

# Cu胁迫对脐橙幼苗光合特性的影响

张国军 江虹 郑丽芹 陈娟 邱栋梁\* 刘星辉

(福建农林大学园艺学院 福州 350002)

**摘要** 以“脐橙 52”为材料,采用水培方法,研究了 Cu 胁迫对脐橙幼苗光合作用的影响。结果表明,0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理的脐橙叶片叶绿素含量比对照显著增加,而 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使叶绿素含量下降,且 Cu 浓度越高下降幅度越大;类胡萝卜素含量随 Cu 浓度增加不断下降。Cu  $\geq 5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  的胁迫造成光合效率降低,净光合速率、光饱和点下降。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使脐橙叶片蒸腾速率和气孔导度增加,而 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  和 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使蒸腾速率和气孔导度下降,40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理的两个指标变化不大。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理叶绿体光还原活性比对照有所增加,而 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理叶绿体光还原活性受到抑制。说明低浓度 Cu 处理可促进脐橙幼苗的光合作用,而高浓度有明显的抑制作用。

**关键词** 脐橙 Cu 胁迫 光合作用 光还原活性

**中图分类号:** Q945.78 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2009)01-0130-05

## Effect of copper stress on photosynthesis of navel orange seedlings

ZHANG Guo-Jun, JIANG Hong, ZHENG Li-Qin, CHEN Juan, QIU Dong-Liang, LIU Xing-Hui

(College of Horticulture, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

**Abstract** The hydroponic method was used to study the photosynthetic characteristics of navel orange “No.52” seedlings under Cu stress. The study shows that chlorophyll (Chl.) content under 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  of Cu increases significantly, but decreases under 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and 40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  of Cu. Carotenoid content decreases with increasing Cu concentration. Net photosynthetic rate and light saturation point reduces under Cu stress as Cu concentration exceeds 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ . 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  of Cu improves, but 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  of Cu decrease transpiration rate and stomatal conductance of orange. These parameters do not change significantly under 40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  of Cu. At the same time, high Cu concentration (5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ , 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  and 40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) restricts photoreduction activity. The findings indicate that lower Cu concentration improves photosynthesis while high Cu concentration inhabits it.

**Key words** Navel orange(*Citrus sinensis* Osbeck), Copper stress, Photosynthesis, Photoreduction activity

(Received Sept. 15, 2007; accepted May 10, 2008)

近年来,随着含 Cu 杀菌剂的大量使用、Cu 矿的过度开采及工业 Cu 污染物的大量排放,Cu 对植物的毒害与日俱增。Cu 对作物毒害效应的表现之一是抑制生长和使产量降低<sup>[1, 2]</sup>。刘春生等<sup>[3]</sup>研究表明,褐土施加过量 Cu 会抑制苹果新梢伸长,且抑制程度随 Cu 施入量增加而加剧。土壤施加高剂量 Cu 的苹果叶片网纹状失绿,呈黄色或黄白色,叶片边缘褐色干枯,严重时部分叶片枯死。酸性土壤如施 Cu 过量或波

尔多液残留累积会引起柑橘树皮开裂和流胶,出现部分落叶,或引起大量落叶,枝梢枯萎,甚至全树死亡<sup>[4]</sup>。过量 Cu 还可引起柑橘须根腐烂,干粗和树冠容积减小。Alva 和 Chen<sup>[5]</sup>指出随外源 Cu 浓度增大,柑橘幼苗枝叶和根干重显著下降。有关 Cu 胁迫对果树光合作用的影响尚未见报道,而果树的光合作用直接关系到果品的产量和品质。因此本文探讨 Cu 胁迫对脐橙光合作用的影响,为柑橘生产提供理论基础。

