

# 镉胁迫对玉米光合特性的影响

惠俊爱<sup>1</sup>, 党志<sup>1</sup>, 叶庆生<sup>2</sup>

(1.华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510640; 2.华南师范大学生命科学学院, 广州 510631)

**摘要:**在模拟光条件下,通过盆栽试验研究了外源镉胁迫对盆栽玉米光合特性的影响。结果表明,高浓度镉( $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )胁迫下玉米叶片叶绿素 a、b 及总叶绿素 c 含量明显减少,分别比对照 CK 下降了 65.32%、54.95%、62.57%。镉浓度 1、5、15、50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  处理下叶片的叶绿素含量下降得少,Ch<sub>a</sub>/Ch<sub>b</sub> 的比值降低较少。镉浓度 15、50、100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  胁迫下导致玉米叶片光合速率下降,光补偿点提高,光饱和点和表观量子效率降低,暗呼吸速率升高,较低浓度镉胁迫(1、5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )则提高光补偿点、光饱和点和表观量子效率,降低暗呼吸速率。

**关键词:**镉胁迫;玉米;光合特性

中图分类号:Q945.78 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2010)02-0205-06

## Influence of Cadmium Stress on Photosynthetic Characteristics of Maize

HUI Jun-ai<sup>1</sup>, DANG Zhi<sup>1</sup>, YE Qing-sheng<sup>2</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China; 2. College of Life Science, South China Normal University, Guangzhou 510631, China)

**Abstract:** The pot experiment was conducted to study the effects of added cadmium (Cd) on photosynthetic characteristics of maize under simulated photosynthetic radiation (PAR). The results showed that in the high concentration of Cd ( $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) stress, corn leaf blade chlorophyll a, b and the total chlorophyll c content obvious reduction, the distinction ratio compared CK to drop 65.32%, 54.95%, 62.57%. The concentration Cd (1, 5, 15, 50  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) under processing leaf blade's chlorophyll content dropped little, the Ch<sub>a</sub>/Ch<sub>b</sub> ratio reduced few. The concentration Cd (15, 50, 100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) forces caused the corn leaf blade photosynthesis speed to drop, the light compensation point enhanced, the light saturation point and the apparent quantum efficiency reduced, the dark respiratory rate elevated, the low concentration cadmium coercion (1, 5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) enhanced the light compensation point, the light saturation point and the apparent quantum efficiency, cut the dark respiratory rate.

**Keywords:** Cd stress; maize; photosynthetic characteristics

重金属对土壤的污染,因其隐蔽性、不可逆性和长期性的特点,对生态系统构成潜在的巨大威胁。镉是植物非必需元素,镉污染土壤后很难被降解、去除。植物能够吸收镉,导致农产品产生残毒,通过土壤-作物系统进入食物链,危害生物健康。镉进入植物体内并积累到一定程度后,会破坏生物细胞膜的结构与功能造成植株氧化胁迫、叶绿素和糖及蛋白质合成

受阻、养分失调,抑制光合及呼吸过程,降低酶的活性<sup>[1-2]</sup>,以及其他一系列生理代谢紊乱<sup>[3]</sup>,最终导致生长量和产量的下降。对于干旱、温度及施肥等环境因子影响下的植物的光合特性,已经有不少学者进行了研究<sup>[4-5]</sup>。本文基于盆栽试验,以玉米为研究对象,揭示了在不同浓度镉胁迫下,玉米在生长发育时期的一些主要光合特性的动态变化规律,从光合作用角度揭示镉对植物生长抑制的机理,为研究重金属对植物伤害的机理和作物监测提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料处理

试验所用土壤为水稻土,取自广东省广州市增城

收稿日期:2009-09-07

基金项目:国家自然科学基金重点项目(40730741);863项目(2007AA0610-01);广东省自然科学基金团队项目(9351064101000001);华南理工大学自然科学基金项目(E5090550)

作者简介:惠俊爱(1978—),女,山东沂水人,博士后,研究方向为环境污染生物修复技术,逆境生理生化。

通讯作者:党志 E-mail:chzdang@scut.edu.cn

区,基本理化性质如下:pH6.42,有机质 1.63%,总镉含量  $0.32 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,N 0.09%,速效 P 0.05%,速效 K 0.04%。土壤风干过 2 mm 筛,以溶液形式加入  $\text{CdCl}_2 \cdot 2.5\text{H}_2\text{O}$ ,镉浓度为 1、5、15、50、100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ,处理浓度分别以纯镉计。以不加镉作为对照。土壤加入镉溶液,充分混匀,保持持水量的 70%平衡 14 d 后,风干,土壤重新磨碎混匀,装盆,每盆盛土 3.0 kg。每盆施复合肥(N 15%,P 15%,K 15%)1 g。

本试验所用植物为玉米超甜 38(CT38),种子购于广东农科院,选取籽粒饱满完整的 CT38 种子进行催芽,催芽后每盆种植 10 粒,幼苗长至 2 cm 高时,间苗至每盆 3 株。试验进行期间每日浇入适量水分使土壤含水量维持在田间持水量的 65%~70%。选取玉米生长健壮的同叶位测定部位(主茎上数第 3 片功能叶)在处理第 20 d 取叶片进行各项指标分析测定,均为 3 次重复。

