

缺镁对北碚 447 锦橙光合作用特性的影响

凌丽俐^{1,2}, 彭良志^{1,2*}, 曹立^{1,2}, 江才伦^{1,2}, 淳长品^{1,2}, 张广越³, 王振兴³

(¹西南大学柑桔研究所, ²国家柑桔工程技术研究中心, ³西南大学, 重庆 400712)

摘要:以北碚 447 锦橙为材料,测定叶片镁质量分数、光合色素质量分数、光响应和 CO₂ 响应有关指标,研究在自然条件下缺镁对锦橙叶片光合特性的影响。结果显示,随着黄化程度增加叶片的镁质量分数显著降低,叶片受镁胁迫程度加剧。随着缺镁程度增加,叶片光合色素呈极显著的下降趋势,叶片的光饱和点、P_nmax、表观量子效率(AQY)、CO₂ 饱和点和羧化效率(CE)显著降低,叶片的光补偿点和 CO₂ 补偿点显著提高;在光响应和 CO₂ 响应上,随着缺镁程度增加,锦橙叶片气孔导度显著降低,而细胞间隙 CO₂ 显著增大,表明缺镁锦橙的光合作用主要是受非气孔限制。这些结果为柑橘优质、高产栽培提供了理论指导和相关依据。

关键词: 锦橙; 缺镁; 光合特性

中图分类号: S666.4 文献标识码: A 文章编号: 1009-9980(2009)03-275-06

Effect of magnesium deficiency on photosynthesis characteristic of Beibei 447 Jincheng orange

LING Li-li¹, PENG Liang-zhi^{1,2*}, CAO Li^{1,2}, JIANG Cai-lun^{1,2}, CHUN Chang-pin¹, ZHANG Guang-yue³, WANG Zhen-xing³

(¹Citrus Research Institute, CAAS, Chongqing 400712 China; ²National Engineering Research Center for Citrus, Chongqing 400712 China; ³Southwest University, Chongqing 400712 China)

Abstract: In order to elucidate the photosynthesis characteristics of Beibei 447 Jincheng orange (*Citrus sinensis* Osbeck) under magnesium (Mg) deficiency stress, we measured Mg content, chlorophyll content, light response and CO₂ response of the leaves with different Mg deficient levels. The results revealed that the magnesium content of the leaves showed a significant downward trend with the increment of leaf yellowing degree; those having deep yellowing leaves were stressed heavily by Mg deficiency. Photosynthetic pigment, the light saturation point, maximum net photosynthetic rate (P_n), the apparent quantum efficiency (AQY), CO₂ saturation point and carboxylation efficiency (CE) decreased significantly with Mg deficient degree of leaves increasing. At the same time, Mg deficiency remarkably increased the light compensation point and CO₂ compensation points. Furthermore, in response of light and CO₂ concentration, the stomatal conductance of leaves decreased significantly, but the intracellular CO₂ concentration increased remarkably with the magnesium content of the leaves decreasing, which indicated that the photosynthesis of Jincheng orange under Mg deficient stress was mainly due to non-stomatal limitation. The present study provides the theoretical guidance and related basis for citrus quality and high-yield cultivation.

Key words: Jincheng orange; *Citrus sinensis* Osbeck; Magnesium deficiency; Photosynthetic characteristic

镁是植物生长的必需元素之一,不仅对维持叶绿体结构有重要作用,而且在多种酶活化、作物产量提高和作物品质改善等方面也发挥着重要作用^[1-2]。南方地区受气候及土壤酸性较强等因素的影响,土壤中的镁容易因迁移和淋溶而损失,造成土壤供镁能力降低^[3]。特别是近年来,随着 N、P、K 化肥用量的增加和有机肥用量的减少,土壤中镁逐渐耗竭,作物缺

镁现象日益严重,已成为土壤低镁地区阻碍作物产量和品质提高的重要因素^[4]。

锦橙是鲜食加工兼用良种,其适栽区主要在四川、重庆、湖北等南方地区。研究表明,植物对镁的吸收不仅取决于土壤中有效镁的含量,而且受土壤中离子之间相互作用的影响,如 K^{+[5]}、Ca^{2+ [6]}、NH₄^{+[7]}、Al^{3+ [8]}对镁的拮抗作用,也会导致植物缺镁。叶片缺镁黄化

收稿日期: 2008-10-09 接受日期: 2009-03-30

基金项目: 国家科技支撑项目(2007BAD61B03、2007BAD47B04);重庆市科委重大专项(CSTC2007AA1016);公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx07-023);柑桔学重庆市市级重点实验室开放基金(CKLC200802);现代农业(柑橘)产业技术体系建设专项