\* 通讯作者: 邱栋梁, 博士, 教授, 博士生导师。E-mail: qiudl1970@yahoo.com.cn

张国军(1979~),男,硕士,主要从事果树生理研究。

收稿日期: 2007-09-15 接受日期: 2008-05-10

## 1 材料与方法

### 1.1 材料和苗木的处理

试验在福建农林大学校内试验地进行, 以 1 年生的柑橘品种“脐橙 52”嫁接苗(枳壳砧)为材料, 于 2004 年 7 月 10 日采用水培法培养, 恢复 45 d 后进行处理。

水培营养液采用 Alva 的配方<sup>[5]</sup>, 容器采用外壁漆黑的 10 L 的塑料桶, 每桶 1 株, 每桶装 8 L 培养液, 每 10 d 更换 1 次, 更换时调节 pH 至 6.5。每天定时通气 3 次, 每次 2 h。Cu 处理采用在营养液中加  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  的方法, 设  $0.1 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $20 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、 $40 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  4 个 Cu 浓度, 以不加  $\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$  的营养液为对照(CK), 每个处理设 3 个重复。在露天培养 3 个月后采样进行光合色素含量和叶绿体光还原活性测定。采样在早晨 8:00~9:00 进行, 叶样均取自苗木顶端向下第 2~4 片复叶。

### 1.2 测定指标和方法

#### 1.2.1 光合色素含量

用打孔器沿叶脉两侧打取 20 个直径为 0.5 cm 的叶圆片, 在黑暗中浸泡于 20 mL 混合液(乙醇 丙酮  $\text{H}_2\text{O}=4.5:4.5:1$ )中 24 h, 过滤后用分光光度计测定  $\text{OD}_{645}$  和  $\text{OD}_{663}$ , 参照波钦诺克<sup>[6]</sup>方法计算叶绿素 a (Chl. a)、叶绿素 b (Chl. b)及类胡萝卜素(Car.)含量。

#### 1.2.2 光合速率( $P_n$ )、蒸腾速率( $T_r$ )、气孔导度( $C_s$ )

采用美国 CID 公司生产的 CID-301 PS 光合作用测定系统测定, 开放式气路, 光响应曲线的 PAR 为  $0\sim 2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , Cu 胁迫 15 d 时测定。不同时期比较时 PAR =  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。选择同一叶片从处理前开始每隔 15 d 测定 1 次。

#### 1.2.3 叶绿体光还原活性(PS II 的电子传递活力)

按张志良等<sup>[7]</sup>的方法制备叶绿体, 并采用二氯酚靛酚(DCPIP)方法<sup>[7]</sup>测定叶绿体光还原活性。分别取 4.5 mL 反应混合液(2,6-D KCl NaCN 0.2 mol PBS 蔗糖 制备液=1 1 1 1 5 0.5)于各试管中, 并在每个试管内加入 0.5 mL 叶绿体悬浮液。在 40 klx 的白质光照 20 下水浴 30 s(以不照光为对照), 立即测定  $\text{OD}_{600}$ ,  $\text{OD}=\text{OD}_{\text{暗}}-\text{OD}_{\text{光}}$ 。用 2,6-D 制作标准曲线, 并计算出光还原活性。以  $\mu\text{mol} \cdot \text{mg}^{-1}$ (叶绿素)  $\cdot \text{h}^{-1}$  表示。

## 2 结果与分析

### 2.1 Cu 胁迫对脐橙叶片光合色素含量的影响

Cu 胁迫对脐橙叶片光合色素含量有明显影响(表 1)。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理下, Chl. a 和 Chl. b 含量分别比对照增加 8.62%、9.29%; 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20

$\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使 Chl. a 含量分别比对照下降 10.05%、22.45%、36.49%, Chl. b 含量下降 9.29%、22.59%、37.34%; 而 Car. 含量则随着 Cu 浓度增加而减少, 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理下, 分别比对照降低 11.51%、13.33%、18.67%和 27.88%。

表 1 Cu 胁迫对脐橙叶片色素含量的影响

Tab.1 Effect of Cu stress on contents of chlorophyll and carotenoid in leaves of navel orange  $\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$

