

缺镁对龙眼光合作用的影响

李 延¹ 刘星辉² 庄卫民¹

(¹ 福建农业大学土地与环境学系, 福州 350002; ² 福建农业大学园艺系, 福州 350002)

摘 要: 缺镁胁迫下, 龙眼 (*Dimocarpus longana* Lour.) 幼苗叶片光合色素含量、叶绿体对光吸收能力、表观量子产量和羧化效率下降; 光补偿点和 CO₂ 补偿点提高, 光饱和点和 CO₂ 饱和点下降; Chl. a 荧光动力学参数 Fv/Fo、Fv/Fm 和 Fd/Fs 的降低说明缺镁龙眼 PS II 活性下降; F₆₈₅/F₇₃₅ 比值的下降则表明缺镁降低了激发能在两个光系统之间分配的调节能力。就缺镁对龙眼光合作用影响的机理进行了讨论。

关键词: 龙眼; 镁; 光合作用

中图分类号: S 667. 2; Q 945 文献标识码: A 文章编号: 0513 353X (2001) 02 0101-06

缺镁导致植物光合能力的下降已为众多研究所证实^[1]。镁对光合膜垛叠、激发能在两个光系统之间的分配、光合电子传递速率、PS II 活性以及原初光能转化效率等一系列重要的生理生化过程都有明显的影响^[1], 但这方面的研究多采用离体叶绿体为材料, 而有关活体条件下缺镁对植物光合生理生化影响的研究报道很少。缺镁是龙眼生产中普遍存在的问题^[2,3], 缺镁导致龙眼叶片黄化, 严重时叶片大量脱落, 树势衰竭^[2]。但有关缺镁对龙眼光合作用影响的研究尚未见报道。作者对此进行研究, 旨在为龙眼合理施用镁肥提供依据。

1 材料与方法

1.1 材料和处理

试验于 1996~ 1997 年在福建农业大学进行。供试龙眼 (*Dimocarpus longana* Lour.) 品种为‘乌龙岭’。种子洗净播种于干净的河沙中, 以去离子水培养 180 d。选择生长一致的幼苗用于水培。在以往研究的基础上^[4], 设正常供镁 (Mg^{2+} 4 mmol·L⁻¹, 对照), 低镁 (Mg^{2+} 0.4 mmol·L⁻¹, Mg₁) 和缺镁 (不加镁, Mg₂) 3 个处理。营养液镁源为 MgSO₄·7H₂O, 低镁和缺镁处理通过添加 Na₂SO₄ 保持处理间 SO₄²⁻ 浓度一致。营养液体积 6 L, 每塑料桶种植 2 株, 10 次重复。营养液 pH 6.0±0.1。培养期间每天定时用小型气泵打气, 每 2 d 调节 1 次 pH, 使之保持恒定。每 7 d 更换 1 次营养液。测定时间为幼苗移栽后 150 d, 取不同处理相同叶位的叶片进行测定, 5 次重复。

1.2 测定方法

1.2.1 光合色素含量 光合色素含量用混合液提取^[5], 722 分光光度计测定叶绿素

收稿日期: 2000-09-18; 修回日期: 2000-12-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (49771053); 福建省自然科学基金资助项目 (F99020); 福建省高校测试基金资助项目 (JC990062)

(Chl.) 含量, 类胡萝卜素 (Car.) 含量用波钦诺克介绍的公式^[6]计算。

1.2.2 光合作用速率、表观量子效率和羧化效率 净光合作用速率 (Pn)、气孔导度 (Gs)、细胞间隙 CO₂ 浓度 (Ci) 用美国 CID 公司生产的 CI—301PS 光合作用测定系统测定; 通过配件 CI—301LA, CI—301AD 调节测定系统的光照强度 (PAR)、湿度 (RH)、CO₂ 浓度 (C), 由 Pn 对 PAR 和 Ci 的响应曲线求得表观量子效率 (AQY) 和羧化效率 (CE)^[7]。