作者简介: 凌丽俐,女,博士,主要从事植物生理与分子生物学研究。Tel: 023-68349725, E-mail: linglili_2003@163.com

* 通讯作者。Author for correspondence. Tel: 023-68247009, E-mail: pengchun@cta.cq.cn

易导致果实产量和品质明显降低^[9], 严重时会有显著影响锦橙的生产与贸易。镁对植物光合生理影响的研究主要集中在龙眼^[10]、青枣^[11]、菜薹^[12]、水稻^[13]等方面, 而缺镁对柑橘光合作用影响的研究尚未见报道。我们研究了在自然缺镁的条件下北碚 447 锦橙叶片的光合特性变化, 以期对柑橘的高产优质生产提供理论指导和相关依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试品种为 15 a 生枳砧北碚 447 锦橙 (*Citrus sinensis* Osbeck.)。试验于重庆市北碚区歇马镇冯家槽果园内进行, 连续多年丰产; 土壤类型为沙溪庙紫色土。2006 年 10 月, 采集园内具有缺镁症状的叶片和正常叶片, 进行叶片营养元素测定, 发现除镁元素外其他营养元素均在正常范围内。

1.2 方法

试验于 2008 年 3—4 月进行。选择果园内缺镁植株 50 株, 取树冠外围中部 2007 年营养性春梢顶部第 3 片叶, 每株取 10 枚叶片, 标号, 并按彭良志等^[14]分级方法对植株叶片黄化程度进行 0~4 级分级, 0 级叶片为正常的对照叶片, 1~4 级为黄化程度不同的叶片, 各级叶片 100 枚。晴天测定叶片的光合-光强响应和光合-CO₂ 响应, 并采集各级黄化叶片, 每 5 枚同级叶片作样测定叶绿素各成分质量分数, 样本数为 20, 重复 3 次测定。

1.2.1 光合色素质量分数测定 叶绿素 a (Chla)、叶绿素 b (Chlb)、类胡萝卜素质量分数 (Car) 测定参照 Wellberum 等^[15]的方法, 于 96% 乙醇浸提 24 h 后用 TU-9001 型双光束紫外-可见分光光度计测定 665、649、470 nm 处消光值, 计算叶绿素 Chl、Car、及 Chla/Chlb 值。

1.2.2 光合-光强响应测定 于晴天上午 9:00-11:00 在树冠中部随机选取不同黄化级别的锦橙叶片, 用 Li-6400 光合仪进行测定, CO₂ 浓度为 (380±10) μmol·mol⁻¹, 温度为 (30±2) °C, 光合有效辐射 (PAR)

梯度设定为: 1 800、1 600、1 400、1 200、1 000、800、600、400、200、150、100、50 和 0 μmol·m⁻²·s⁻¹。用光合助手软件将所得数据做出净光合速率 (Pn) 对 PAR 的模拟曲线 (Pn-PAR), 求出曲线的最小值、最大值, 即为表观量子效率和最大净光合速率; 用低于 200 μmol·m⁻²·s⁻¹ PAR 的数据进行直线回归, 计算出表观量子效率和最大净光合速率等参数^[16]。每个分级测定 3 枚叶片。

1.2.3 光合-CO₂ 响应测定 于晴天上午 9:00-11:00 在树冠中部随机选取不同黄化级别的锦橙叶片, 用 Li-6400 光合仪进行测定, 光照强度为 (1 000±1) μmol·m⁻²·s⁻¹, 温度为 (30±2) °C, 外接钢瓶供应 CO₂, 浓度梯度设定为: 400、300、250、200、150、120、100、80、50、400、600、800、1 000、1 200 和 1 400 μmol·L⁻¹。用光合助手软件求得最大净光合速率和羧化效率, 用低于 250 μmol·L⁻¹ CO₂ 浓度的数据做出响应直线, 进行直线回归, 计算出 CO₂ 补偿点和 CO₂ 饱和点。每个分级测定 3 枚叶片。

1.3 数据分析

采用 SPSS 软件对实验数据进行处理和分析。用 LSD 法判断各级黄化叶片的光合色素和光合特征参数的差异显著性。

2 结果与分析

2.1 缺镁对叶片光合色素的影响

叶绿素起着吸收、传递和转换光能为化学能的关键作用, 类胡萝卜素是吸收光能的辅助色素并具有防护叶绿素分子免受过量激发能与氧化损伤的功能^[17]。由表 1 可知, 随着叶片黄化级数的增加, Chl、Car 的单位鲜质量质量分数和单位叶面积质量分数均呈显著的降低趋势。表明缺镁使锦橙叶片的 Chl 和 Car 质量分数显著降低。

除 4 级外, 随着叶片黄化级数的增加, 锦橙叶片 Chla/Chlb 值呈递增趋势 (表 1), 表明缺镁使 Chlb 的降低幅度大于 Chla, 光吸收量减少, 有利于避免光合结构受到过量光能的伤害。而 4 级叶片的 Chla/

表 1 缺镁对锦橙叶片光合色素质量分数的影响

Table 1 Effects of Mg deficiency on chlorophyll contents and carotenoid contents of Jinchen orange leaves

