植物营养与肥料学报 2005,11(5): 700 - 703
Plant Nutrition and Fertilizer Science

镉对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响

孙光闻[1,2], 朱祝军[1*], 方学智[1,3], 陈日远[2], 刘厚诚[2]
(1 浙江大学农业与生物技术学院园艺系,浙江杭州 310029; 2 华南农业大学园艺学院,广东广州 510642;
3 中国林业科学研究院亚热带林业研究所,浙江富阳 314000)

Effect of cadmium on photosynthesis and chlorophyll fluorescence of pakchoi

SUN Guang-wen[1,2], ZHU Zhu-jun[1*], FANG Xue-zhi[1,3], CHEN Ri-yuan[2], LIU Hou-cheng[2]
(*1 Dept. of Hort., College of Agric. and Biotech., Zhejiang Univ., Hangzhou, 310029, China; 2 College of Hort., South China Agric. Univ., Guangzhou 510642, China; 3 Research Inst. of Subtrop. For., CAF, Fuyang, Zhejiang 314000, China.*)

中图分类号: S634.1; Q945.1　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1008-505X(2005)05-0700-04

镉(Cd)是植物生长的有毒元素,在植物体中过量积累可以对植物造成毒害[1-2]。Cd 能通过降低叶绿素的含量[3-4]、改变叶绿体的超微结构[5]、抑制与光合作用有关的酶活性[6-7]等途径影响光合作用。有关 Cd 胁迫条件下,植物净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)下降在小白菜[8]等植物上已有报道。光合作用是植物生长的物质和能量来源的基础,了解 Cd 对光合作用的影响及机理十分重要。本文以小白菜为材料,研究了 Cd 对小白菜光合作用及叶绿素荧光参数的影响。

1 材料与方法

试验于 2003 年 3～5 月在浙江大学蔬菜研究所玻璃温室中进行。小白菜品种为杭州油冬儿。种子经消毒处理后播于湿润的蛭石中,两周后将生长一致的幼苗移栽到装有 4 L 营养液的塑料桶中,每桶 4 株。全营养液配方如下(mmol/L): $Ca(NO_3)_2$ 3.0、KNO_3 4.0、KH_2PO_4 1.0、$MgSO_4$ 1.0、$MnCl_2$ 3.6×10^{-3}、H_3BO_3 4.5×10^{-2}、$CuSO_4$ 8×10^{-4}、$ZnSO_4$ 1.5×10^{-3}、H_2MoO_4 9.1×10^{-5}、EDTA-Fe 9.0×10^{-2}(pH 6.0)。预培养 2 周后,向营养液中加入 $CdSO_4$,Cd 的浓度(mg/L)为 0(Cd0),1(Cd1)和 10(Cd10)。营养液每 3d 更换 1 次,并连续通气。处理 10 d 后,采用英国 PP-systems 公司生产的 Ciras-1 便携式光合作用测定仪测定叶片的净光合速率(Pn)、气孔导度(Gs)、胞间 CO_2 浓度(Ci)、蒸腾速率(Tr)等。测定温度为 25℃,光照强度为 600 μmol/(m^2·s),CO_2 浓度为 350 μL/L。

采用 FMS2 型便携式荧光仪(英国 Hansatech 公司生产)测定叶片 PSⅡ光化学效率(Fv/Fm)和 PSⅡ光合电子传递量子效率(ΦPSⅡ)、光化学淬灭系数(qP)及非光化学淬灭系数(qN)等参数。测定前暗适应 20 min,测定时先照射检测光 [< 0.05μmol/(m^2·s)],再照射饱和脉冲光[12000 μmol/(m^2·s)]。每处理重复 3 次,每重复测定 4 株。叶绿素及类胡萝卜素含量测定参考 Arnon 方法[9]。

2 结果与分析

2.1 Cd 对小白菜叶绿素及类胡萝卜素含量的影响

从图 1 看出,Cd 对小白菜叶片叶绿素及类胡萝卜素含量的影响因营养液中 Cd 浓度不同而有差异。Cd1 处理(Cd 1 mg/L)小白菜 Chla、Chlb、总 Chl 及类胡萝卜素(Car)含量均略有升高,但与对照相比差异不显著; Cd10 处理(Cd10 mg/L)则显著降低小白菜 Chla、Chlb、总 Chl 及 Car 含量。

