

茄子离体叶片光系统的冷激胁迫效应及热力学分析

王梅, 高志奎*, 黄瑞虹, 吕桂云, 张文丽, 杜爽

(河北农业大学园艺学院, 河北保定 071001)

摘要: 以耐冷性较强的‘短把黑’圆茄和耐热性较强的‘黑帅’圆茄为试材, 经冷激胁迫后采用植物效率仪, 进行快速叶绿素荧光参数测定, 并利用最大光化学效率 F_v/F_m 和活性中心 RC/CS_0 的标准状态变性自由能变 G_b 进行 PS 冷稳定性的热力学分析。随着冷激胁迫温度的降低和时间的延长, PS 的 F_v/F_m 、实际光化学效率 F/F_m 、 RC/CS_0 呈下降趋势; 单位反应中心 D_I/RC 和非光化学猝灭 q_N 呈上升趋势; 反映出冷激胁迫下 PS 反应中心的可逆失活和依赖于叶黄素循环的热耗散的双重机制在保护 PS 防止光抑制中起到重要作用。通过两品种间 PS 行为差异, 本研究引入了两组新的参数作为便于直观比较冷胁迫的评价指标。黑帅圆茄 F_v/F_m 、 F/F_m 的半衰温度 $T_{1/2}$ 和 $t_{1/2}$ 值分别高于短把黑圆茄 1.4 和 0.8。茄子叶片 F_v/F_m 和 RC/CS_0 的 G_b 随着冷激胁迫温度的降低而减少呈瀑布型的下降趋势。黑帅圆茄的 G_b 值和变性中点温度 T_m 都低于短把黑圆茄。它们均反映出黑帅圆茄的耐冷性低于短把黑圆茄。

关键词: 茄子; 冷激胁迫; 叶绿素荧光参数; 光系统; 吉布斯自由能

中图分类号: S 641.1 文献标识码: A 文章编号: 0513-353X (2009) 02-0261-06

Studies on Cold Shock Stress Effect of Photosystem and Its Thermodynamics Analyse in Eggplant

WANG Mei, GAO Zhi-kui*, HUANG Rui-hong, LÜ Gui-yun, ZHANG Wen-li, and DU Shuang
(College of Horticulture, Agriculture University of Hebei, Baoding, Hebei 071001, China)

Abstract: Fast chlorophyll fluorescence parameters were measured in two varieties of eggplants, ‘Duanbahei’ with cold resistance and ‘Heishuai’ with heat resistance by plant efficiency analyzer (PEA). Also the thermodynamics analyse of PS cold shock stability were studied by using the standard state denaturalization Gibbs free energy variation G_b of the maximal photochemical efficiency of photosystem (F_v/F_m) and reaction centers RC/CS_0 . With the temperature decreased and time extended, the F_v/F_m , factual photochemistry efficiency F/F_m and RC/CS_0 of PS downtrend. The exhibition of the energy dissipation D_I/RC and the nonphotochemical quenching coefficient q_N ascends. The generalized analysis reflected the dual mechanism under the cold shock, the reversible deactivation of PS reaction centers and the energy dissipation which depended on lutein circulation were important in protecting PS for preventing photoinhibition. Moreover, two groups of new parameters were introduced as index for comparing cold shock easily through the different PS action of two varieties. Semi-attenuation temperature $T_{1/2}$ and $t_{1/2}$ of Heishuai were 1.4 and 0.8 higher than that of Duanbahei. The G_b of the F_v/F_m and RC/CS_0 in the leaves of eggplant downtrend as waterfall with the cold shock temperature decreased. The G_b and the denaturalization midpoint temperature T_m of Heishuai were lower than Duanbahei. The result showed the cold resistance of Heishuai is lower than Duanbahei.

收稿日期: 2008 - 10 - 22; 修回日期: 2009 - 01 - 20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (30571267); 国家科技攻关计划项目 (2004BA525B14); 河北省农业综合开发科技推广项目 (2007)

* 通讯作者 Author for correspondence (E-mail: gaozhikui2005@163.com)

Key words: eggplant; *Solanum melongena* L.; cold shock stress; chlorophyll fluorescence parameter; photosystem ; Gibbs free energy

有研究表明, 光合器官是植物的冷敏感部位 (Smillie & Hetherington, 1984), 因而光合机构的耐冷机制研究备受关注 (江福英等, 2002)。较温和的零上低温胁迫会导致植物光合酶活性降低 (Brggemann & Linger, 1992), 叶绿素含量下降 (胡文海和喻景权, 2001), PS 活性中心的潜在活性和原初光能转换效率减弱 (Krause, 1988; 黎明等, 2006), PS 光合电子传递量子效率的下降 (刘辉等, 2005), PS 氧化侧受到抑制 (Kaniuga et al, 1979; Kee et al, 1986), 抑制了光合碳同化的酶促过程, 当光合碳同化受抑后, 导致光化学效率下降, 从而抑制光合作用。