黄化分级 The yellowing levels of leaves	叶绿素 Chl		类胡萝卜素 Carotenoid		Chl a/Chl b
	mg·g ⁻¹	mg·dm ⁻²	mg·g ⁻¹	mg·dm ⁻²	
0 (CK)	2.18±0.28 A	5.18±0.43 A	0.66±0.08 aA	1.58±0.12 aA	2.53±0.09 C
1	1.42±0.21 B	3.59±0.46 B	0.46±0.07 bB	1.17±0.14 bB	2.65±0.33 C
2	0.91±0.12 C	2.45±0.32 C	0.31±0.04 cC	0.82±0.10 cC	2.88±0.15 B
3	0.50±0.12 D	1.30±0.29 D	0.19±0.04 dD	0.49±0.09 dD	3.20±0.59 A
4	0.29±0.11 E	0.71±0.26 E	0.17±0.04 eD	0.42±0.09 eD	2.68±0.75 BC

注: 同一参数中不同大小写字母分别表示差异达 1% 和 5% 显著水平。下同。

Note: Different capital and small letters in the same parameter mean significant at 1% and 5% levels, respectively. The same below.

Chlb 显著降低,表明缺镁程度进一步的增大,会导致叶片对光能的转化能力更大程度的降低, 光合结构易受到光伤害。

2.2 缺镁对叶片光合-光强响应的影响

图 1-A 显示不同黄化程度的锦橙叶片 Pn 对光强的响应。随着叶片黄化程度的增大,Pn 值的光响应曲线呈显著的降低趋势。进一步分析锦橙叶片的光补偿点、光饱和点、最大 Pn (Pn_{max}) 及表观量子效

率(AQY)(表 2),结果表明,随着叶片黄化程度的增大,叶片光补偿点呈递增趋势,特别是 2 级和 3 级叶片的光补偿点增加显著,分别比 0 级增加了 2.00 倍和 3.23 倍,差异达极显著水平 (P<0.01);同时,光饱和点和 Pn_{max} 和 AQY 呈递减趋势,特别是各级叶片的 Pn_{max} 和 AQY 呈显著的降低趋势 (P<0.05)。表明随着缺镁程度的增加,叶片利用光能的效率呈显著的降低趋势。