2.2 Cd 对小白菜光合作用的影响

随 Cd 处理浓度增加,小白菜 Pn 显著降低,Cd10 处理比对照下降 52.2%。两个 Cd 水平处理后,小白菜 Gs 都下降且与浓度无相关, Cd10 处理后 Gs 下降 16.4%; Tr 变化趋势与 Gs 相同; 小白菜 Ci 值显著增加,且随浓度增加而幅度加大(图 2)。

收稿日期: 2004-12-06　　**修改稿收到日期**: 2005-04-18
作者简介: 孙光闻(1968—),女,吉林省公主岭人,博士,讲师,主要研究方向为蔬菜逆境生理。* 通讯作者

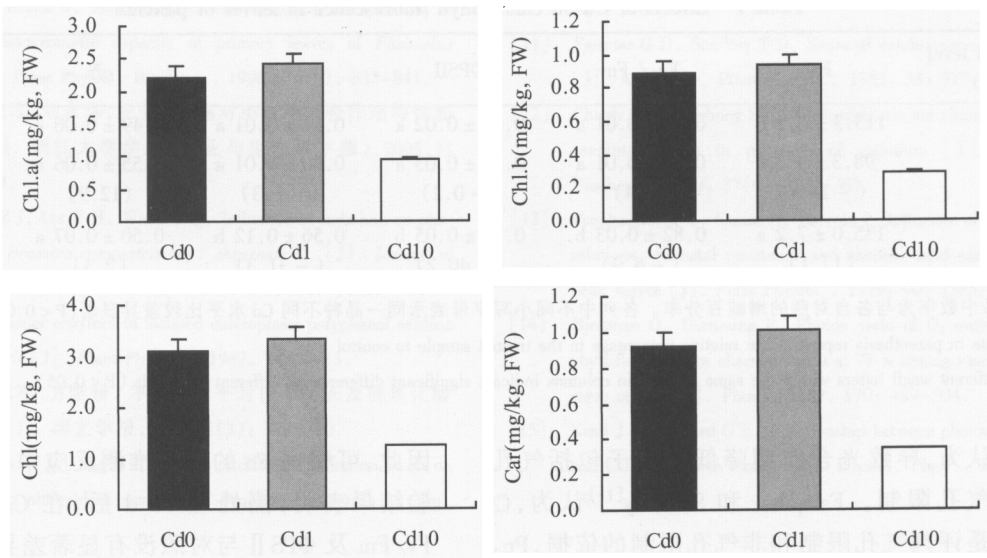

图 1　小白菜叶片叶绿素及类胡萝卜素含量

Fig. 1　Contents of chlorophyll and carotenoids in leaf of pakchoi

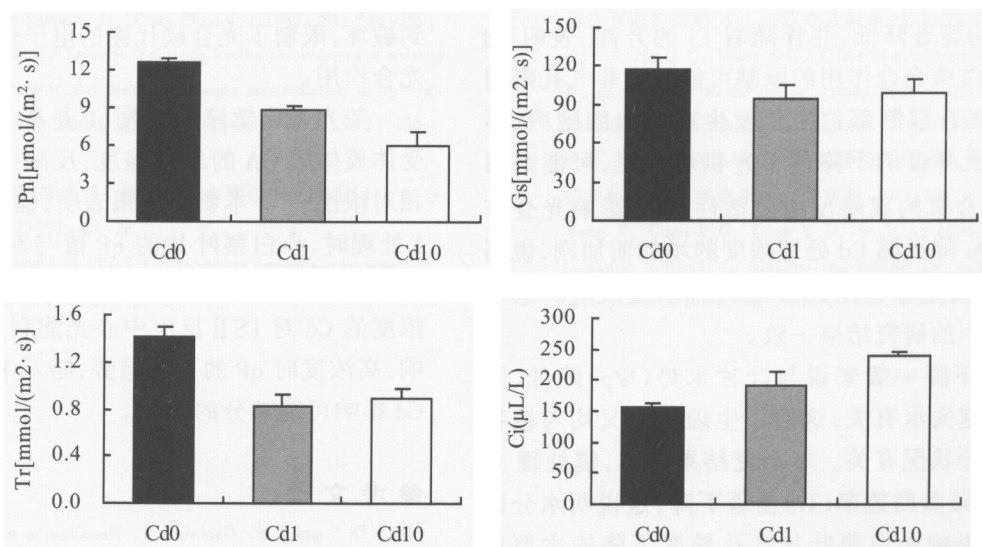

图 2　镉对小白菜光合作用的影响

Fig. 2　Effects of Cd on phytosynthsis of pakchoi

2.3　Cd 对小白菜叶绿素荧光参数的影响

为进一步探讨 Cd 处理对小白菜光合作用的影响，对小白菜叶片叶绿素荧光进行了测定。从表 1 看出，Cd1 处理时，小白菜 PSⅡ光化学效率 Fv/Fm、光合电子传递量子效率 ΦPSⅡ、光化学淬灭系数 qP 以及光合电子传递速率 ETR 与对照没有显著差异；Cd10 处理则使这些指标显著下降。2 个 Cd 处理对小白菜的非光化学淬灭系数 qN 没有显著影响，初始荧光 Fo 随 Cd 浓度增加而呈先降后增的趋势。