## 1.2 光响应曲线的测定

利用美国 LI-COR 公司产 LI-6400 便携式光合作用测定仪,在晴天 12:00—14:00,温度 ( $30 \pm 0.5$ )  $^{\circ}\text{C}$ ,大气  $\text{CO}_2$  浓度 ( $380 \pm 30$ )  $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ ,叶室相对湿度为 ( $40 \pm 10$ )%,选取对照 CK 与镉胁迫处理下同一长势的玉米植株各 3 株,测定相同部位叶片的净光合速率,测定时光照强度由强到弱,依次设定光照强度(PAR)为 2 000、1 800、1 500、1 200、1 000、800、600、400、300、200、150、100、50 和 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,以光照强度密度(PAR)为横轴、光合速率( $P_n$ )为纵轴绘出光合作用光响应曲线,进一步依据 Bassman 和 Zwier 的方法<sup>[6]</sup>,拟合该曲线,计算最大光合速率( $P_n$ )、表观量子效率(AQY)、暗呼吸速率、光补偿点(LCP)、光饱和点(LSP)等参数。

## 1.3 叶绿体色素含量的测定

参考 Arnon 的方法,称鲜样 0.2 g 置于 10 mL 80% 的丙酮中暗处浸提 48 h,其间振荡 2 次,待叶片完全发白,色素全部溶于丙酮溶液中。用 UV-2450(岛津,日本)分光光度计分别测定在 663、645 nm 处的 OD 值,计算叶绿素 a、b 和总叶绿素 c 的含量。

## 1.4 数据处理与统计分析方法

运用 Excel 和 SPSS 软件对数据进行分析。

# 2 结果与分析

## 2.1 镉胁迫对叶片光合色素含量的影响

叶绿素是植物光合作用过程中吸收光能的物质,与植被的光能利用有直接关系。叶绿素含量是植物营养胁迫、光合作用能力和植物发育阶段相关光合器官生理状况的重要指标<sup>[7]</sup>。不同浓度的镉胁迫对玉米叶片叶绿素的影响不同,随着胁迫浓度的增加,叶绿素的含量呈下降趋势,表明随着镉在玉米植株内的积累,对玉米的伤害逐渐显现。由表 1 可知,叶绿素 a、b、c 含量随镉浓度升高而降低,在镉浓度为 100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  达到显著水平,镉(1、5、15、50、100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ )处理使 Chla 含量分别比对照 CK 下降了 29.76%、38.47%、39.35%、40.83%、65.32%;Chlb 含量分别下降了 30.29%、36.99%、37.45%、38.06%、54.95%;而 Chlc 含量则随着镉浓度增加而减少,1、5、15、50、100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  处理下,分别比对照降低 29.89%、38.08%、38.89%、40.09%和 62.57%(表 1)。叶绿素 a/b 变化趋势在镉浓度超过 10  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时与叶绿素 a、b、c 含量变化趋势相同,随镉浓度的升高而降低,在 100  $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$  时与对照相比下降了 23.02%。

以上结果表明,玉米苗对外界胁迫有一定适应能

表 1 镉处理对玉米叶片的色素含量( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  FW)的影响

Table 1 Effects of Cd treatments on pigment content( $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$  FW) in maize leaves

| 处理 Treatment/<br>$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ | 叶绿素 a Chlorophyll a/<br>$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW | 叶绿素 b Chlorophyll b/<br>$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW | 总叶绿素 c Chlorophyll c/<br>$\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ FW | 叶绿素 a/b Chlorophyll a/b |
|---------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|-------------------------|
| CK(0.32)                                          | 1.825 $\pm$ 0.113a(100)                                    | 0.657 $\pm$ 0.015a(100)                                    | 2.482(100)                                                  | 2.77                    |
| 1                                                 | 1.282 $\pm$ 0.085b(70.24)                                  | 0.458 $\pm$ 0.021b(69.71)                                  | 1.741(70.11)                                                | 2.79                    |
| 5                                                 | 1.123 $\pm$ 0.107b(61.53)                                  | 0.414 $\pm$ 0.035b(63.01)                                  | 1.537(61.92)                                                | 2.71                    |
| 15                                                | 1.107 $\pm$ 0.115b(60.65)                                  | 0.411 $\pm$ 0.051b(62.55)                                  | 1.518(61.11)                                                | 2.69                    |
| 50                                                | 1.081 $\pm$ 0.071b(59.17)                                  | 0.407 $\pm$ 0.042b(61.94)                                  | 1.487(59.91)                                                | 2.65                    |
| 100                                               | 0.633 $\pm$ 0.118c(34.68)                                  | 0.296 $\pm$ 0.031c(45.05)                                  | 0.929(37.43)                                                | 2.13                    |