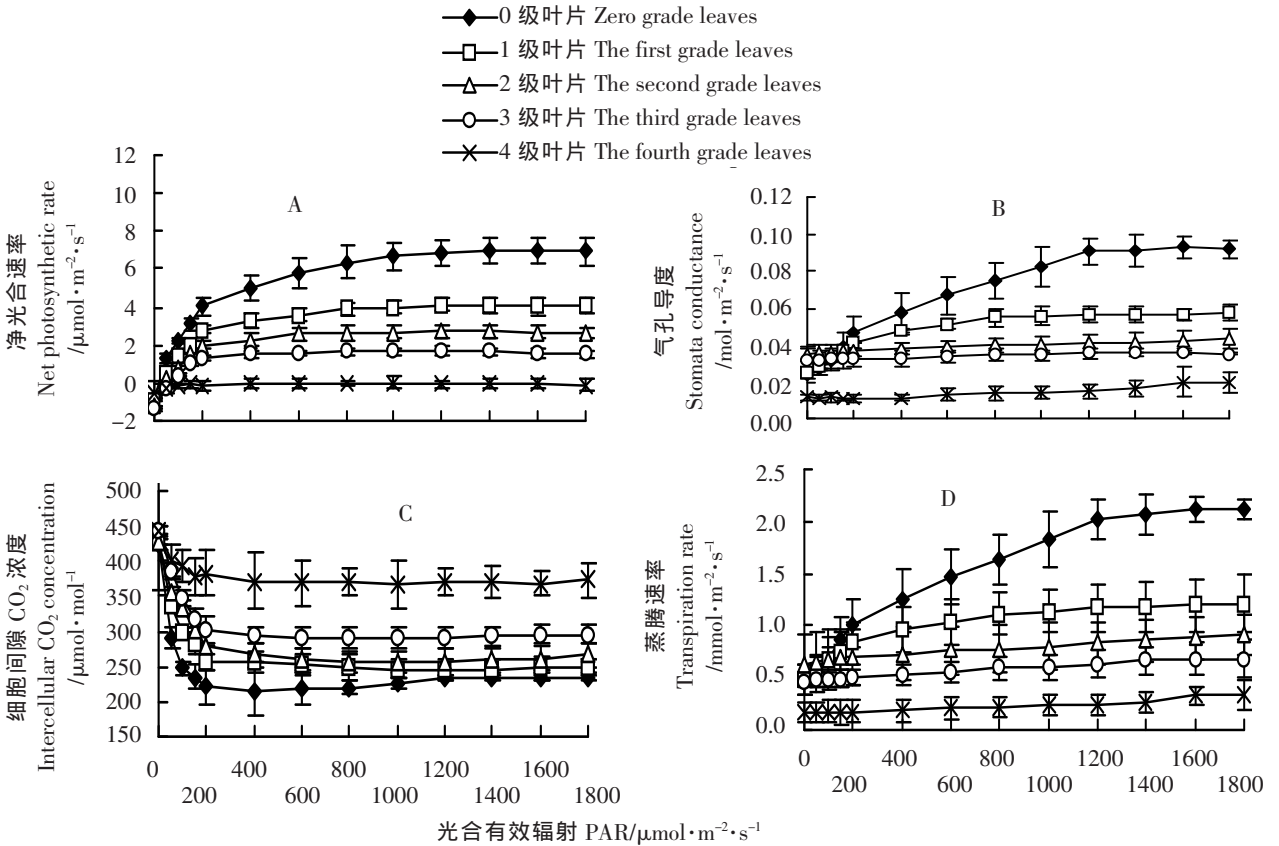


图 1 锦橙不同黄化分级叶片的光合作用对光照强度的响应

Fig. 1 Response of photosynthesis to light intensity in Jincheng orange leaves with different yellowing levels

表 2 锦橙不同黄化分级叶片的光饱和点、光补偿点和表观量子效率

Table 2 Light compensation point, light saturation point and apparent quantum yield (AQY) of Jincheng orange leaves with different yellowing levels

黄化分级 The yellowing levels of leaves	光补偿点 Light compensation point /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	光饱和点 Light saturation point /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	最大 Pn Pn _{max} /μmol·m ⁻² ·s ⁻¹	表观量子效率 AQY
0 (CK)	20.040±3.373 D	363.753±3.676 A	8.410±0.656 A	0.0435±0.0035 A
1	37.695±4.202 C	324.048±11.152 B	5.277±0.313 B	0.0340±0.0016 aB
2	60.072±5.564 B	306.041±2.392 C	4.010±0.303 aC	0.0290±0.0020 bB
3	84.832±5.557 A	299.438±2.944 C	3.027±0.251 bC	0.0206±0.0012 C
4	-	-	-	-

锦橙叶片气孔导度(Gs)对光强的响应如图 1-B 所示,Gs 的光响应也明显受缺镁的影响,0 级叶片的 Gs 最高,1~4 级叶片的平均 Gs 分别比 0 级下降了 26.1%、37.9%、46.3%和 78.1%,差异达极显著水平 (P<0.01),表明缺镁会导致叶片的气孔导度显著降低。

锦橙叶片的细胞间隙 CO₂ 浓度(Ci)对光强的响应如图 1-C 所示,随着黄化程度的增大叶片的 Ci 值呈显著的增大趋势,1~4 级叶片的平均 Ci 分别比 0 级高 10.9%、16.9%、27.8%和 53.3%,差异达极显著水平 (P<0.01)。特别是 4 级叶片的 Ci 值多数在 370~

390 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 与外界 CO_2 浓度相近, 表明其胞内 CO_2 基本未进行光合作用。

锦橙叶片蒸腾速率(Tr)对光强的响应如图 1-D 所示, 各级叶片的 Tr 随着光照强度的增大呈增加趋势, 且黄化程度越大叶片 Tr 的增加幅度越小; 1~4 级叶片 Tr 最大值分别比 0 级低 42.9%、56.8%、67.9% 和 84.1%, 差异达极显著水平 ($P<0.01$)。表明缺镁会导致叶片的蒸腾作用显著降低。

2.3 缺镁对叶片光合- CO_2 响应的影响

叶片 Pn 对外界 CO_2 浓度(Ca) 的响应如图 2-A 所示。随 Ca 浓度增大, Pn 呈显著的增大趋势; 且随

着叶片黄化程度增大, Pn 值的变化幅度显著降低, 与 0 级相较, 1~4 级叶片的平均 Pn 值分别降低了 34.0%、62.5%、81.7% 和 104.6%, 差异极显著 ($P<0.01$)。在任一 CO_2 浓度下, 不同缺镁锦橙叶片 Pn 的变化趋势均为 0 级 > 1 级 > 2 级 > 3 级 > 4 级。叶片的 CO_2 补偿点、 CO_2 饱和点、 Pn_{max} 和羧化效率(CE) 明显受缺镁的影响(表 3)。随着叶片黄化程度的增加 CO_2 补偿点呈显著的增大趋势 ($P<0.01$); 除 1 级叶片外, 随叶片黄化级数的增加叶片的 CO_2 饱和点呈增加趋势, 而随着叶片黄化级数的增加, Pn_{max} 和 CE 均呈显著降低趋势 ($P<0.05$)。