北方强寒流天气带来的骤然降温造成的寒害、霜害或冻害一直威胁着设施蔬菜或早春露地喜温蔬菜的生产。这种骤然降温, 常表现为降温幅度较大持续时间较短的零下低温, 可谓对植物组织的冷激。关于冷激处理后若干天表现出的“冷应激效应”早已得到证实 (Iwata, 1984; Makoto & Philip, 1986; 段学武等, 2002; 邵志鹏等, 2002; 熊兴森等, 2006), 但骤然降温即时发生的冷激机制和延后表现出的冷应激机制尚待研究。

本研究中以耐冷性不同的两个茄子品种为试材, 通过冷激胁迫剂量处理, 以 PS 快速叶绿素诱导荧光动力学分析 (JIP test) 及其冷稳定性的热力学分析为手段, 进行 PS 的冷激胁迫效应研究, 探测冷激胁迫对茄子 PS 的伤害机理及其作用位点, 并且尝试探索可以用作种质资源耐冷性快速鉴定的指标, 为植物的逆境生理研究提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验材料

试验材料为耐冷性较强的‘短把黑’圆茄和耐热性较强、耐冷性较弱的‘黑帅’圆茄, 在河北清苑县腾龙园区日光温室内冬春茬种植。2006年12月28日播种育苗, 2007年3月3日栽植, 常规管理。5—6月进行测试。

1.2 茄子叶片冷激胁迫温度梯度试验

在茄子盛果期, 选取植株顶数第3片功能叶, 取直径为10 mm的叶圆片, 3片一组, 置于可封口的小塑料袋中, 分别在0、-5、-10、-12、-14、-16、-18和-20 无光的数控冰箱 (海尔, BCD-252WBCS) 中冷激胁迫5 min, 冷激胁迫结束后在室内黑暗条件下恢复1 h后, 进行叶绿素荧光参数测定, 3次重复。

1.3 茄子叶片冷激胁迫时间梯度试验

将茄子叶圆片置入-10 的数控冰箱中, 分别冷胁迫0、10、20、30、40、60 min。冷激胁迫结束后在室内黑暗条件下恢复1 h后, 进行叶绿素荧光参数测定, 3次重复。

1.4 叶绿素荧光参数的测定

采用英国 Hansatech公司生产的植物效率仪 (plant efficiency analyser, PEA, 即连续激发式荧光仪或非调制式荧光仪), 根据 Strasser等 (2000) 的方法改良后进行叶绿素荧光参数测定 (赵弢等, 2006)。试验的测定程式为: 叶片暗适应10 min后, 用 $1\ 950\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 饱和和红闪光照射1 s, 以10 μs (2 ms之前) 和1 ms (2 ms之后) 的间隔记录荧光信号, 测得叶绿素荧光诱导曲线及其参数 F_0 、 F_m 后, 打开内源光化光, 设定 $180\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 照射600 s后, 再用 $1\ 950\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 饱和和红闪光照射1 s下测得 1F_0 (即 F_0)、 1F_m (即 F_m)。

叶绿素荧光参数的计算参考 Strasser等 (2000) 的方法, 计算暗适应下 PS 最大光化学效率 F_v/F_m , 光适应下 PS 实际光化学效率 F/F_m , 单位反应中心以热能形式耗散的能量 D_0/RC , 非光

化学猝灭 q_N , 单位面积的光合机构含有的反应中心数 RC/CS_0 , F_v/F_m 的半衰温度 $T_{1/2}$ 和 F/F_m 的半衰温度 $t_{1/2}$ 。 $T_{1/2}$ 为 F_v/F_m 温度响应曲线中 $P_{01/2}$ 所对应的温度, $t_{1/2}$ 为 F/F_m 温度响应曲线中 $P_{01/2}$ 所对应的温度。其中 $P_{01/2} = (F_v/F_{m \max} + F_v/F_{m \min}) / 2$; $P_{01/2} = (F/F_{m \max} + F/F_{m \min}) / 2$ 。