1.2.3 叶绿体吸收光能和激发能分配 参照杜子云等的方法^[8], 用 Beckman Avanti 30 型冰冻离心机制备叶绿体, 用 PE—3B 型双光束紫外—可见分光光度计测定叶绿体 (Chl. 含量 20 μg•mL⁻¹) 在 360~ 720 nm 内的吸收光谱, 以蓝区和红区的相对吸收峰值来衡量它们对光能的吸收情况。用日立 MPF—4 型荧光分光光度计在液态 N₂ 中测定叶绿体 (Chl. 含量 20 μg•mL⁻¹) 的荧光发射光谱, 激发光波长 436 和 480 nm, 激发缝宽 10 nm, 发射缝宽 5 nm, 根据 PS II 和 PS I 在 684 nm 和 736 nm 的相对荧光产量, 计算 F₆₈₄/F₇₃₆ 值, 以衡量缺镁对 PS II 和 PS I 之间激发能分配的影响。

1.2.4 叶片荧光诱导动力学参数 测定仪器为脉冲调制荧光仪 (Pulse modulation fluorometer, OS5—FL 型, 美国产), 测定前叶片暗适应 15 min, 检测光光强为 0.1 μmol•m⁻²•s⁻¹, 作用光光强为 225 μmol•m⁻²•s⁻¹, 饱和闪光脉冲光光强 7 000 μmol•m⁻²•s⁻¹, 闪光时间为 0.8 s, 在温室条件下测得固定荧光 (F₀)、可变荧光 (F_v)、荧光下降 (F_d) 和稳态荧光 (F_s) 等参数。

2 结果与分析

2.1 光合色素含量

由表 1 可见, 缺镁明显降低龙眼叶片叶绿素和类胡萝卜素含量, 其单位鲜样质量和单位叶面积含量, 低镁处理 (Mg₁) 较正常供镁对照分别下降 55.41%、51.97% 和 49.35%、46.56%, 缺镁处理 (Mg₂) 则分别较正常供镁对照下降了 69.2%、71.6% 和 61.2%、63.6%, 差异均达到极显著水平。

表 1 缺镁对龙眼叶片光合色素含量的影响

处 理 Treatments (Mg ²⁺ mmol•L ⁻¹)	叶绿素 Chl.		类胡萝卜素 Carotenoid		Chl. a/ Chl. b
	μg•g ⁻¹ FW	μg•cm ⁻²	μg•g ⁻¹ FW	μg•cm ⁻²	
0 (Mg ₂)	983.5±31.5 C	11.52±0.89 C	296.7±22.4 C	3.49±0.76 C	2.93±0.11 A a
0.4 (Mg ₁)	1 422.4±26.3 B	19.52±0.64 B	387.2±19.1 B	5.13±0.84 B	2.80±0.08 A b
4 (对照 Control)	3 189.7±88.1 A	40.63±1.11 A	764.4±36.3 A	9.60±1.80 A	2.65±0.13 B c

注: 表中不同大、小写字母分别代表 P< 0.01 和 P< 0.05 (下同)。
Note: The different capital and small letters stand for P< 0.01 and P< 0.05, respectively, in the table (same as below).

从表 1 还可以看到, 缺镁使龙眼 Chl. a/Chl. b 比值提高, 表明缺镁不利 Chl. b 合成。Chl. b 是 PS II 捕光色素的重要组成部分, 它的减少不利于捕获光能。

2.2 叶绿体光能吸收

通过测量叶绿体悬浮液 (Chl. 含量 20 μg•mL⁻¹) 的吸收光谱, 可以看到不同处理龙

眼的叶绿体在蓝区和红区各有一个吸收峰，其峰位分别在 436 nm 和 678 nm 处。缺镁 (Mg_2) 和低镁 (Mg_1) 叶绿体在 436 nm 和 678 nm 处的吸收值均低于正常处理 (图 1)，其中 436 nm 处的吸收值， Mg_2 和 Mg_1 分别较正常供镁对照下降了 17.46% (差异显著) 和 6.70% (差异不显著)，678 nm 处的吸收值则分别下降了 30.10% (差异显著) 和 8.13% (差异不显著)，表明缺镁胁迫降低叶绿体对光能的吸收能力。