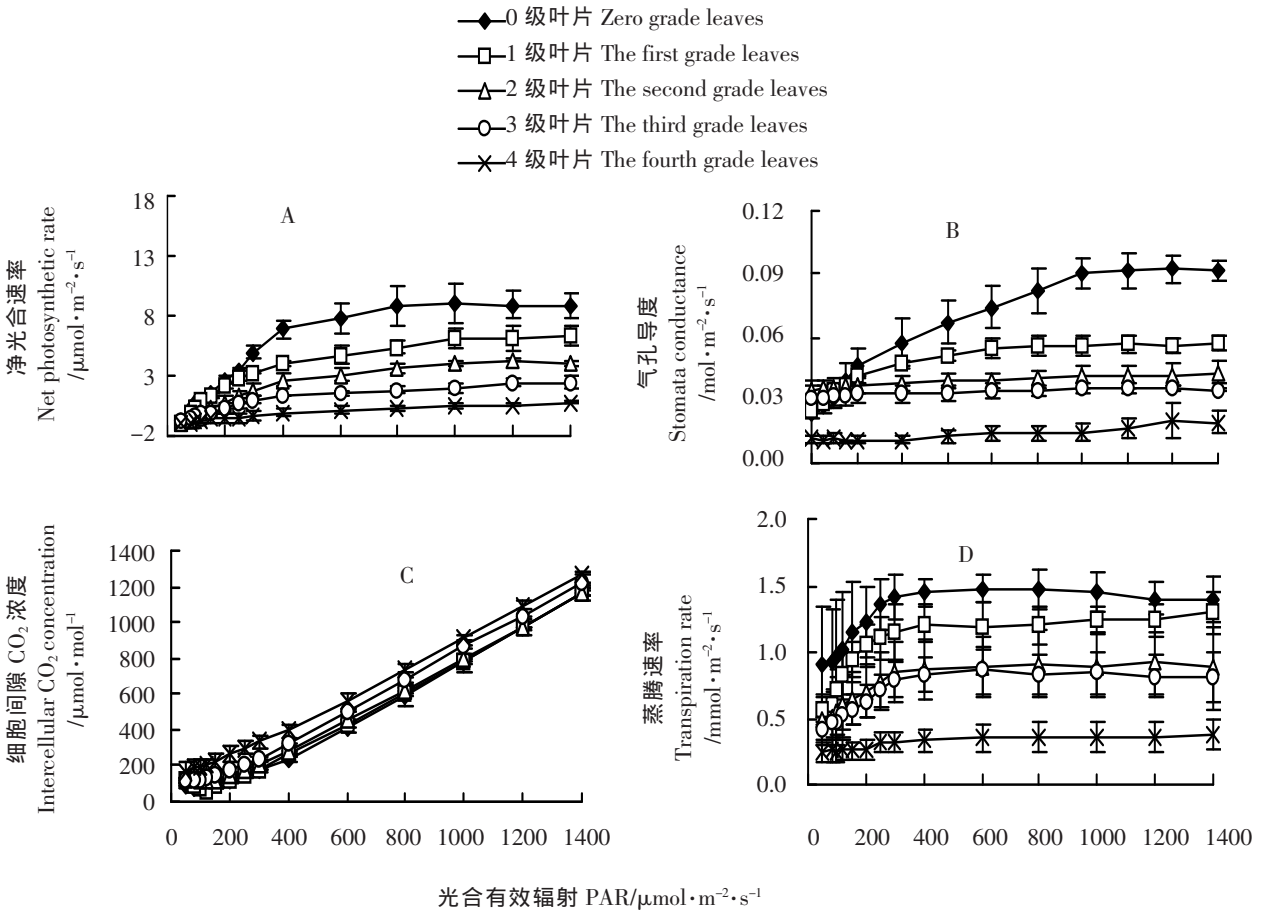


图 2 锦橙不同黄化分级叶片光合作用对 CO_2 浓度的响应

Fig. 2 Response of photosynthesis to CO_2 concentration in Jincheng orange leaves with different yellowing levels

表 3 锦橙不同黄化分级叶片的 CO_2 饱和点、 CO_2 补偿点和羧化效率
Table 3 CO_2 compensation point, CO_2 saturation point and carboxylation efficiency (CE) of Jincheng orange leaves with different yellowing levels

黄化分级 The yellowing levels of leaves	CO_2 补偿点 CO_2 compensation point $/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	CO_2 饱和点 CO_2 saturation point $/\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$	最大 Pn Pn_{max} $/\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	羧化效率 $\text{CE}/\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$
0(CK)	74.871±5.966C	863.800±77.137 ab	16±2.042 A	0.068 0±0.004 8 A
1	82.345±1.908C	676.768±19.705 b	10.607±1.311 B	0.044 6±0.001 3 aB
2	136.210±22.025B	945.461±296.133 ab	8.441±0.103 B	0.030 1±0.013 4 bBC
3	169.059±23.410A	1055.098±229.683 a	4.990±0.725 C	0.012 7±0.005 6 cC
4	-	-	-	-