1.5 PS 冷稳定性的热力学参数计算

参照 Marangoni (2003) 的方法计算 PS 热力学参数。对于 F_v/F_m , 其 PS 蛋白复合体冷稳定性的标准状态变性平衡常数 $K_D(F_v/F_m) = f_D / f_N$, 其标准状态变性自由能变 $G_D(F_v/F_m) = -RT \ln K_D(F_v/F_m)$ 。其中, 在各个温度下 $f_D(T) = \{ [F_v/F_{m0}] - [F_v/F_{m \min}(T)] \} / \{ [F_v/F_{m0}] - [F_v/F_{m \lim}] \}$, $f_N(T) = \{ [F_v/F_{m \min}(T)] - [F_v/F_{m \lim}] \} / \{ [F_v/F_{m0}] - [F_v/F_{m \lim}] \}$, R 为气体常数 $R = 8.3145 \text{ J} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$, T 为华氏温度 (K)。相应地, 对于 RC/CS_0 , 其 PS 反应中心复合体冷稳定性的标准状态变性平衡常数 $K_D(RC/CS_0) = f_D / f_N$, 其标准状态变性自由能变 $G_D(RC/CS_0) = -RT \ln K_D(RC/CS_0)$ 。其中, 在各个温度下 $f_D(T) = \{ [RC/CS_{00}] - [RC/CS_{0 \min}(T)] \} / \{ [RC/CS_{00}] - [RC/CS_{0 \lim}] \}$, $f_N(T) = \{ [RC/CS_{0 \min}(T)] - [RC/CS_{0 \lim}] \} / \{ [RC/CS_{00}] - [RC/CS_{0 \lim}] \}$ 。对标准状态变性自由能变 $G_D(F_v/F_m)$ 和 $G_D(RC/CS_0)$ 值与温度进行线性回归分析, 得到其斜率 $a_{(F_v/F_m)}$ 、 $a_{(RC/CS_0)}$ 和截距 $b_{(F_v/F_m)}$ 、 $b_{(RC/CS_0)}$, 当 $G_D = 0$ 时所对应的温度即为变性中点温度 (T_m), $T_m(F_v/F_m) = b_{(F_v/F_m)} / a_{(F_v/F_m)}$; $T_m(RC/CS_0) = b_{(RC/CS_0)} / a_{(RC/CS_0)}$ 。

2 结果与分析

2.1 冷胁迫对 PS 原初光化学效率的影响

冷胁迫处理后, 两品种茄子叶片的 PS 最大光化学效率 F_v/F_m 和 PS 实际光化学效率 F/F_m 均随冷胁迫温度降低均呈现倒“S”型下降趋势 (图 1)。在 $25 \sim -10$ 之间, 黑帅圆茄的两个参数呈缓势下降, 而短把黑圆茄则无明显下降。然而, 在 $-10 \sim -14$ 之间, 两个参数急剧降低, 黑帅圆茄的两个参数下降幅度大于短把黑圆茄。黑帅圆茄 F_v/F_m 的半衰温度 $T_{1/2}$ 为 -11.2 , F/F_m 的半衰温度 $t_{1/2}$ 为 -10.4 , 分别高于短把黑圆茄 1.4 和 0.8 。(图 1)。

在 -10 条件下, 茄子叶片的 F_v/F_m 和 F/F_m 均随冷胁迫时间的延长呈现“瀑布”型下降趋势, 但是两品种的下陷趋势和下降幅度较接近, 没有明显差异 (图 2)。

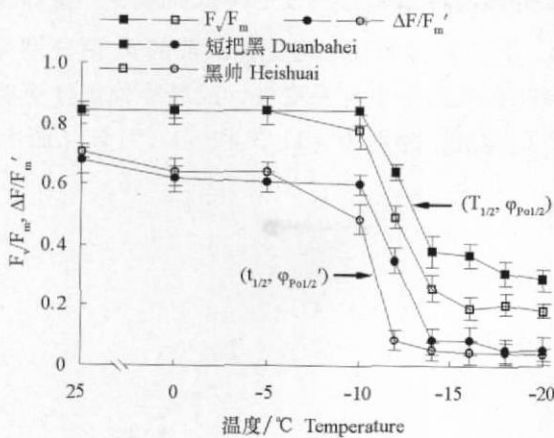


图 1 冷胁迫温度 (胁迫 5 min) 对茄子叶片 F_v/F_m 和 $\Delta F/F_m'$ 的影响

Fig. 1 Effects of cold shock stress temperature (stress 5 min) on F_v/F_m and $\Delta F/F_m'$ in leaves of eggplant