Cu 浓度( $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ ) Cu concentration	叶绿素 a Chl. a	叶绿素 b Chl. b	类胡萝卜素 Car.
0(CK)	14.03 ± 0.25Bc	5.49 ± 0.16Bb	8.25 ± 0.24Aa
0.1	15.24 ± 0.32Aa	6.00 ± 0.20Aa	7.30 ± 0.15Bb
5	12.62 ± 0.28Cc	4.98 ± 0.20Cc	7.15 ± 0.30Bbc
20	10.88 ± 0.30Dd	4.25 ± 0.28Dd	6.71 ± 0.25Cc
40	8.91 ± 0.27Ee	3.44 ± 0.32Ee	5.95 ± 0.17Dd

不同大、小写字母表示 0.01、0.05 显著水平。下同。Small and capital letters indicate 5% and 1% significant difference. The same below.

### 2.2 Cu 胁迫对脐橙叶片气体交换的影响

#### 2.2.1 净光合速率

从图 1a 可见, Cu 处理下脐橙叶片净光合速率( $P_n$ )随光照强度增加而提高, 达到光饱和点时开始下降。CK 和 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理叶片  $P_n$  最大值出现在光合有效辐射为  $1200 \sim 1400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 而 20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理叶片  $P_n$  最大值出现在  $1000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右, 40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  出现在  $800 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  左右。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使脐橙叶片  $P_n$  在任何光强下都大于对照, 而 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使脐橙叶片  $P_n$  在任何光强下都小于对照, 并且处理浓度越大, 下降幅度越大, 光补偿点提高。

从图 1b 可以看出, Cu 处理时间越长, 浓度越大, 脐橙叶片  $P_n$  下降幅度越大。5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理 15 d 后  $P_n$  分别比对照下降 14.53%、17.81%、44.06%, 60 d 后下降 38.97%、67.88%、75.8%, 差异极显著( $P < 0.01$ )。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理下叶片  $P_n$  下降幅度前 15 d 小于对照, 15~60 d 大于对照; 其他浓度 Cu 处理下叶片  $P_n$  下降幅度在各时期均高于对照。Cu 浓度  $> 5 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  处理的植株前 15 d 下降幅度大于其他时期的下降幅度。

#### 2.2.2 蒸腾速率

从图 2a 可以看出, 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使脐橙叶片蒸腾速率( $T_r$ )在各光强下都比对照有所升高, 且变化趋势与对照相似, 即: 随光强增加  $T_r$  变大。20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理下, 叶片  $T_r$  随光强增加而不断下降, 且随光强增加下降幅度渐趋缓和, 在  $0 \sim 400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  光强范围内  $T_r$  大于对照, 当光强大

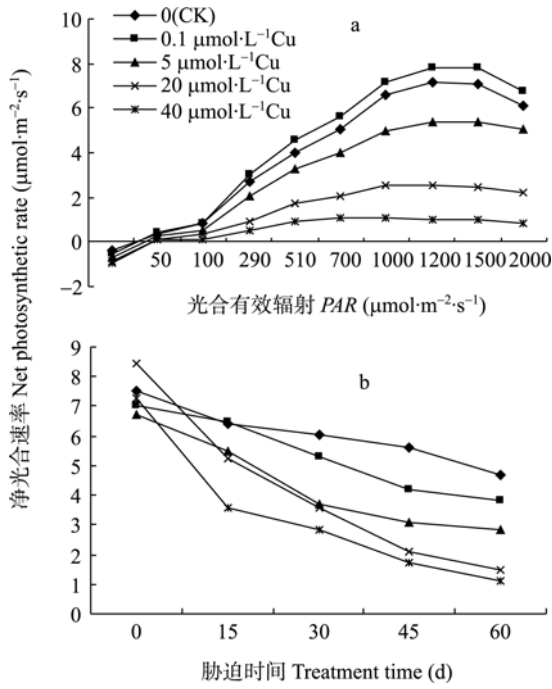


图 1 Cu 胁迫下脐橙叶片净光合速率对光强(a)和胁迫时间(b)的响应

Fig. 1 Responses of net photosynthetic rate of navel orange leaves under Cu stress to light intensity (a) and stress time (b)