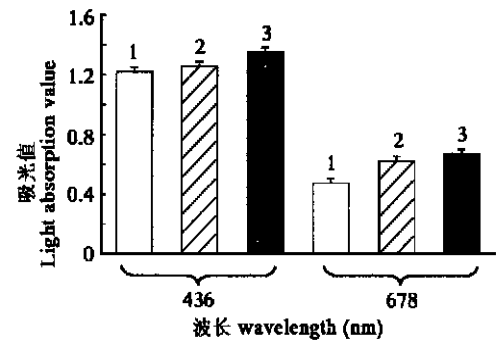


图 1 缺镁对龙眼叶绿体吸收光能的影响

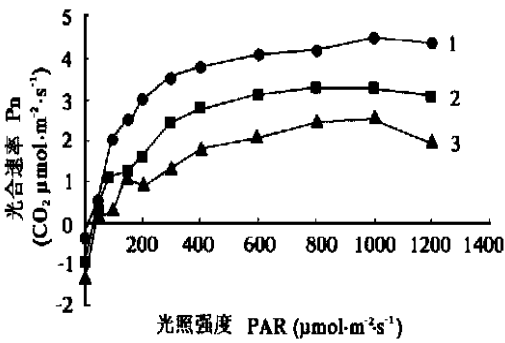


图 2 龙眼叶片光合速率对光照强度的响应

Fig. 1 The effect of Mg deficiency on light energy absorption of longan chloroplast

Fig. 2 The response of net photosynthetic rate of longan leaves to light intensity

1. Mg^{2+} 0 $mmol \cdot L^{-1}$, 2. Mg^{2+} 0.4 $mmol \cdot L^{-1}$,
3. Mg^{2+} 4 $mmol \cdot L^{-1}$

CO_2 concentration (362.2 ± 4.3) $\mu L \cdot L^{-1}$,
Temp. (30.2 ± 0.3) $^{\circ}C$, RH $64.4\% \pm 1.3\%$.

1. Mg^{2+} 0 $mmol \cdot L^{-1}$, 2. Mg^{2+} 0.4 $mmol \cdot L^{-1}$,
3. Mg^{2+} 4 $mmol \cdot L^{-1}$.

2.3 光合作用

2.3.1 光响应 龙眼幼苗净光合速率与光照强度之间的关系见图 2，在任一光强下，缺镁和低镁龙眼叶片的光合速率总是小于正常供镁对照。另外表 2 结果表明，缺镁会提高龙眼暗呼吸速率、光补偿点，降低光饱和点、表观量子产量。

2.3.2 CO_2 响应 从龙眼幼苗光合速率对外界 CO_2 浓度的响应曲线 (图 3, A) 可以计算出 Mg_2 处理 CO_2 补偿点和 CO_2 饱和点分别为 75 和 700 $\mu L \cdot L^{-1}$ ， Mg_1 处理分别为 68 和 900 $\mu L \cdot L^{-1}$ ，对照为 53 $\mu L \cdot L^{-1}$ 和 > 900 $\mu L \cdot L^{-1}$ ，表明缺镁使龙眼光合作用的 CO_2 补偿点提高， CO_2 饱和点下降。

P_n 对 C_i 响应曲线 (图 3, B) 最初线段斜率即为羧化效率 (CE)， Mg_2 、 Mg_1 和对照的 CE 值分别为 0.0257、0.0280 和 0.0518，CE 降低表明缺镁龙眼固定 CO_2 的能力下降。

2.3.3 气孔导度 光合作用的限制因子可分为气孔限制和非气孔限制。由表 3 可以看出，缺镁使龙眼光合速率降低，二者呈正相关。缺镁对 G_s 的影响与 P_n 相同，而对 C_i 的影响却相反，随缺镁程度的加重而 C_i 上升，说明缺镁龙眼光合速率的降低既有气孔因素，也有非气孔因素。从不同处理 G_s 和 C_i 的变化看，处理间 C_i 的差异明显大于 G_s ，似可认为，缺镁导致光合速率下降的主要原因是非气孔因素，即光合机构活性的降低。

表 2 缺镁对龙眼叶片暗呼吸速率、光补偿点、光饱和点和表观量子产量的影响

Table 2 The effect of Mg deficiency on dark respiratory rate, light compensation point (LCP), light saturation point (LSP) and apparent quantum yield (AQY) in leaves of longan

处 理 Treatments (Mg^{2+} $mmol \cdot L^{-1}$)	暗呼吸速率 Dark respiration rate ($CO_2 \mu mol \cdot$ $m^{-2} \cdot s^{-1}$)	光补偿 点 LCP ($\mu mol \cdot$ $m^{-2} \cdot$ s^{-1})	光饱和 点 LSP ($\mu mol \cdot$ $m^{-2} \cdot$ s^{-1})	表观 量子 产量 AQY
0 (Mg_2)	1.3	43.3	800	0.016
0.4 (Mg_1)	0.9	31.4	800	0.020
4 (对照 Control)	0.4	16.7	1 000	0.024

