组分 Cd 含量显著增加, 其中, 和低浓度相比, 叶片 Cd 总量增加了 2.0 倍, 细胞质 Cd 增加了 2.2 倍, 叶绿体和细胞壁 Cd 分别增加了 1.6、1.7 倍, 线粒体 Cd 仅增加 1.2 倍。说明随着 Cd 处理浓度提高, 呈现 Cd 向细胞质分配增加, 而向其余组分分配相对减少的趋势。

表 3 不同浓度 Cd 处理花椰菜叶片亚细胞 Cd 含量及其分配率

Table 3 Contents and percent distributions of different concentrations of

Cd in subcellular fractions of leaves

/ (mg · kg⁻¹)

Cd/(mg · L ⁻¹)	细胞壁 Cell wall	叶绿体 Chloroplast	线粒体 Mitochondrion	细胞质 Cytoplasm	总量 Total
0	ND	ND	ND	ND	
5	6.06 c (25.56)	0.33 c (1.39)	0.59 c (2.49)	16.72 c (70.57)	23.69 c(100.00)
15	14.63 b (27.12)	0.49 b (0.90)	0.97 b (1.79)	37.87 b (70.19)	53.97 b(100.00)
30	16.21 a (22.56)	0.87 a (1.20)	1.32 a (1.83)	53.47 a (74.40)	71.86 a(100.00)

注: ND 表示未检出。

Note: ND means no Cd was detected.

2.3 镉在花椰菜叶片内的化学形态分布

综合各处理组形态分析结果,花椰菜体内 Cd 以氯化钠提取态为主,其次为水提取态,其它形态的 Cd 含量相对较低。其比率顺序为:氯化钠提取态 (33.48% ~ 38.80%) > 水提取态 (20.24% ~ 25.36%) > 醋酸提取态 (17.74% ~ 23.76%) > 酒精提取态 (9.60% ~ 16.03%) > 盐酸提取态 (2.68% ~ 5.98%) > 残渣态 (0.21% ~ 0.25%)。残渣态比例很少,说明 Cd 是活性较大的一种重金属 (图 1)。

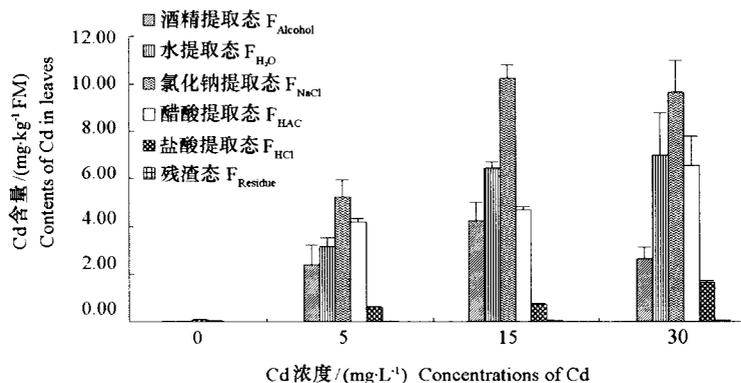


图 1 不同浓度 Cd 处理叶片内 Cd 的化学形态分布

Fig. 1 Cd contents in different chemical forms in leaves

随着 Cd 浓度提高,处理组间各种形态 Cd 含量显著增加,但增加趋势有所不同。当 Cd 处理浓度由 5 mg·L⁻¹ 升至 15 mg·L⁻¹ 时,活性较强的组分酒精、H₂O 和 NaCl 提取态提高幅度较大,分别提高了 76.09%、104.45%、95.62%,残渣态 Cd 增加幅度也达 80.99%,而醋酸和盐酸提取态 Cd 变化不大。处理浓度进一步上升,H₂O 和 NaCl 提取态 Cd 升高不显著,醋酸和盐酸提取态 Cd 则显著提高,而酒精提取态 Cd 则显著下降。表明浓度提高时,Cd 多以果胶酸盐、蛋白质、水溶性有机酸盐形式存在,这部分被区域化于细胞质中,便于规避毒害,而进入组织部分结合成难溶性物质的醋酸和盐酸提取态增加较少,增加植物的抗性。