于 400 μmol·m<sup>-2</sup>·s<sup>-1</sup> 后, 则显著小于对照; 40 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理下, 叶片 *Tr* 基本趋于稳定, 变化不明显, 但此时叶片 *Tr* 已经很小, 显著低于其他处理。

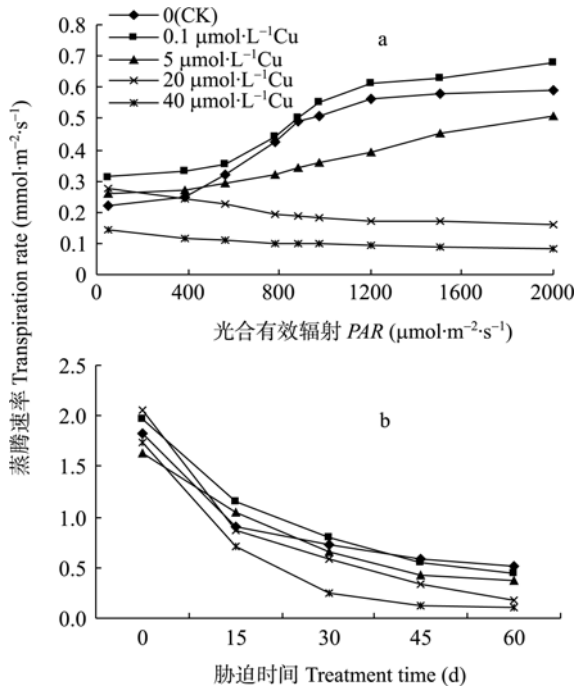


图 2 Cu 胁迫下脐橙叶片蒸腾速率对光强(a)和胁迫时间(b)的响应

Fig. 2 Responses of transpiration rate of navel orange leaves under Cu stress to light intensity (a) and stress time (b)

从图 2b 可以看出, Cu 处理下脐橙叶片 *Tr* 随处理时间和 Cu 浓度的增加而下降。0.1 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理下叶片 *Tr* 的下降幅度在前 30 d 小于对照, 后 15 d 高于对照; 其他浓度 Cu 处理下 *Tr* 下降幅度在各时期均大于对照。各 Cu 处理 60 d 时分别比对照下降 13.72%、25.49%、64.7%、78.43%, 差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

### 2.2.3 气孔导度

从图 3a 可见, 0.1 μmol·L<sup>-1</sup>、5 μmol·L<sup>-1</sup>、20 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理下, 叶片气孔导度(*C<sub>s</sub>*)随光强的变化趋势与对照相似, 0.1 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理叶片 *C<sub>s</sub>* 各光强下均高于对照, 而 5 μmol·L<sup>-1</sup>、20 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理下叶片 *C<sub>s</sub>* 各光强下均低于对照。40 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理的叶片 *C<sub>s</sub>* 变化不大, 但显著低于对照及其他处理。其原因是高浓度的 Cu 处理使叶片细胞结构受到破坏, 功能丧失。

从图 3b 可见, Cu 处理下脐橙叶片 *C<sub>s</sub>* 随胁迫时间和 Cu 浓度增加而下降, 且处理时间越长, 浓度越大, *C<sub>s</sub>* 下降幅度越大。各处理脐橙叶片 *C<sub>s</sub>* 下降幅度前 30 d 均大于后 30 d。5 μmol·L<sup>-1</sup>、20 μmol·L<sup>-1</sup>、40 μmol·L<sup>-1</sup> Cu 处理 15 d 后 *C<sub>s</sub>* 分别比对照下降 8.26%、15.21%、45.34%, 60 d 后分别下降 20.87%、69.42%、78.79%, 差异极显著 ( $P < 0.01$ )。