随着 Ca 浓度的增加,1~4 级叶片 G_s 值对 Ca 的响应能力显著低于 0 级叶片(图 2-B)。在 Ca 0~200 $\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,除 1 级叶片外,2~4 级叶片 G_s 对 Ca 响应的增加趋势比 0 级叶片显著减缓,特别是 4 级叶片的 G_s 几乎没有变化。与 0 级叶片的 G_s 平均值相比较,1~4 级叶片的 G_s 平均值分别降低了 34.2%、52.6%、58.9%和 79.9%,差异极显著($P<0.01$)。

随着 Ca 浓度的增加叶片 C_i 呈迅速升高趋势(图 2-C),1 级叶片 C_i 平均值比 0 级叶片高 1.9%,无显著差异($P>0.05$), C_i 对 Ca 的响应能力差异不显著;而 2~4 级叶片的 C_i 平均值分别比 0 级叶片高 9.0%、18.0%和 37.7%,差异极显著($P<0.01$), C_i 对 Ca 的响应能力呈显著增大趋势。

随着 Ca 浓度增加,0~3 级叶片的 Tr 值呈显著的增大趋势,而 4 级叶片 Tr 值的增加幅度显著减少(图 2-D)。与 0 级叶片相比,1~4 级叶片 Tr 的平均值分别降低了 18.2%、40.4%、45.2%和 75.6%,差异达极显著水平($P<0.01$)。

3 讨 论

镁是植物生长必需的营养元素^[18],缺镁会导致叶片黄化,特别是较老叶片黄化严重,果实产量和品质显著下降^[9]。试验根据柑橘叶片黄化分级方法将缺镁叶片分为 0~4 级^[14],测定它们的镁质量分数,研究表明叶片镁质量分数随着分级数的增大显著降低^[19]。对各级缺镁叶片的色素、光合对光强和 CO_2 响应进行测定,结果表明,随着叶片缺镁程度的增大,叶片光合色素质量分数呈显著降低趋势,这与李延等^[4]对龙眼的研究结果相同。缺镁时黄瓜和龙眼叶片的 F_v/F_o 、 F_v/F_m 显著降低^[11,20],易发生或加剧光抑制现象。本试验结果表明,在任一光强下叶片的光合速率总是随镁质量分数的降低而降低,缺镁使叶片光合作用的光补偿点增大,光饱和点、AQY 和饱和光强下的 $P_{n_{\max}}$ 降低;在任一 CO_2 浓度下叶片的光合速率总是随供镁质量分数的降低而降低,缺镁使叶片光合作用的 CO_2 补偿点提高, CO_2 饱和点、饱和 CO_2 下的 $P_{n_{\max}}$ 和 CE 下降。因而,随着叶片缺镁程度的增大,叶片对光能的吸收、转化和传递能力显著降低,对光强和 CO_2 的耐受幅度显著减小,叶片光合作用能力显著降低。同时,随着叶片缺镁程度的增大,叶片蒸腾速率对光强和 CO_2 的响应能力也呈显著降低趋势,蒸腾作用受到显著的抑制,叶片合成作用受阻,代谢活动显著降低。因而,镁元素缺失程度越大对叶片的胁迫作用也越显著。

环境胁迫下,光合作用的限制因子可分为气孔限制和非气孔限制。随着叶片缺镁程度增大,锦橙叶片 G_s 对光强和外界 CO_2 浓度的响应能力呈显著降低趋势,而 C_i 对光强和外界 CO_2 浓度的响应能力成显著增大的趋势,表明缺镁条件下,锦橙光合速率的降低是非气孔因素引起的,即光合机构活性的降低是导致光合速率下降的主要原因^[21]。

锦橙叶片光合作用的非气孔限制主要表现在:(1)光合色素的降低:叶片叶绿素质量分数是反映作物光合能力的一个重要指标^[22],刘厚诚等^[12]对菜心的研究发现叶片叶绿素 a、叶绿素 a+b 质量分数和类胡萝卜素质量分数随着供镁的减少逐渐降低。本文研究也发现缺镁导致了锦橙叶片的 Chl 和 Car 显著降低,对光能的吸收、传递、转化能力显著降低,易受到高光伤害。(2)羧化效率(CE)降低:CE 反映 1,5-二磷酸核酮糖羧化酶(RuBPCase)活性的高低,Rubisco 是光合作用的关键酶,饱和光强下的光合速率反映了 Rubisco 活性^[23]。缺镁导致了锦橙叶片饱和光强下 $P_{n_{\max}}$ 显著降低,表明 Rubisco 活性显著降低。Farquhar 等^[24]认为高浓度 CO_2 下,光合速率受 RuBPCase 再生速率的限制,饱和 CO_2 浓度下的光合速率可以反映 RuBPCase 再生速率。缺镁条件下锦橙叶片的羧化效率和饱和 CO_2 下的 $P_{n_{\max}}$ 均显著降低,表明缺镁导致了锦橙叶片 Rubisco 的再生速率显著降低。因而,随着叶片缺镁程度的增大,锦橙叶片的羧化效率呈显著降低趋势。(3)表观量子效率(AQY)降低: AQY 体现了电子传递和光合磷酸化效率^[25],反映了植物对光能利用和光能转变为化学能的状况。随着叶片缺镁程度的增大,AQY 呈显著降低趋势,表明缺镁锦橙对光能,尤其是较强光照下的光能利用能力下降。这也可从缺镁叶片的 P_n -PAR 响应能力降低得到反映。