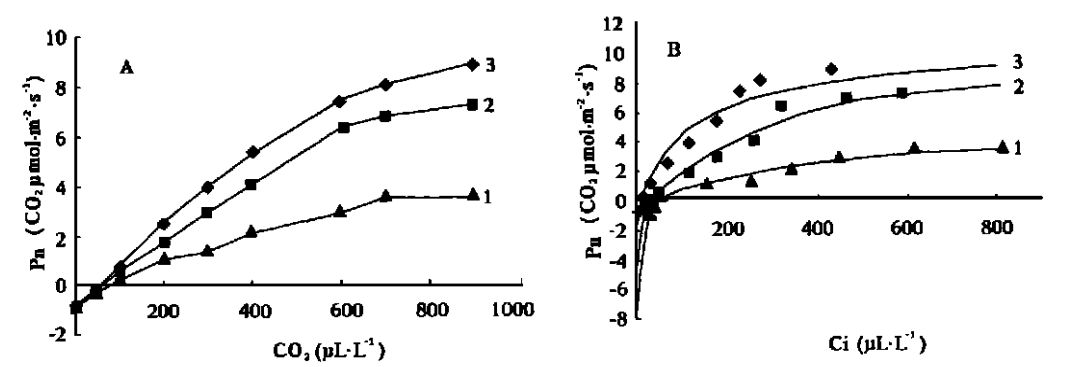


图 3 龙眼光合速率对外界 CO_2 浓度 (A) 及胞间 CO_2 浓度 (B) 的响应
Fig. 3 The response of net photosynthetic rate of longan leaves to external CO_2 concentration (A) and internal CO_2 concentration (B)

PAR $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, Temp. (26.5 ± 0.2) $^{\circ}\text{C}$, RH $64.4\%\pm1.6\%$.
1. Mg^{2+} $0\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 2. Mg^{2+} $0.4\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$, 3. Mg^{2+} $4\ \text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$

表 3 缺镁对龙眼气孔导度和胞间 CO_2 浓度以及光合速率的影响

Table 3 The effect of Mg deficiency on stomatal conductance (Gs) and internal CO_2 concentration (Ci) in leaves of longan

处 理 Treatments (Mg^{2+} $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	气孔导度 Gs ($\text{mmol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)	细胞间隙 CO_2 浓度 Ci ($\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$)	净光合速率 Pn ($\text{CO}_2\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$)
0 (Mg_2)	70.81 ± 5.06 B c (61.44%)	335.46 ± 26.33 A (185.51%)	1.58 ± 0.65 C (37.18%)
0.4 (Mg_1)	98.74 ± 10.15 B b (85.67%)	295.02 ± 20.15 B (158.76%)	2.88 ± 0.98 B (67.76%)
4 (对照 Control)	115.25 ± 9.06 A a (100%)	185.83 ± 17.08 C (100%)	4.25 ± 1.06 A (100%)

注: PAR= $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 叶室 CO_2 浓度 $356.9\pm4.67\ \mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$
Note: Determination conditions were PAR= $800\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, leaf chamber CO_2 concentration (356 ± 4.67) $\mu\text{L}\cdot\text{L}^{-1}$

2.3.4 缺镁对PS II 功能和激发能在 PS II 和 PS I 分配的影响 缺镁条件下, F_v/F_o 、 F_v/F_m 和 F_d/F_s 比值均明显降低 (表 4), 不利于龙眼叶片把所捕获的光能转化为生物化学能, 为光碳同化提供更充足的能量。

表 4 缺镁对龙眼叶片 F_v/F_o 、 F_v/F_m 、 F_d/F_s 比值的影响

Table 4 The effect of Mg deficiency on F_v/F_o 、 F_v/F_m and F_d/F_s ration in leaves of longan

处 理 Treatments (Mg^{2+} $\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	Fv/ Fo		Fv/ Fm		Fd/ Fs	
	比 值 Ratio	相对百分率 Relative percentage (%)	比 值 Ratio	相对百分率 Relative percentage (%)	比 值 Ratio	相对百分率 Relative percentage (%)
0(Mg_2)	0.787 ± 0.043 Bc	36.55	0.438 ± 0.025 c	64.13	0.341 ± 0.058 Bc	41.28
0.4(Mg_1)	1.004 ± 0.028 Bb	46.63	0.501 ± 0.010 b	73.33	0.441 ± 0.049 Bb	53.39
4 (对照 Control)	2.153 ± 0.096 Aa	100	0.683 ± 0.015 a	100	0.826 ± 0.134 Aa	100