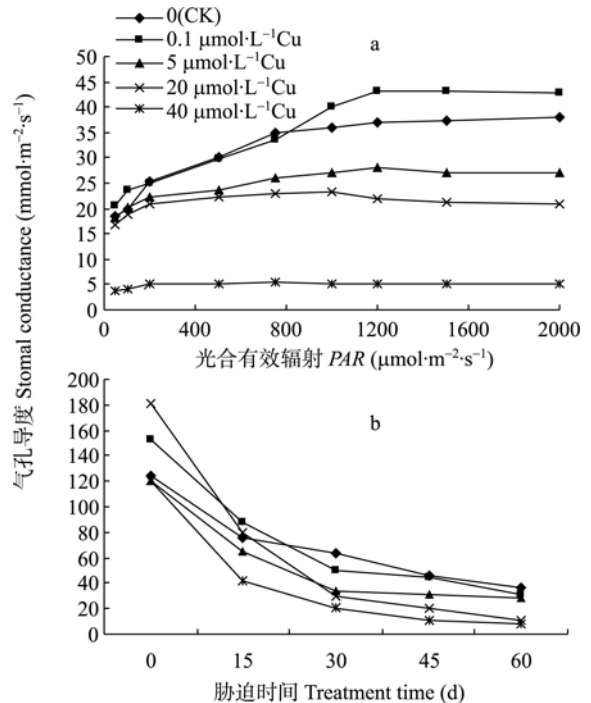


图 3 Cu 胁迫下脐橙叶片气孔导度对光强(a)和胁迫时间(b)的响应

Fig. 3 Responses of stomatal conductance of navel orange leaves under Cu stress to light intensity (a) and stress time (b)

### 2.3 Cu 胁迫对脐橙叶片叶绿体光还原活性的影响

PS 的电子传递是光合作用的重要环节之一,对整个光合作用有很大影响。Cu 处理对脐橙叶片叶绿体光还原活性影响显著(图 4)。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理叶绿体光还原活性比对照增加 2.12%, 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、20  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、40  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使叶绿体光还原活性分别比对照降低 28.32%、33.75%、44.02%, 较高浓度的 Cu 引起叶绿体光还原活性下降, 浓度越高, 下降幅度越大。可以看出, 高浓度 Cu 胁迫严重影响了 PS 的电子传递, 从而抑制了整个光合作用的进行。