2.4 花椰菜不同器官的镉含量及其富集系数

花椰菜各器官 Cd 含量及富集系数见表 4。

随 Cd 处理浓度的提高,叶、花球、茎和根的 Cd 含量也显著增加,其相关系数 r 分别为 0.969*, 0.989*, 0.958*, 0.969*。不同器官间总体呈现根 Cd 含量最高,茎、叶其次,花球最低 (仅为根的 1.69% ~ 2.37%)。根据富集系数分析,各器官对 Cd 的富集能力为根 > 叶 > 茎 > 花球,所不同的是富集系数随着 Cd 处理浓度提高基本上呈减小的趋势。由此可见,土壤环境中 Cd 的含量是决定花椰菜体内 Cd 累积的重要因子。

表 4 不同浓度 Cd 处理各器官 Cd 含量及富集系数

Table 4 Cd contents in the organ and its accumulation coefficient under Cd treatment

Cd/ (mg·L ⁻¹)	含量/(mg·kg ⁻¹ DM) Content				富集系数 Accumulation coefficient			
	叶 Leaf	花球 Flower	茎 Stem	根 Root	叶 Leaf	花球 Flower	茎 Stem	根 Root
0	ND	ND	ND	0.02	ND	ND	ND	ND
5	87.30 c	14.50 c	78.30 c	857.90 c	17.46 a	2.90 a	15.66 a	171.58 a
15	166.02 b	24.30 b	150.60 b	1 048.20 b	11.20 b	1.62 b	10.04 b	69.88 b
30	242.81 a	57.44 a	207.42 a	2 422.71 a	8.09 c	1.91 b	6.91 c	80.76 b

注:富集系数为各器官 Cd 含量除以处理 Cd 浓度。

Note: Accumulation coefficient = The contents of Cd in each organ/Cd concentration of treatment.

2.5 镉分布与光合作用参数的相关分析

尽管叶绿体中 Cd 含量在亚细胞中所占比例较少 (仅为 0.9% ~ 1.39%) 且相对稳定, 但与净光合速率、气孔导度、蒸腾速率呈显著负相关 (分别为 $r = -0.958^*$ 、 $r = -0.990^*$ 、 $r = -0.980^*$) (表 5), 说明 Cd 积累造成了对叶绿体的毒害。而净光合速率与线粒体中 Cd 负相关不显著, 这与线粒体所承担的呼吸作用功能有关。但线粒体中 Cd 含量与气孔导度呈显著负相关, 说明 Cd 胁迫影响了呼吸作用。有关研究表明, 线粒体的毒害可引起 ATP 代谢不正常, 从而影响气孔开张的能量供应 (孙自玲 等, 2005)。而叶片 Cd 的化学形态对光合作用影响程度不同, 除盐酸提取态 Cd 与气孔导度、蒸腾速率和净光合速率呈显著或极显著负相关, 醋酸提取态 Cd 与气孔导度显著负相关外, 其它形态没有相关性, 表明不同形态 Cd 对植物初生代谢影响存在差异。可见, 植物可能通过体内 Cd 化学形态变化来调控 Cd 转运, 适应 Cd 胁迫, 提高对 Cd 的抗性。

表 5 Cd 在亚细胞中的含量及其几种化学形态与光合作用参数间的相关性分析

Table 5 The correlations between Cd contents of subcellular and chemical form with the photosynthetic parameters

Cd 的分布 Distributions of Cd	净光合速率 Pn	气孔导度 Gs	胞间 CO ₂ 浓度 Ci	蒸腾速率 Tr
叶绿体中 In chloroplast	-0.958 *	-0.990 *	-0.853	-0.980 *
线粒体中 In mitochondrion	-0.902	-0.959 *	-0.880	-0.925
酒精提取态 F _{Alcohol}	-0.460	-0.611	-0.772	-0.496
水提取态 F _{H₂O}	-0.832	-0.886	-0.839	-0.839
氯化钠提取态 F _{NaCl}	-0.754	-0.834	-0.841	-0.768
醋酸提取态 F _{HAC}	-0.830	-0.961 *	-0.965 *	-0.900
盐酸提取态 F _{HCl}	-0.968 *	-0.993 **	-0.828	-0.998 **
残渣态 F _{Residue}	-0.708	-0.806	-0.845	-0.730

注: * 和 ** 分别表示显著相关和极显著相关。

Note: * and ** mean data correlation between raw and column significantly at levels of 0.05 and 0.01.