注:表中数据为平均值 $\pm$ 标准差( $n=3$ ),括号中的数字为处理占对照的百分比,同一列中的不同字母表示显著性差异( $P<0.05$ ),小写字母表示 0.05 显著水平。下同。Data in the table are values of mean $\pm$ SD( $n=3$ ), in the parenthesis digit occupies comparison for processing the percentage, different letters in same column denote that differences are statistically significant( $P<0.05$ )。

力,但随镉胁迫浓度增加,镉在植株体内逐步累积,叶绿素水平不断降低,最终影响植物光合作用的正常进行。本试验所用的镉化合物属于盐类物质,当植株受到逆境胁迫时,叶绿体在叶肉细胞中的排列紊乱,结构受到破坏,或者是由于重金属镉抑制原叶绿素酸酯还原酶(Protochlorophyllide Reductase)和影响氨基-g-酮戊酸(Aminolaevulini Acid)的合成,从而使叶绿素含量降低,导致其光合能力下降<sup>[8]</sup>。

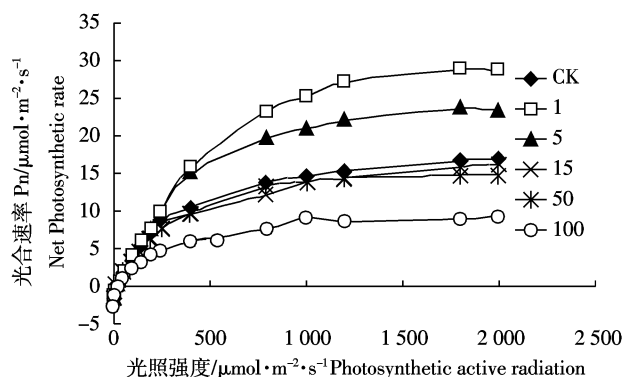


图1 Cd胁迫下玉米叶片 Pn-PAR 光响应曲线

Figure 1 Pn-PAR light curve of the maize's leaves in the stress of Cd

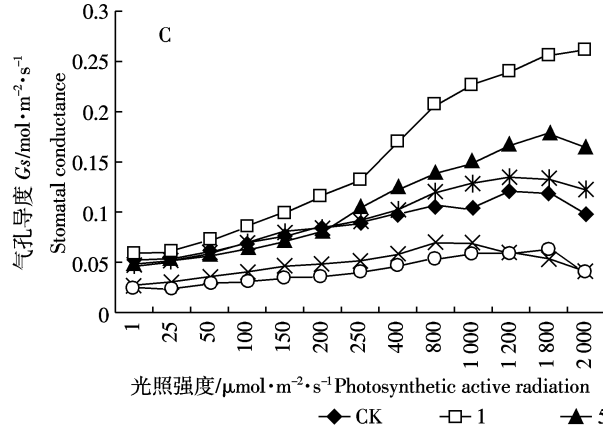
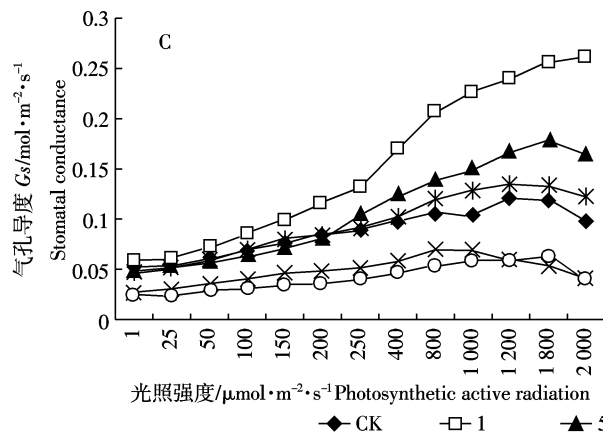
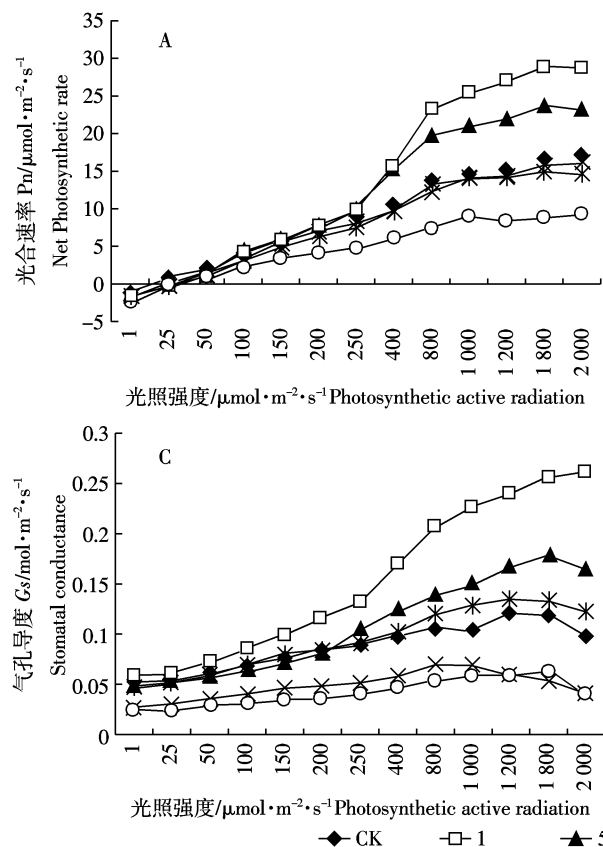