注: 测定时间为 1999- 04- 14, 15: 00- 16: 00
Note: Time of determination was at 3- 4pm, 14- 04- 1999

叶绿体荧光 F_{684}/F_{736} 比值可以反映激发能在 PS II 和 PS I 之间的分配情况^[9]。图 4 结果表明, 不论用何种激发波长, Mg_2 和 Mg_1 处理的 F_{684}/F_{736} 比值均较正常供镁对照低, 这将引起激发能从 PS II 向 PS I “满溢”。相反, 供镁充足则提高了龙眼 PS II 和 PS I 激发能分

配的调节能力，有利于激发能在两个光系统之间的分配迅速达到平衡，实现并维持高的光合速率所需的内部微环境。

3 讨论

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。本研究结果表明（表 3），缺镁条件下，龙眼光合速率的降低既有气孔因素，也有非气孔因素，而非气孔因素，即光合机构活性的降低是导致光合速率下降的主要原因。缺镁龙眼光合作用的非气孔限制主要表现在：（1）羧化效率的降低。羧化效率反映活体叶片 RuBPcase 活性的高低，RuBPcase 是碳素同化的关键酶，羧化效率降低表明缺镁使龙眼固定 CO₂ 的能力下降。Farquhar 等^[10]认为高浓度 CO₂ 下，光合速率受 RuBPcase 再生速率的限制，饱和 CO₂ 浓度下的光合速率可以反映 RuBPcase 再生速率。缺镁条件下，羧化效率和 RuBPcase 再生速率降低（图 3）。（2）PS II 活性下降。叶绿素荧光是光系统活性的内在探针，在室温条件下，叶绿体的荧光绝大多数来自 PS II 的天线色素蛋白复合体中的 Chl. a 分子，因此叶绿素荧光动力学参数常用来表征 PS II 的功能^[11]。Fv/Fo、Fv/Fm 和 Fd/Fs 分别代表 PS II 潜在活性，PS II 原初光能转化效率和光合作用潜在量子转化效率^[12]。缺镁条件下，PS II 潜在活性（Fv/Fo）、PS II 原初光能转化效率（Fv/Fm）和光合作用潜在量子转化效率（Fd/Fs）减弱（表 4）。由于光合电子传递总是与合成 ATP 的光合磷酸化相偶联，而且非环式电子传递又是以 NADP⁺ 为最终电子受体，因此，PS II 活性、光能转化效率的降低将使缺镁龙眼不能合成更多的 ATP 和 NADPH 用于光合碳同化。（3）光能利用率降低。两个光系统之间激发能分配调节能力的大小，与光合作用速率的高低有密切关系^[13]。缺镁条件下，叶绿体 F₆₈₄/F₇₃₆ 比值下降（图 4），反映出激发能由 PS II 向 PS I “满溢”，不利于实现并维持高的光合速率所需的内部微环境。

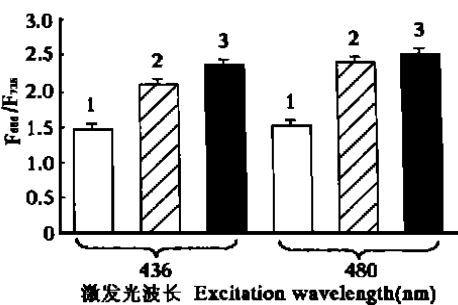


图 4 缺镁对龙眼叶绿体 F₆₈₄/F₇₃₆ 比值的影响

Fig. 4 Effect of Mg deficiency on F₆₈₄/F₇₃₆ ratio of chloroplast in longan

参考文献:

1 李 延, 刘星辉, 庄卫民. 植物 Mg 素生理的研究进展. 福建农业大学学报, 2000, 29 (1): 74~ 80
2 张晓熹, 李 延, 刘星辉. 龙眼缺镁症及其矫治. 福建农业科技, 1999, (5): 8~ 9
3 张发宝, 陈建生, 刘国坚. 广东龙眼立地土壤基本养分状况分析. 热带亚热带土壤科学, 1998, 7 (1): 31~ 35
4 李 延, 张建丽, 陈秋玲, 等. 缺镁对龙眼碳、氮代谢若干生理指标的影响. 福建农业学报, 1998, 13 (增刊): 49~ 53
5 沈伟其. 测定叶绿素含量的混合液提取法. 植物生理学通讯, 1988, (3): 62~ 64
6 波钦诺克著. 植物生物化学分析方法. 荆家海, 丁钟荣译. 北京: 科学出版社, 1981. 255~ 258
7 Demming B, Björkman O. Comparison of the effect of excessive light on chlorophyll fluorescence (77K) and the photon yield of O₂ evolution in leaves of plants. Planta, 1987, 171 (2): 171~ 184
8 杜子云, 马正平, 李有则. Mg²⁺ 在叶绿体膜上 H⁺-ATP 酶活化中的作用. 生物化学与生物物理学报, 1988, 20 (5): 512~ 519
9 唐崇钦, 彭德川, 姜世庆, 等. Ca²⁺ 对叶绿体两个光系统间激发能分配调节的影响. 见: 中国科学院植物研究所. 植物学集刊第七集. 北京: 科学出版社, 1994. 230~ 237
10 Farquhar G. D., Sharkey T. D. Stomatal conductance and photosynthesis. Annu. Rev. Plant Physiol., 1982, 33: 317~ 345

- 11 Krause G H. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis. The basics. Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol., 1991, 42: 313~ 349
- 12 卢从明, 张其德, 冯丽洁, 等. CO₂ 浓度倍增对谷子拔节期和灌浆期光合色素含量和 PS II 功能的影响. 植物学报, 1997, 39 (9): 874~ 878
- 13 张其德, 卢从明, 刘丽娜. 二氧化碳加富对大豆叶片光系统 II 功能的影响. 植物生态学报, 1996, 20 (6): 517~ 523

The Effect of Magnesium Deficiency on Photosynthesis of Longan (*Dimocarpus longana* Lour.) Seedlings

Li Yan, Liu Xinghui, and Zhuang Weimin

(¹Department of Land and Environmental Science, Fujian Agricultural University, Fuzhou 350002; ²Department of Horticulture, Fujian Agricultural University, Fuzhou 350002)

Abstract: The effect of magnesium deficiency on photosynthesis of longan (*Dimocarpus longana* Lour.) seedlings was studied using hydroponic experiment. Magnesium deficiency led to the decline of the contents of chlorophyll and carotenoid, the capability of light energy absorption of chloroplast as well as maximum photosynthesis at both light and CO₂ saturation conditions. On the other hand, the apparent quantum yield, carboxylation efficiency and both light and CO₂ compensation points turned out to become higher as magnesium become deficient. The results of chlorophyll a fluorescence induction measurement showed a decrease of Fv/Fo, Fv/Fm and Fd/Fs in magnesium deficient longan leaves, indicating that primary light energy conversion ability and potential photosynthetic activities of PS II were inhibited. The decrease in F₆₈₄/F₇₃₆ under magnesium deficiency condition suggested that the regulation of excitation energy distribution between PS II and PS I was reduced. The discussion was made on the responsive mechanism of longan to magnesium deficiency.

Key words: Longan; Magnesium; Photosynthesis

中国园艺学会第九次全国代表大会暨学术年会征文通知

根据中国园艺学会章程关于每届理事会任期四年的规定, 第八届理事会将于 2001 年第四季度期满。经第八届第十次京津常务理事扩大会议研究决定: 将于 2001 年第四季度召开中国园艺学会第九次全国代表大会暨学术年会, 特向全国征集学术论文。

1. 征文范围: 果树、蔬菜、西瓜甜瓜、观赏植物的遗传育种、栽培技术、种质资源、病虫害防治、贮藏加工、生物技术、宏观发展战略等有关内容。

2. 论文要求: 内容新颖, 具有一定的学术水平。文字简炼, 全文在 4000 字以内, 字迹清楚, 一式三份。第八届中国园艺学会会员的论文优先录用。

3. 征文截止时间: 2001 年 8 月 15 日 (以当地邮戳为准)。已在期刊、论文集或全国性会议上发表过的文章请勿报送。

4. 论文寄送地址: 按专业分别寄送各专业委员会。果树论文: 辽宁省兴城中国农科院果树所 (125100); 蔬菜论文: 北京中国农科院蔬菜花卉所 (100081); 观赏园艺论文: 北京林业大学园林学院 (100083); 西瓜甜瓜论文: 河南郑州中国农科院郑州果树所 (450004)。

中国园艺学会

2001 年 4 月 16 日