3 讨论

3.1 植物体内镉形态影响转运及抗性

Cd 在花椰菜各营养器官中的分布表明, Cd 主要累积在根部, 茎叶居次, 而在花序中累积量大大减少, 表明植物通过减少繁殖器官中 Cd 的累积而减少 Cd 对繁殖过程的影响, 保证了群体遗传的稳定性, 这可能是植物对 Cd 胁迫的一种生态适应。从 Cd 化学形态分析, Cd 之所以集中在根部, 可能是根中 Cd 主要以 NaCl 提取态和醋酸提取态存在 (江行玉 等, 2003)。NaCl 提取态主要是与果胶、蛋白质结合的重金属, 而醋酸提取态主要是难溶于水的重金属磷酸盐, Cd 进入根的皮肤细胞后和根内蛋白质、多糖类、核糖类、核酸等合成络合物沉淀, 影响了 Cd 的转运。研究表明, Cd 经花椰菜根吸收转运至叶后, 主要以难移动的 NaCl 和醋酸提取态为主, 二者之和占总量达 51.22% ~ 65.61%, 这为解释花椰菜花序中 Cd 含量较少提供了证据。

3.2 镉胁迫对光合作用影响的亚细胞水平分析

相关分析表明, 叶绿体 Cd 含量与叶片 Cd 含量呈显著正相关, 说明根吸收的 Cd 转运至叶后, 在叶绿体累积产生毒害而直接影响到光合作用, 这种毒害与接触 Cd 的时间、浓度和不同器官对 Cd 毒害的灵敏程度有关, 如 Cd 处理 7 d 时, $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理的叶绿素含量不受影响, 但 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 处理时即受影响, 而 14 d 时所有处理浓度的叶绿素含量、气孔导度和蒸腾速率和净光合速率急剧降低。可见, 从亚细胞水平分析, Cd 污染导致光合作用降低, 直接原因是 Cd 对叶绿体的伤害造成的, 多种植物均有这种现象 (Kumara et al., 1999; Pankovic et al., 2000)。从毒害机理分析, Cd 对叶绿体的毒害主要表现在 Cd 造成叶绿体密度降低、基粒片层排列紊乱、嗜饿粒增多 (周卫 等, 1999)。线粒体中 Cd 积累影响了气孔开张的能量供应, 对光合作用产生间接影响。植物对 Cd 毒害有一定的适应机

制,可能通过调整 Cd 在亚细胞组分中的分配实现。细胞质中 Cd 含量占绝对优势,而叶绿体和线粒体中 Cd 含量最低, Cd 处理浓度增加, Cd 在细胞质中增加幅度大于细胞壁。本研究与李德明等(2005)的结果一致。

3.3 植物体内镉积累特点与蔬菜的无公害生产

据表 4 结果, Cd 在花椰菜可食部分花球中的累积量远远低于非可食部分,根中 Cd 浓度是花球的 42.18~59.17 倍,是茎、叶的 3.61~6.20 和 4.22~6.83 倍,因此,在相同污染环境下,可食部分为花球的蔬菜污染风险要比可食部分为茎、叶的小,如同为芸薹属的花椰菜的风险可能要比甘蓝小。当土壤中可溶性 Cd 含量达 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,花椰菜花球 Cd 含量已超过国家食品中污染物限量标准 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,不适合种植花椰菜。从食品安全考虑,在低 Cd 污染土壤上,种植叶菜比种植花椰菜的 Cd 污染风险大,因此,选择合适的蔬菜种类很有必要。此外,蔬菜的茎叶尤其根等残体应在当季生产后尽量清出农田集中处理,以达到逐步降低土壤的 Cd 污染,为无公害蔬菜生产创造更好的环境。