4 结 论

随叶片黄化程度的增大,北碚 447 锦橙叶片镁胁迫程度加剧。随着镁胁迫程度的增大,叶片的光合色素、净光合速率、气孔导度和蒸腾速率均呈显著的降低趋势,而细胞间隙 CO_2 浓度呈相反的增大趋势。因而,缺镁胁迫程度越大,锦橙叶片的光合能力降低也越显著;其光合机构活性的降低是导致光合速率下降的主要原因。

参考文献 References:

- [1] HUBER S C, MAURY W. Effects of magnesium on intact chloroplasts[J]. Plant Physiology, 1980, 65: 3540-3541.

- [2] LIU Hou-cheng, SONG Shi-wei, LEI Yu, CHEN Ri-yuan. Primary studies of magnesium deficiency on growth of flowering Chinese cabbage[C]// LEI Jian-jun ed. *Advances of Horticulture* (5). Guangzhou: Guangzhou Press, 2002: 539-542.
刘厚诚, 宋世威, 雷雨, 陈日远. 缺镁对菜心生长影响的初步研究[C]// 雷建军主编. *园艺学进展* (第5辑). 广州: 广州出版社, 2002: 539-542.
- [3] SUN Nan, ZENG Xi-bai, GAO Ju-sheng, WANG Bo-ren. Effects of Magnesium compound fertilizer on daylily (*Hemerocallis citrina* Baroni) growth and soil nutrients[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2006, 39(1): 95-101.
孙楠, 曾希柏, 高菊生, 王伯仁. 含镁复合肥对黄花菜生长及土壤养分含量的影响[J]. *中国农业科学*, 2006, 39(1): 95-101.
- [4] LI Yan, LIU Xing-hui. Effects of magnesium deficiency on senescence of *Dimocarpus longana* leaves[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2002, 13 (3): 311-314.
李延, 刘星辉. 缺镁胁迫对龙眼叶片衰老的影响[J]. *应用生态学报*, 2002, 13 (3): 311-314.
- [5] OHNO T, GRUNES D L. Potassium-Magnesium interactions affecting nutrient up take by wheat for age[J]. *5011 Soil Sci Amer J*, 1985, 49(3): 685-690.
- [6] SCHWARTZ S, BAR-YOSEF B. Magnesium uptake by tomato plants as affected by Mg and Ca concentration in solution culture and plant age[J]. *American Society of Agronomy*, 1983, 75: 267-272.
- [7] MARSCHNER H. *Mineral nutrition of higher plants*[M]. London: Academic Press Inc, 1986: 235-243.
- [8] YUAN Ke-neng. *Plant nutrient elements in soil chemistry*[M]. Beijing: Science Press, 1983: 261-293.
袁可能. *植物营养元素的土壤化学*[M]. 北京: 科学出版社, 1983: 261-293.
- [9] DONG Yan, WANG Zheng-yin. The effects of mineral nutrition on citrus qualities[J]. *Soil and Fertilizer*, 2004(6): 37-40.
董燕, 王正银. 矿质营养对柑橘品质的影响[J]. *土壤肥料*, 2004 (6): 37-40.
- [10] LI Yan, LIU Xing-hui, ZHUANG Wei-min. The effect of magnesium deficiency on photosynthesis of Longan (*Dimocarpus longana* Lour.) seedlings[J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2001, 28 (2): 101-106.
李延, 刘星辉, 庄卫民. 缺镁对龙眼光合作用的影响[J]. *园艺学报*, 2001, 28 (2): 101-106.
- [11] LIANG Kai-ming, CAO Hong-lin, XU Zhi-fang, YE Wan-hui, LIU Shi-ping, LI Wu-jun. Diurnal variations and light response of photosynthesis in three cultivars and wild type of *Ziziphus mauritiana* Lam[J]. *Horticulturae Sinica*, 2008, 35 (6): 793-798.
梁开明, 曹洪麟, 徐志防, 叶万辉, 刘世平, 李武军. 台湾青枣及野生种的光合作用日变化及光响应特征[J]. *园艺学报*, 2008, 35(6): 793-798.
- [12] LIU Hou-cheng, CHEN Xi-ming, CHEN Ri-yuan, SONG Shi-wei, SUN Guang-wen. Effects of magnesium deficiency on photosynthesis characteristic of flowering Chinese cabbage[J]. *Horticulturae Sinica*, 2006, 33 (2): 311-316.
刘厚诚, 陈细明, 陈日远, 宋世威, 孙光闻. 缺镁对菜薹光合作用特性的影响[J]. *园艺学报*, 2006, 33 (2): 311-316.
- [13] YANG Yong, JIANG De-an, SUN Jun-wei, HUANG Zong-an, JIN Song-heng. Effects of different magnesium nutrition levels on chlorophyll fluorescence characteristics and excitation energy dissipation in rice leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2005, 11(1): 79-86.
杨勇, 蒋德安, 孙骏威, 黄宗安, 金松恒. 不同供镁水平对水稻叶片叶绿素荧光特性和能量耗散的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2005, 11(1): 79-86.