3　讨论

已有研究表明，镉对杭州油冬儿小白菜生长的影响随着镉处理浓度增加而增加，且地上部比根部对镉更敏感[10]。本试验结果表明，镉处理 10 d 后，Cd 1 处理对小白菜的 Chla、Chlb、总 Chl 及 Car 的含量均无显著影响，而 Cd10 处理则显著降低 Chla、Chlb、总 Chl 及 Car 的含量。叶绿素含量降低可能是引起小白菜叶片光合速率下降的原因之一。

表1 Cd对小白菜叶片叶绿素荧光参数的影响

Table 1 Effects of Cd on chlorophyll fluorescence in leaves of pakchoi

Cd水平 Cd level (mg/L)	Fo	Fv / Fm	ΦPSII	qP	qN	ETR
0	115.3±6.5 b	0.86±0.01 a	0.61±0.02 a	0.81±0.01 a	0.49±0.06 a	101.8±4.0 a
1	98.3±9.3 c (-14.7)	0.88±0.01 a (2.4)	0.60±0.03 a (-0.2)	0.80±0.01 a (-1.3)	0.55±0.06 a (12.9)	101.5±4.9 a (-0.20)
10	135.0±7.2 a (17.1)	0.82±0.03 b (-6.9)	0.36±0.05 b (-40.2)	0.56±0.12 b (-31.3)	0.50±0.07 a (2.3)	60.6±8.0 b (-40.5)

注：括号中数字为与各自对照的增减百分率。各列中不同小写字母表示同一品种不同Cd水平比较差异显著($P<0.05$)。

Note: Data in parenthesis represent the relative percentage in the treated sample to control.

Different small letters within the same cultivar in columns indicate significant difference at different Cd levels ($P<0.05$).

通常认为，导致光合作用降低的因子包括气孔限制和非气孔限制。Farquhar和Sharkey[11]认为，Ci值的大小是评判气孔限制和非气孔限制的依据，Pn、Gs和Ci值同时下降时，Pn的下降为气孔限制；相反，如果叶片Pn的降低伴随着Ci值的提高，说明光合作用的限制因素是非气孔限制。本试验结果表明，镉处理10 d后，2个水平的Cd处理使小白菜的Pn和Gs均显著降低，并伴随着Ci的升高，表明Cd处理对小白菜光合作用的限制可能是由非气孔限制引起的；光合限制部位主要发生在叶肉细胞内，不是由于气孔导度的下降使CO_2供应不足，可能是通过影响光合机构或暗反应酶活性[12]来影响光合作用，而且Pn降低随Cd处理浓度的增加而加剧，说明Cd对小白菜光合作用的影响具有浓度效应。这与李德明等[8]的研究结果一致。

Gs的下降一般来说与叶片水势(Ψp)降低、气孔保卫细胞失水有关，这两项生理指标又均与植物组织的水分状况有关。本研究结果表明，镉处理10 d后，小白菜蒸腾速率(Tr)显著下降，这说明水分因子可能是影响小白菜叶片气孔导度下降的主要原因。也可能是由于Cd引起了叶片ABA水平增加而导致气孔关闭[13]。

可变荧光和最大荧光之比(Fv/Fm)被称为PSⅡ的光化学效率。在非逆境条件下，多种植物的这一效率值在0.85左右，在逆境条件下，这一效率值明显降低[14]。Fv/Fm常作为光抑制和PSⅡ复合体受伤害的指标。PSⅡ光合电子传递量子效率ΦPSⅡ正比于非环式电子传递速率，反映PSⅡ反应中心的活性[15]，也是PSⅡ功能的指标之一。