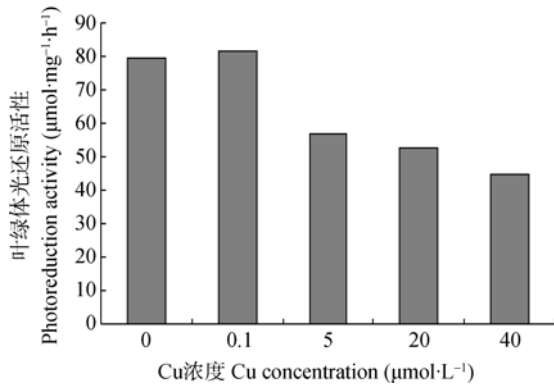


图 4 Cu 胁迫对脐橙叶片叶绿体光还原活性的影响

Fig. 4 Effect of Cu stress on photoreduction activity of navel orange leaves

## 3 讨论

### 3.1 Cu 胁迫影响脐橙叶片光合色素含量

Cu 胁迫使光合色素含量下降已有大量报道<sup>[3,8-10]</sup>。本试验结果显示: 高浓度 Cu 处理导致脐橙叶绿素含量降低, 可能是由于 CAT 活性下降, 导致  $\text{H}_2\text{O}_2$  的积累所致, 与沈文彪等<sup>[11]</sup>报道的  $\text{H}_2\text{O}_2$  积累会促进叶绿素的降解一致。至于  $\text{H}_2\text{O}_2$  的积累促进叶绿素降解的原因一方面是  $\text{H}_2\text{O}_2$  通过 Fenton、Harber-Weiss、Winterbourn 反应或光解反应形成  $\cdot\text{OH}$ , 直接引发脂质过氧化<sup>[12]</sup>, 这一点可从高 Cu 处理使 SOD 活性下降、MDA 含量上升, 导致过氧化产物积累, 膜透性增加的结果得到佐证<sup>[13]</sup>; 另一方面, 高 Cu 处理使 POD 活性上升, POD 的上升导致叶绿素含量下降<sup>[13]</sup>, 与王康等<sup>[14]</sup>报道的高水平  $\text{H}_2\text{O}_2$  诱导酚特异过氧化物酶(PPOD)合成, 而 PPOD 使酚氧化物形成酚自由基从而攻击叶绿素的结果一致。

### 3.2 Cu 胁迫影响脐橙叶片光合特性

Cu 是植物微量营养元素, 适量的 Cu 有利于叶绿素的形成与稳定。试验结果表明, 0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理有利于脐橙叶片光合色素的形成, Chl. a 和 Chl. b 分别比对照增加 8.62%和 9.29%( $P < 0.05$ ), 叶绿体

活性增加, 这和 Cu 与叶绿体色素形成配位化合物有关。0.1  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理还促进脐橙叶片气孔开放, 增加气孔导度, 有利于气体交换, 因而增加了叶片的光合速率, 促进生长。

逆境抑制光合作用已有大量报道<sup>[15-17]</sup>,  $P_n$  的下降可由气孔限制和非气孔限制引起<sup>[18-20]</sup>。前者是指逆境胁迫后引起气孔关闭,  $\text{CO}_2$  供应受阻<sup>[19]</sup>; 后者指叶肉细胞气相空间和  $\text{CO}_2$  扩散阻力, PSII 及光合磷酸化活性下降<sup>[21-23]</sup>, Rubisco 羧化酶活性降低<sup>[24,25]</sup>, 叶绿体电子传递受阻和叶绿素含量下降等<sup>[19,24]</sup>。本试验结果表明, 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  Cu 处理使脐橙叶片气孔导度和蒸腾速率下降, 表明  $P_n$  下降存在着气孔因素, 但同时观察到叶绿素含量降低, 叶绿体的光还原活性下降, 说明  $P_n$  的下降也有非气孔因素存在, 高 Cu 胁迫使柑橘叶片  $P_n$  下降是由气孔因素和非气孔因素共同作用的结果, 但二者的比例如何有待于进一步考究。

蒸腾作用是植物体内重要的生理活动, 受气孔开闭的影响和制约。气孔开放时  $T_r$  加大, 关闭时  $T_r$  减少。试验结果表明, Cu 浓度大于 5  $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$  时,  $T_r$  明显下降, 显示  $P_n$  与  $T_r$  同步受到抑制。