图2 不同光照强度下镉胁迫对玉米叶片光合速率 Pn(A),蒸腾速率 Tr(B),气孔导度 Gs(C),胞间 CO<sub>2</sub> 浓度 Ci(D)的影响

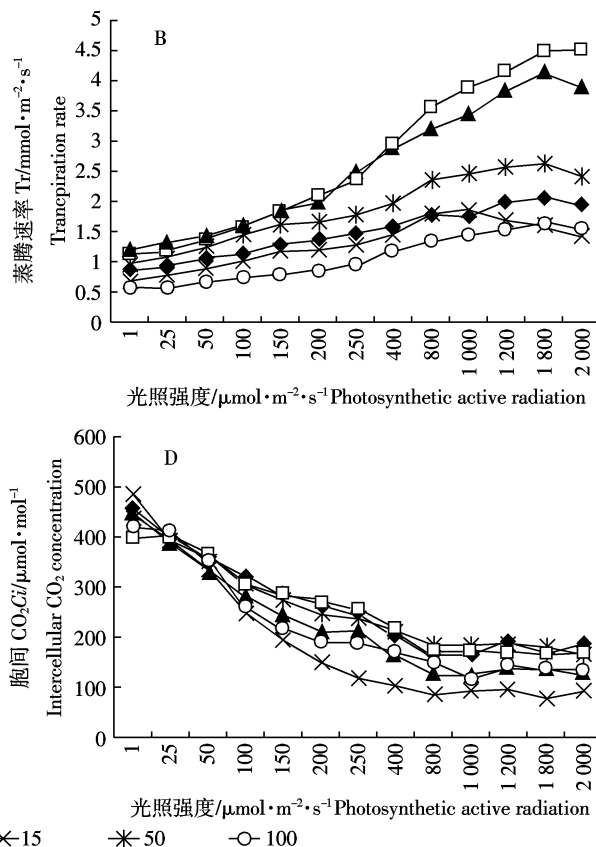
Figure 2 Effect of Cd stress on Pn(Net photosynthetic rate), Tr(Transpiration rate), Gs(Stomatal conductance), Ci(Intercellular CO<sub>2</sub> concentration) of maize's leaves in different photosynthetic active radiation

## 2.2 镉胁迫对玉米叶片气体交换参数的影响

### 2.2.1 光合速率

光合作用的光响应曲线及曲线拟合的计算结果表明(图1),玉米叶片净光合速率在光照从 0~2 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  增加的过程中,净光合速率随着光强的增加而增加,但光照强度超过一定强度后,增加趋于平缓,并出现降低的趋势,在镉胁迫条件下这种趋势更加明显。镉胁迫在较低浓度(1、5  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )时光合速率大于对照 CK,较高浓度(15、50、100  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )光合速率低于对照 CK,在光照强度 50~400  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  时光合速率近乎直线上升,光照强度大于 1 000  $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$  后光合速率变化比较平缓(图1,图2-A)。镉胁迫在较低浓度时光合速率升高,较高浓度(大于 15  $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ )光合速率下降,且这种抑制程度随光辐射的增加而增大。高浓度镉胁迫对玉米植株 Pn 产生一定的抑制作用,低浓度镉胁迫对玉米植株 Pn 产生一定的刺激作用。

光补偿点和光饱和点分别反映植物对弱光和强光的适应能力,表观量子效率则体现植物对光的利用



能力。从光补偿点,光饱和点变化总的趋势来看镉胁迫处理提高了叶片的光补偿点,降低了光饱和点,但光饱和点在镉胁迫浓度为 1、5 mg·kg<sup>-1</sup> 时高于对照,低浓度镉胁迫提高了玉米的光饱和点,同时提高玉米在强光下的 Pn,CK、1、5 mg·kg<sup>-1</sup> 处理下光饱和时的 Pn 在理论值上可达 17.3、37.7、27.7 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,光饱和点在CK、1、5 mg·kg<sup>-1</sup> 处理下分别为 1 500、1 945、1 630 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>,低浓度镉在玉米处理初期能提高叶片利用光能的能力。当镉胁迫浓度为 15、50、100 mg·kg<sup>-1</sup> 时,玉米的最大光合速率明显降低,分别比对照降低 9.93%、7.46%和 40.18%(表 2)。

表观量子效率随镉胁迫浓度上升而下降,表明在高光强下叶片固定 CO<sub>2</sub> 的能力有所降低,在低光强下,单个光量子同化 CO<sub>2</sub> 的分子数减少,暗呼吸速率随镉胁迫浓度上升而增加(表 2)。对呼吸速率的影响依赖于金属的种类和浓度。轻度重金属胁迫增加暗呼吸速率,而严重重金属胁迫使呼吸降低,这表明代谢受到损伤。植物对重金属的排出和留在细胞壁需要增加能量,通常通过增加呼吸速率来满足<sup>[9]</sup>。在 1~100 mg·kg<sup>-1</sup> 镉处理下暗呼吸速率均高于对照,表明玉米在镉处理下进行着较强的分解代谢,这为植物在胁迫环境下的生长提供了能量保证。