- [14] PENG Liang-zhi, LAI Jiu-jiang, CHUN Chang-pin. Role of compound magnesium fertilizer in correcting leaf yellowing caused by nutrient element deficiency on navel orange in gannan[J]. *South China Fruits*, 2008, 37(3): 7-9.
彭良志, 赖九江, 淳长品. 复合镁肥对赣南脐橙缺素黄化的矫治作用[J]. *中国南方果树*, 2008, 37(3): 7-9.
- [15] WELLBERUM A R, LICHTENTHOALER H. *Formulac and program to determine total carotenoids and chlorophylls a and b of leaf extracts in different solvents*[C]// SYBESMA C. *Advances in Photosynthesis reasearch*, Martinus Nijhoff: Dr W. The Hague/Boston/Lancaster: Junk Publishers, 1984: Vol. (1): 9-12.
- [16] LIU Yu-feng, XIAO Lang-tao, TONG Jian-hua, LI Xiao-bo. Primary application on the non-rectangular hyperbola model for Photosynthetic light-response curve[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2005, 21(8): 76-79.
刘宇锋, 萧浪涛, 童建华, 李晓波. 非直线双曲线模型在光合光响应曲线数据分析中的应用[J]. *中国农学通报*, 2005, 21(8): 76-79.
- [17] GRASSI G, MAGNANI F. Stomatal, mesophyll and biochemical limitations to photosynthesis as affected by drought and leaf ontogeny in ash and oak trees[J]. *Plant Cell and Environ*, 2005, 28(7): 834-849.
- [18] SUN Yu-tao, LIAO Yu-lin, ZHENG Sheng-xian, DAI Ping-an, NIE Jun, XIE Jian. Effect of continuous application of potassium magnesium sulphate on fresh fruit yield and quality of Poon-Kan[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2008(2): 40-43.
孙玉桃, 廖育林, 郑圣先, 戴平安, 聂军, 谢坚. 连续施用硫酸钾镁肥对柑橘的效应[J]. *中国土壤与肥料*, 2008(2): 40-43.
- [19] LING Li-li, PENG Liang-zhi, CAO Li, CHUN Chang-pin, JIANG Cai-lun, WANG Zhen-xing, ZHANG Guang-yue. Study on the relationship between magnesium content and photosynthetic indicators of magnesium deficient leaves of Beibei 447 Jincheng orange (*Citrus sinensis*) [J]. *Journal of Fruit Science*, 2009, 26(2): 140-144.
凌俐俐, 彭良志, 曹立, 淳长品, 江才伦, 王振兴, 张广越. 锦橙叶片镁质量分数与若干光合指标的相关性[J]. *果树学报*, 2009, 26(2): 140-144.
- [20] YANG Guang-dong, ZHU Zhu-jun, JI Yu-mei. Effect of light intensity and magnesium deficiency on chlorophyll fluorescence and active oxygen in cucumber leaves[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (1): 115-118.
杨广东, 朱祝军, 计玉妹. 不同光强和缺镁胁迫对黄瓜叶片叶绿素荧光特性和活性氧产生的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(1): 115-118.
- [21] BERRY J A, DOWNTON W J S. *Environment regulation of photosynthesis*[C]// GOVIND ed. *Photosynthesis* (Vol II), 1982: 263-343.
- [22] OH S A, PARK J H, LEE G I, PACK K H, PARK S K, NAM H G. Identification of three genetic loci controlling leaf senescence in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant Journal*, 1997, 12(3): 527-533.
- [23] BJORKMAN O. Responses to different quantum flux densities[C]// LANGE O L, NOBEL P S, OSMOND C B, ZIEGLER H eds. *Encyclopedia of plant physiology*. Ns, Vol 1 12A: Interaction with the physical environment. New York: Springer Verlag, 1981: 57-107.
- [24] FARQUHAR G D, SHARKEY T D. Stomatal conductance and photosynthesis[J]. *Annual Review of Plant Physiology*, 1982, 33: 317-345.
- [25] FOYER C H, HARBINSON J. *The photosynthetic electron transport system: efficiency and control*[C]// FOYER C H, QUICK W P eds. *A molecular approach to primary metabolism in higher plants*. London: Taylor and Francis, 1997: 3-39.