水培法作为生物模拟试验法的一种, 有利于开展单因子试验研究, 多用于田间难以进行的探索性试验。有关脐橙在田间出现的 Cu 毒害机理尚需进一步研究。

## 参考文献

- [1] 黄细花, 赵振纪, 刘永厚, 等. 铜对紫云英生长发育影响的研究[J]. 农业环境保护, 1993, 12(1): 1-6
- [2] 王宏康, 阎寿沧. 污泥施肥时铜对农作物的污染[J]. 环境科学, 1990, 11(3): 6-11
- [3] 刘春生, 史衍玺, 马丽, 等. 过量铜对苹果树生长及代谢的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2000, 6(4): 451-456
- [4] 庄伊美. 柑橘营养与施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 1994: 21-71
- [5] Alva A. K., Chen E. Q. Effects of external copper concentrations on uptake of trace elements by citrus seedlings[J]. Soil Sci., 1995, 159: 59-64
- [6] 波钦诺克. 植物生物化学分析方法[M]//荆家海, 丁钟荣, 译. 北京: 科学出版社, 1976: 255-259
- [7] 张志良, 吴光耀. 植物生理生化技术方法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 212-213
- [8] 王友保, 刘登义. Cu, As 及其复合污染物对小麦生理生态指标的影响[J]. 应用生态学报, 2001, 12(5): 773-776
- [9] Penelope A. R., Helen C. H., Kenneth L. S. Physiological responses of cabbage to incipient copper toxicity[J]. J. Amer.

- Soc. Hor. Sci., 1989, 114(1): 149–152
- [10] Branquinho C., Brown D. H., Catarino F. The cellular location of Cu in lichens and its effects on membrane integrity and chlorophyll fluorescence[J]. Environ. Exp. Bot., 1997, 38: 165–179
- [11] 沈文飏, 张荣铎. 外源抗坏血酸和过氧化氢对小麦离体叶片衰老的调节[J]. 植物生理学通讯, 1997, 33(5): 338–340
- [12] 李晓玲, 杨进, 骆炳山. 活性氧代谢与植物的抗逆性[J]. 荆门职业技术学院学报, 1999, 14(3): 30–35
- [13] 张国军. Cu 对柑橘的毒害研究[D]. 福州: 福建农林大学, 2005: 26–36
- [14] 王康, 冯有胜. H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 对过氧化氢酶和过氧化物酶活性的影响[J]. 西南农业大学学报, 1988, 10(2): 101–103
- [15] 郭延平, 张良城, 沈允钢. 低温胁迫对温州蜜柑光合作用的影响[J]. 园艺学报, 1998, 25(2): 111–116
- [16] 罗华建, 刘星辉. 水分胁迫条件下枇杷若干生理指标的变化[J]. 亚热带植物科学, 2004, 33(1): 19–21
- [17] Qiu D. L., Liu X. H., Guo S. Z. Effects of simulated acid rain on longan photosynthesis[J]. Acta Horticulturae, 2001, 258: 301–304
- [18] Hay R. K. M., Walker A. J. Endogenous and environmental factors affecting photosynthesis: water stress[M]//Hay R. K. M., Walker A. J. An Introduction to the Physiology of Crop Yield. New York: Longman Scientific and Technical, 1989: 48–80
- [19] Boyer J. S. Water deficits and photosynthesis[M]//Kozlowski T. T. Water Deficits and Plant Growth. New York: Academic Press, 1976: 153–159
- [20] Levitt J. Response of plants to environmental stress. II[M]//Levitt J. Water, Radiation, Salt and Other Stresses. New York: Academic Press, 1980: 40–46
- [21] Keck R. W., Boyer J. S. Chloroplast response to low leaf water potential III. Differing inhibition of electronic transport and photophosphorylation[J]. Plant Physiology, 1974, 53: 474–479
- [22] Youngis H. M., Boyer J. S. Conformation and activity of chloroplast coupling factor exposed to low chemical potential water in cells[J]. Biochimica et Biophysica. Acta, 1979, 548: 328–340
- [23] Qiu D. L., Liu X. H., Guo S. Z. Effects of simulated acid rain stress on gas exchange and chlorophyll a fluorescence parameters in leaves of longan[J]. Acta Phytoecology Sin., 2002, 26(4): 441–446
- [24] Kumer P. J., Gupta P. K. Influence of different leaf water potential on photosynthetic carbon metabolism in sorghum[J]. Photosynthetica, 1986, 20: 391–396
- [25] Vu C. V., Allen J. L., Bowers G. Drought stress and elevated CO<sub>2</sub> effects on soybean ribulose biphosphate carboxylase activity and canopy photosynthetic rate[J]. Plant Physiol., 1987, 83: 573–578