### 2.2.2 蒸腾速率

随模拟光辐射的增强,玉米的蒸腾速率也呈现增加的趋势,镉胁迫在较低浓度(1、5 mg·kg<sup>-1</sup>)时蒸腾速率升高,较高浓度(15、50、100 mg·kg<sup>-1</sup>)蒸腾速率下降。在整个光照强度范围内,光照强度小于 100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时蒸腾速率增加缓慢,光照强度大于 100 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 小于 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时蒸腾速率增加迅速,但光照强度大于 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时,增加趋势趋于平缓,说明光照强度增加对其蒸腾速率有所抑制(图 2-B)。镉胁迫降低了玉米的叶片蒸腾速率,降低程度随光照强度增加而增加。

### 2.2.3 气孔导度

气孔是植物叶片与大气进行气体交换和丧失水分的主要通道,其闭合程度直接影响光合作用和蒸腾作用。从图 2C 看出,随着光辐射强度的增加,玉米叶片的气孔导度上升,在较低光照强度(0~250 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup>)时,气孔导度增加较平缓,在 400~1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时,随光照强度增加,气孔导度显著增加。在光照强度大于 1 800 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 时,气孔导度有所下降,表明高光照强度抑制了气孔的开张。与对照相比,镉胁迫在较低浓度时气孔导度升高,较高浓度(15、50、100 mg·kg<sup>-1</sup>)时气孔导度下降,可能是由于镉通过影响光合机构或暗反应酶活性影响光合作用<sup>[10-11]</sup>,而且净光合速率随镉浓度的增加而下降加剧,表明镉对玉米光合作用的影响具有浓度效应。

### 2.2.4 胞间 CO<sub>2</sub> 浓度

玉米的胞间 CO<sub>2</sub> 浓度(Ci)随光强的增加而减小,光照强度在 0~400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 范围内,急剧下降,随后保持在一种相对平缓的状态(图 2-D)。细胞间隙CO<sub>2</sub> 浓度大小决定于外界大气 CO<sub>2</sub> 通过气孔进入以及细胞内部光合器官同化共同作用的结果。在较低光强时,镉胁迫导致胞间 CO<sub>2</sub> 浓度较对照下降更为迅速,随后随光强增加胞间 CO<sub>2</sub> 浓度又低于对照处理。低光强下,镉胁迫对气孔的限制起到较为重要的作用。产生该结果的原因可能是随着镉处理浓度的升高,引起细胞抗氧化酶活性的变化,导致酶结构变化,活性丧失,最终使 Pn 逐步下降,从而光合作用同化 CO<sub>2</sub> 量减少;也可能是随着镉处理浓度的升高,蒸腾速率逐步降低,细胞间隙 CO<sub>2</sub> 向外扩散能力减弱;或者是随着镉处理浓度的升高,气孔关闭程度加强,细胞间隙 CO<sub>2</sub> 向外排出的阻力增加。

## 3 结论与讨论

高浓度镉胁迫下玉米叶片叶绿素含量下降,可能

表 2 镉胁迫下净光合速率光响应曲线模拟参数

Table 2 Photosynthetic parameters of cultivars in response to light in Cd stress

| 镉处理<br>Cd treatment/<br>mg·kg <sup>-1</sup> | 光补偿点 Light<br>compensation point(LCP)/<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 光饱和点 Light<br>saturation point(LSP)/<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 光饱和时的 Pn The<br>maximum photosynthetic rate/<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> | 表观量子效率<br>Apparent quantum yield(AQY)/<br>μmol·mol <sup>-1</sup> | 暗呼吸速率<br>Dark respiratory rate/<br>μmol·m <sup>-2</sup> ·s <sup>-1</sup> |
|---------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------|
| CK(0.32)                                    | 12.12±1.45 <sup>c</sup>                                                         | 1 500±52.51 <sup>b</sup>                                                      | 17.3±1.25 <sup>c</sup>                                                                | 0.039±0.001 03 <sup>b</sup>                                      | -0.48±0.037 <sup>c</sup>                                                 |
| 1                                           | 26.52±2.37 <sup>b</sup>                                                         | 1 945±45.67 <sup>a</sup>                                                      | 37.7±3.41 <sup>a</sup>                                                                | 0.046±0.001 32 <sup>a</sup>                                      | -1.24±0.041 <sup>b</sup>                                                 |
| 5                                           | 26.51±3.05 <sup>b</sup>                                                         | 1 630±37.35 <sup>b</sup>                                                      | 27.2±1.56 <sup>b</sup>                                                                | 0.047±0.001 12 <sup>a</sup>                                      | -1.25±0.033 <sup>b</sup>                                                 |
| 15                                          | 31.03±2.55 <sup>b</sup>                                                         | 1 443±43.55 <sup>c</sup>                                                      | 15.6±1.47 <sup>c</sup>                                                                | 0.043±0.001 41 <sup>b</sup>                                      | -1.34±0.063 <sup>b</sup>                                                 |
| 50                                          | 36.44±2.75 <sup>b</sup>                                                         | 1 394±57.42 <sup>c</sup>                                                      | 16.01±1.35 <sup>c</sup>                                                               | 0.041±0.001 25 <sup>b</sup>                                      | -1.47±0.051 <sup>ab</sup>                                                |
| 100                                         | 51.66±4.35 <sup>a</sup>                                                         | 1 410±51.25 <sup>c</sup>                                                      | 10.35±0.51 <sup>d</sup>                                                               | 0.031±0.001 17 <sup>c</sup>                                      | -1.64±0.032 <sup>a</sup>                                                 |