PSⅡ受胁迫时，通常引起初始荧光Fo水平的变化。PSⅡ天线的热耗散增加导致Fo的降低，而PSⅡ反应中心的破坏或可逆失活引起Fo水平的增加。因此，可根据Fo的变化推测反应中心的状况。本试验结果表明，镉处理10 d后，在Cd 1处理小白菜Fv/Fm及ΦPSⅡ与对照没有显著差异，Fo水平降低，表明1 mg/L Cd未引起小白菜光抑制的发生；而Cd10处理后，小白菜Fv/Fm及ΦPSⅡ显著降低，同时Fo水平上升，说明在高浓度Cd处理下小白菜植株发生了光抑制，造成了PSⅡ的反应中心失活或遭到破坏，限制了光合碳代谢的电子供应，从而抑制了光合作用。

荧光光化学淬灭系数qP是衡量PSⅡ原初电子受体质体醌QA的氧化程度，反映PSⅡ开放中心的相对浓度[15]。本研究结果表明，镉处理10 d后，Cd 1处理时，小白菜叶片的qP值与对照无显著差异，Cd10处理使小白菜叶片的qP值显著下降，表明低浓度的Cd对PSⅡ反应中心光能利用效率无明显影响，高浓度时qP的下降趋势，暗示PSⅡ反应中心受Cd影响可能部分的关闭。

参考文献：

[1] Di Toppi L S, Gabbrieli R. Response to cadmium in higher plants [J]. Environ. Expri. Bot., 1999, 41: 105-130.

[2] Clysters H, Van Assche F. Inhibition of photosynthesis by metals [J]. Photosynth. Res., 1985, 7: 31-40.

[3] Stobart A K, Griffiths W T, Ameen-Bukhari I *et al*. The effect of Cd^{2+} on the biosynthesis of chlorophyll in leaves of barley [J]. Physiol. Plant., 1985, 63: 293-298.

[4] Somashekaraiah B V, Padmaja K, Prasad A R K. Phytotoxicity of cadmium ions on germinating seedlings of mung bean (*Phaseolus vulgaris*)-involvement of lipid peroxides in chlorophyll degradation [J]. Physiol. Plant., 1992, 85: 85-89.

[5] Barceló J, Vazquez M, Poschenrieder C. Structural and ultrastructural disorders in cadmium treated bush bean plants (*Phaseolus vulgaris* L.) [J]. New Phytol., 1988, 108: 37-49.

[6] Baszyński T, Wajda L, Krol M *et al*. Photosynthetic activities of cadmium treated tomato plants [J]. Physiol. Plant., 1980, 48: 365-

370.

[7] Siedlecka A, Krupa Z. Interaction between cadmium and iron and its effects on photosynthetic capacity of primary leaves of *Phaseolus vulgaris* [J]. Plant Physiol. Biochem., 1996, 34(6): 833-841.

[8] 李德明,朱祝军,刘永华,王玉清. 镉对小白菜光合作用特性影响的研究[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版),2005,31(4):459-464.

Li D M, Zhu Z J, Liu Y H, Wang Y Q. Influence of cadmium on photosynthesis of *Brassica campestris* ssp. *chinensis* L. [J]. Journal of Zhejiang University (Agric. & Life Sci.), 2005,31(4):459-464.

[9] Arnon D L. Copper enzymes in isolated chloroplasts polyphenol oxidase in *Beta vulgaris* [J]. Plant Physiol., 1949, 24: 1-15.

[10] 孙光闻,朱祝军,方学智. 不同镉水平对白菜生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 园艺学报,2004,31(3): 378-380.

Sun G W, Zhu Z J, Fang X Z. Effects of different cadmium levels on the growth and antioxidant enzymes in *Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* (L.) Makino [J]. Acta Horticulturae Sinica., 2004, 31(3): 378-380.

[11] Farquar G D, Sharkey T D. Stomatal conductance and photosynthesis [J]. Ann. Rev. Plant Physiol., 1982, 33: 317-345.

[12] Chugh L K, Sawhney S K. Photosynthetic activities of *Pisum sativum* seedlings grown in presence of cadmium [J]. Plant Physiol. Biochem., 1999, 37(4): 297-303.

[13] Poschenrieder C, Gunse B, Barceló J. Influence of cadmium on water relations, stomatal resistance and abscisic acid content in expanding bean leaves [J]. Plant Physiol., 1989, 90: 1365-1371.

[14] Bjokman O, Dernming B. Photon yield of O_2 evolution and chlorophyll fluorescence characteristics at 77 K among vascular plants of diverse origins [J]. Planta. 1987, 170: 489-504.

[15] Krall J P, Edward G E. Relationship between photosystem Ⅱ activities and CO_2 fixation in leaves [J]. Physiol. Plant., 1992, 86: 180-187.