References

- Baryla A, Carrier P, Franek F, Coulomb C, Sahut C, Havaux M. 2001. Leaf chlorosis in oilseed rape plants (*Brassica napus*) grown on cadmium-polluted soil: Causes and consequences for photosynthesis and growth. *Planta*, 212 (5): 696–709.
- Jiang Xing-yu, Wang Chang-hai, Zhao Ke-fu. 2003. Study on the mechanism of cadmium resistance in *Phragmites australis*. *Acta Ecologica Sinica*, 23 (5): 856–862. (in Chinese)
- 江行玉, 王长海, 赵可夫. 2003. 芦苇抗镉污染机理研究. *生态学报*, 23 (5): 856–862.
- Kumara C, Surinder Kumar S. 1999. Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium. *Lakshaman Plant Physiology and Biochemistry*, 37 (4): 297–303.
- Li De-ming, Zhu Zhu-jun, Liu Yong-hua, Wang Yu-qing. 2005. Influence of cadmium on photosynthesis of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L. *Journal of Zhejiang University: Agric & Life Sci*, 31 (4): 459–464. (in Chinese)
- 李德明, 朱祝军, 刘永华, 王玉清. 2005. 镉对小白菜光合作用特性影响的研究. *浙江大学学报: 农业与生命科学版*, 31 (4): 459–464.
- Liao Bin, Deng Dong-mei, Yang Bing, Shu Wen-sheng, Lan Chong-yu. 2004. Subcellular distribution and chemical form of Cu in commelina communis. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 43 (2): 72–80. (in Chinese)
- 廖斌, 邓冬梅, 杨兵, 束文圣, 蓝崇钰. 2004. 铜在鸭跖草细胞内的分布和化学形态研究. *中山大学学报: 自然科学版*, 43 (2): 72–80.
- Moya J I, Ros R, Picazo I. 1992. Influence of cadmium and nickel on growth, net photosynthesis and carbohydrate distribution in rice plants. *Photosynthesis Research*, 36: 75–80.
- Pankovic D, Plesnicar M, Arsenijevic-Maksimovic I, Petrovi N, Sakac Z, Kastori R. 2000. Effects of nitrogen nutrition on photosynthesis in Cd-treated sunflower plants. *Annals of Botany*, 86: (4): 841–847.
- Sun Zi-ling, Li Yong-quan, Li Ming-zhi, Xu Ling. 2005. Effect of Xanthomonas L4 phytotoxin on mitochondrial stroma and cell wall of *Amaranthus retroflex* (*Redroot amarant*). *Journal of Jiangsu University: Medicine*, 15 (4): 285–287. (in Chinese)
- 孙自玲, 李永泉, 李明智, 徐凌. 2005. 黄单胞菌 L4 毒素对反枝苋线粒体及细胞壁和表皮气孔的影响. *江苏大学学报: 医学版*, 15 (4): 285–287.
- Tang Hui-hua, Chen Xi-xiang, Yang Tao, Huang Han-shui, Lu Chang-yi. 2007. Survey and evaluation of heavy metals, nitrate and nitrite contamination in vegetables in Xiamen's market. *Food Science*, 28 (8): 327–331. (in Chinese)
- 汤惠华, 陈细香, 杨涛, 黄汉水, 卢昌义. 2007. 厦门市售蔬菜重金属、硝酸盐和亚硝酸盐污染研究及评价. *食品科学*, 28 (8): 327–331.
- Zhou Wei, Wang Hong, Lin Bao. 1999. Effects of calcium supply on subcellular distribution of cadmium, chloroplast ultrastructure, RuBPC and PEPC activity in maize under cadmium stress. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 5 (4): 335–340. (in Chinese)
- 周卫, 汪洪, 林葆. 1999. 镉胁迫下钙对镉在玉米细胞中分布及对叶绿体结构与酶活性的影响. *植物营养与肥料学报*, 5 (4): 335–340.