是由于镉与相关酶作用抑制叶绿素前体的合成,也可能是在镉胁迫下活性氧在细胞中增加,使更多的  $O_2$ -和  $H_2O_2$  等扩散到叶绿体内,从而参与了对叶绿素的降解<sup>[13]</sup>,或直接破坏叶绿体微结构,降低叶绿素的含量<sup>[14]</sup>。高浓度镉胁迫下 Cha/Chb 的比值也发生了变化,在镉浓度为  $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$  时 Cha/Chb 的比值显著减小。Cha/Chb 的比值代表着类囊体的垛叠程度,类囊体的垛叠程度越小,光抑制越强。高浓度镉胁迫下 Cha/Chb 的比值降低,意味着类囊体的垛叠程度减小,光抑制增强,PS II 光化学效率降低,从而降低了光合速率<sup>[15-16]</sup>。

低浓度镉处理下叶片的叶绿素含量下降得少, Cha/Chb 的比值降幅小,所以光合速率下降的幅度较小;相反,高浓度镉处理下降幅度较大。叶绿素含量的降低也影响到了光合速率的下降。光合速率的降低也可能是因镉能破坏光合器官,特别是光捕获器 II 及光合系统 II 和 I,对 PS II 电子传递有抑制作用<sup>[17-18]</sup>;镉还能引起 PS II 捕光叶绿素蛋白质复合物部分解聚,这种物质在光能的吸收、传递以及激发能在两个光系统间的分配和调节方面起着重要作用,这种复合物的减少必然影响光系统的正常功能。

光是植物进行光合作用的能量来源,在一定范围内提高光强可以增加植物叶片对光能的吸收从而增大光合速率。但是随着光强的增加,当植物吸收的光能超过光合作用所能利用的能量时,就会出现过剩光能,造成光合反应中心的光抑制甚至光氧化,损伤光合机构<sup>[19]</sup>。高浓度镉处理下由于光合速率的下降,导致细胞间  $CO_2$  利用效率降低,虽然叶片的气孔导度减小,但变化幅度较小,最终造成细胞内  $CO_2$  的累积,使细胞内  $CO_2$  浓度上升。原因可能是镉影响了保卫细胞中的  $K^+$ ,  $Ca^{2+}$  等离子和脱落酸,从而影响了气孔的开张<sup>[20]</sup>。高浓度镉胁迫 ( $15$ 、 $50$ 、 $100\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 导致玉米叶片光合速率、气孔导度和蒸腾速率下降,光补偿点提高,光饱和点和表观量子效率降低,暗呼吸速率升高;低浓度镉胁迫 ( $1$ 、 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ) 则提高光补偿点、光饱和点和表观量子效率,降低暗呼吸速率。在同一光照强度下随镉胁迫浓度增加玉米叶片各光合参数从总的趋势看  $P_n$  和气孔导度减小时,胞间  $CO_2$  浓度却增加,表明叶肉消耗  $CO_2$  的能力降低,非气孔因素可能是  $P_n$  降低的主要原因,表明在镉胁迫条件下,玉米净光合速率随着胁迫浓度的增加而下降可能主要由非气孔限制所致。

## 参考文献:

- [1] 张金彪, 黄维南. 镉对植物的生理生态效应的研究进展[J]. 生态学报, 2000, 20(3): 514-523.  
ZHANG Jin-biao, HUANG Wei-nan. Advances on physiological and ecological effects of cadmium on plants[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2000, 20(3): 514-523.
- [2] 孙光闻, 朱祝军, 陈日远, 等. 镉对小白菜根细胞质膜氧化还原系统的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(3): 65-67.  
SUN Guang-wen, ZHU Zhu-jun, CHEN Ri-yuan, et al. Effect of cadmium on the redox system of root plasma membrane in pakchoi[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2007, 22(3): 65-67.
- [3] Andrei A B, Verali S, Viktor E T, et al. Genetic variability in tolerance to cadmium and accumulation of heavy metals in pea (*Pisum sativum* L.)[J]. *Euphytica*, 2003, 131: 25-35.
- [4] 韩希英, 宋凤斌, 王波, 等. 土壤水分胁迫对于玉米光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2006, 21(5): 28-32.  
HAN Xi-ying, SONG Feng-bin, WANG Bo, et al. Effects of soil water stress on photosynthetic characteristics of Maize[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2006, 21(5): 28-32.
- [5] 王建林, 房全孝, 李举华, 等. 施肥对小麦叶片光合特性的影响[J]. 华北农学报, 2007, 22(2): 115-118.  
WANG Jian-lin, FANG Quan-xiao, LI Ju-hua, et al. Effect of photosynthetic characteristic of wheat under different fertilization[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2007, 22(2): 115-118.
- [6] Bassman J, Zwierj C. Gas exchange characteristics of *Populus trichocarpa*, *Populus deltoids* and *Populus trichocarpa* X *P. deltoids* clone[J]. *Tree Physiology*, 1991, 8: 145-149.
- [7] MINOLTA Co, Ltd. Chlorophyll SPAD-502 Instruction Manual[M]. [S. I.] Radiometric Instruments Operations, 1989.
- [8] VAN Assche F, Clijsters H. Effects of metal on enzyme activity in plants[J]. *Plant Cell Environment*, 1990, 13: 195-206.
- [9] Devi S R, Prasadm. Copper toxicity in *Ceratophyllum demersum* L. (Coontail), a free floating macrophyte: responses of antioxidant enzymes and antioxidants[J]. *Plant Science*, 1998, 138: 157-165.
- [10] Maksymiec W, Wójcik M, Krupaz. Variation in oxidative stress and photochemical activity in *Arabidopsis thaliana* leaves subjected to cadmium and excess copper in the presence or absence of jasmonate and ascorbate[J]. *Chemosphere*, 2007, 66: 421-427.
- [11] Bradford M. A rapid sensitive technique of determine protein concentration[J]. *Anal Biochem*, 1976, 72: 248-250.
- [12] Huff A. Peroxidase-catalysed oxidation of chlorophyll by hydrogen peroxide[J]. *Phytochemistry*, 1982(21): 261-265.
- [13] Liang Peng, Arthur B P. Differential display of eukaryotic messenger RNA by means of the polymerase chain reaction[J]. *Science*, 1992, 25: 967-971.
- [14] 郭书奎, 赵可夫. NaCl 胁迫抑制玉米幼苗光合作用的可能机理[J]. 植物生理学报, 2001, 27(6): 461-466.  
GUO Shu-kui, ZHAO Ke-fu. The possible mechanisms of NaCl inhibit photosynthesis of maize seedlings [J]. *Acta Phytophysiologica Sinica*,

- 2001, 27(6):461-466.
- [15] 许玉凤, 曹敏建, 王文元, 等. 玉米耐铝毒的基因型筛选[J]. 玉米科学, 2004, 12(1):33-35.
- XU Yu-feng, CAO Min-jian, WANG Wen-yuan, et al. Screen on genotypes of aluminum toxicity-tolerance in maize[J]. *Journal of Maize Sciences*, 2004, 12(1):33-35.
- [16] Krupa Z. Cadmium-induced changes in the composition and structure of the light-harvesting complex II in radish cotyledons[J]. *Physiol Plant*, 1988, 73:518-524.
- [17] Siedlecha A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris*[J]. *Plant Physiology*, 1996, 34:833-841.
- [18] 杨丹慧, 许春辉, 赵福洪, 等. Cd 离子对菠菜叶绿体光系统 II 的影响[J]. 植物学报, 1989, 31(9):702-707.
- YANG Dan-hui, XU Chun-hui, ZHAO Fu-hong, et al. The effect of cadmium on photosystem II in spinach chloroplasts[J]. *Acta Botanica Sinica*, 1989, 31(9):702-707.
- [19] 齐 华, 白向历, 孙世贤, 等. 水分胁迫对玉米叶绿素荧光特性的影响[J]. 华北农学报, 2009, 24(3):102-106.
- QI Hua, BAI Xiang-li, SUN Shi-xian, et al. Effects of water stress on chlorophyll fluorescence parameters of maize[J]. *Acta Agriculture Boreali-Sinica*, 2009, 24(3):102-106.
- [20] Das P, Samantaray S, Rout G R. Studies on cadmium toxicity in plants: a review[J]. *Environment Pollution*, 1997, 98:29-36.

## 《农业环境科学学报》2009 年审稿专家名录

(按姓氏拼音排序)

|     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 安黎哲 | 包木太 | 曹会聪 | 曹 军 | 曹云者 | 柴同杰 | 常志州 | 陈鸿汉 | 陈怀满 | 陈 慧 | 陈家长 | 陈来国 |
| 陈能场 | 陈书涛 | 陈晓国 | 陈晓英 | 陈 欣 | 陈 欣 | 成杰民 | 崔德杰 | 崔岩山 | 党 志 | 丁诗华 | 丁维新 |
| 丁振华 | 董元华 | 窦 森 | 杜新贞 | 多立安 | 范丙全 | 封 克 | 冯启言 | 高 定 | 葛 飞 | 葛 滢 | 耿金菊 |
| 龚道新 | 郭红岩 | 郭书海 | 韩鲁佳 | 韩照祥 | 郝红英 | 何成达 | 何 江 | 何品晶 | 胡红青 | 胡克林 | 胡荣桂 |
| 华 珞 | 化党领 | 黄 标 | 黄 丽 | 黄圣彪 | 黄 耀 | 黄 艺 | 黄益宗 | 黄占斌 | 籍国东 | 季 民 | 金朝晖 |
| 金 辉 | 孔志明 | 兰时乐 | 雷 梅 | 黎华寿 | 李本纲 | 李纯厚 | 李发生 | 李芳柏 | 李锋民 | 李国学 | 李恒鹏 |
| 李花粉 | 李 华 | 李 季 | 李 健 | 李培军 | 李强坤 | 李取生 | 李文朝 | 李艳霞 | 李永华 | 李永涛 | 李玉娥 |
| 李 元 | 李正魁 | 栗茂腾 | 廖柏寒 | 廖晓勇 | 廖新伟 | 廖宗文 | 林春野 | 林匡飞 | 林玉锁 | 刘春光 | 刘 峰 |
| 刘广立 | 刘国光 | 刘惠芬 | 刘景春 | 刘景双 | 刘静玲 | 刘可星 | 刘 鹏 | 刘瑞民 | 刘世亮 | 刘 宛 | 刘文霞 |
| 刘文新 | 刘 翔 | 刘学军 | 刘 鹰 | 刘云国 | 龙 健 | 龙新宪 | 卢会霞 | 卢少勇 | 吕家琬 | 吕贻忠 | 栾兆擎 |
| 罗启仕 | 罗兴章 | 马红亮 | 马宏瑞 | 孟昭福 | 莫测辉 | 慕 卫 | 欧晓明 | 潘灿平 | 秦伯强 | 仇荣亮 | 任明忠 |
| 阮维斌 | 沈 标 | 沈根祥 | 沈新强 | 沈振国 | 盛下放 | 施庆珊 | 施卫民 | 石利利 | 石元亮 | 司友斌 | 宋永会 |
| 孙 波 | 孙 成 | 孙志梅 | 汤 锋 | 汤 利 | 唐世荣 | 唐文浩 | 唐欣昀 | 唐延林 | 铁柏清 | 童裳伦 | 涂 从 |
| 涂仕华 | 涂书新 | 王朝辉 | 王代长 | 王德汉 | 王 果 | 王慧忠 | 王火焰 | 王金花 | 王 军 | 王凯荣 | 王克坚 |
| 王里奥 | 王小治 | 王晓燕 | 王 新 | 王学东 | 王学军 | 王雨春 | 王玉军 | 王玉秋 | 韦革宏 | 魏 静 | 魏树和 |
| 魏自民 | 文湘华 | 吴创之 | 吴丰昌 | 吴景贵 | 吴良欢 | 吴启堂 | 吴群河 | 吴淑杭 | 吴 伟 | 吴沿友 | 吴耀国 |
| 吴永贵 | 吴中红 | 夏北成 | 肖 琳 | 肖 昕 | 肖羽堂 | 谢国生 | 谢正苗 | 谢忠雷 | 熊 丽 | 徐敦明 | 徐 华 |
| 徐明岗 | 徐仁扣 | 徐星凯 | 许木启 | 许修宏 | 严重玲 | 阎百兴 | 颜昌宙 | 颜晓元 | 晏维金 | 杨长明 | 杨 琛 |
| 杨俊诚 | 杨林章 | 杨柳燕 | 杨仁斌 | 杨 劭 | 姚丽贤 | 叶芝祥 | 仪慧兰 | 尹大强 | 于红霞 | 虞云龙 | 袁红莉 |
| 袁 涛 | 袁 星 | 袁旭音 | 岳 明 | 曾清如 | 张晋京 | 张克强 | 张丽梅 | 张仁陟 | 张世熔 | 张树清 | 张 卫 |
| 张卫建 | 张兴昌 | 张迎梅 | 张余良 | 张玉华 | 张增强 | 章明奎 | 赵炳梓 | 赵建庄 | 赵立欣 | 赵同科 | 赵晓松 |
| 郑永权 | 郑有飞 | 郑袁明 | 郑 正 | 周东美 | 周 青 | 周学永 | 周运超 | 朱 波 | 朱 琳 | 朱鲁生 | 朱茂旭 |
| 朱义年 | 宗良纲 | 邹建文 |     |     |     |     |     |     |     |     |     |

正是因为有以上专家认真及时的审稿,才使刊物的稿件质量得到有力的保证,使创新性的科研成果得以即时发表,使科技新人脱颖而出。在此,本刊编辑部对各位专家的辛勤工作表示诚挚的感谢。为不断壮大审稿专家队伍,适应日益增多的稿源需求,我们衷心地希望广大作者和读者踊跃推荐审稿专家候选人,以促进刊物的不断发展和创新。

(本刊编辑部)