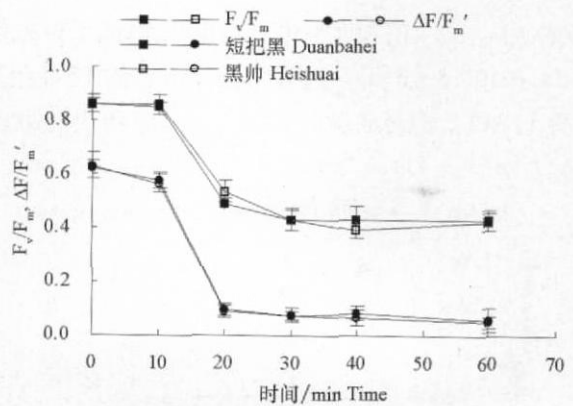


图 2 冷胁迫 (-10 °C) 时间对茄子叶片 F_v/F_m 和 $\Delta F/F_m'$ 的影响

Fig. 2 Effects of cold shock stress time (at -10 °C) on F_v/F_m and $\Delta F/F_m'$ in leaves of eggplant

2.2 冷激胁迫对 PS 活性中心和热耗散的影响

随着冷激胁迫温度的下降，单位反应中心以热能形式耗散的能量 D_I/RC 和非光化学猝灭 q_N 值均呈“S”型上升趋势。在 0 - 10 时，两品种茄子叶片的 D_I/RC 值变化不大，黑帅圆茄的 q_N 值在 - 5 ~ - 10 时有大幅度增加；当温度降至 - 12 ~ - 14 时，两品种茄子叶片的 D_I/RC 和 q_N 值急剧增加，黑帅圆茄的增幅远远大于短把黑圆茄（图 3）。

在低温 - 10 下冷胁迫 0 ~ 10 min 时，两品种茄子叶片的 D_I/RC 和 q_N 值变化不大；10 ~ 20 min 时呈上扬式增加，二者的上升趋势和上升幅度较接近，没有明显差异（数据未列出）。

随着冷激胁迫温度的下降，茄子叶片 PS 活性中心钝化， RC/CS_0 在 - 12 ~ - 20 急剧下降，黑帅圆茄的降低速度稍大于短把黑圆茄（图 4）。

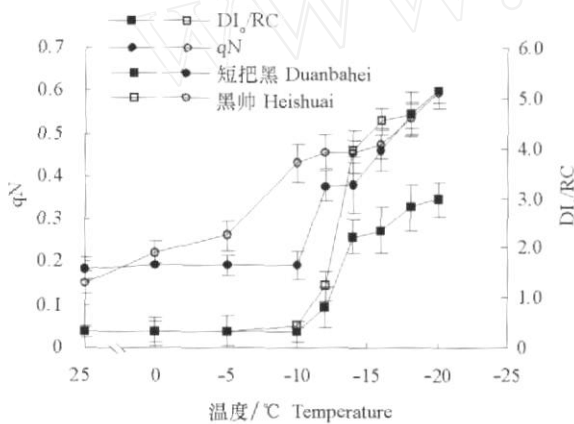


图 3 冷激胁迫温度（胁迫 5 min）对茄子叶片 D_I/RC 和 q_N 的影响

Fig. 3 Effects of cold shock stress temperature (stress 5 min) on D_I/RC and q_N in leaves of eggplant

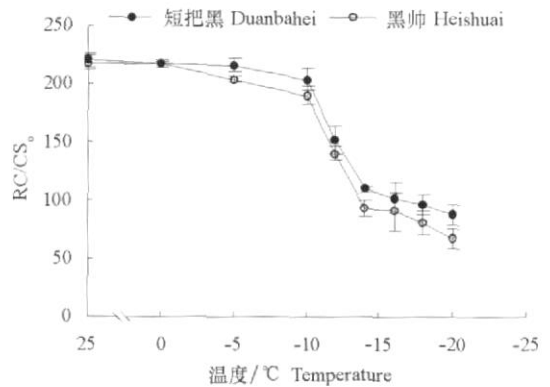


图 4 冷激胁迫温度（胁迫 5 min）对茄子叶片 PS II 活性中心的影响

Fig. 4 Effects cold shock stress temperature (stress 5 min) on PS II reaction centers in leaves of eggplant

2.3 冷激胁迫对 F_v/F_m 、 RC/CS_0 的标准状态变性自由能变 G_D 的影响

茄子叶片 F_v/F_m 、 RC/CS_0 标准状态变性自由能变 G_D 随着冷激胁迫温度的降低而减少。黑帅圆茄的 $G_D(F_v/F_m)$ 值和变性中点温度 T_m 都低于短把黑圆茄，其中黑帅圆茄和短把黑圆茄的 T_m 值分别为 - 11.3 和 - 13.3。这表明黑帅圆茄的 PS 蛋白复合体在低温下更容易变性，或者冷稳定性更差（图 5, A）。但两品种的 $G_D(RC/CS_0)$ 值和变性中点温度 T_m 相近，分别为 - 11.3 和 - 11.7（图 5, B）。

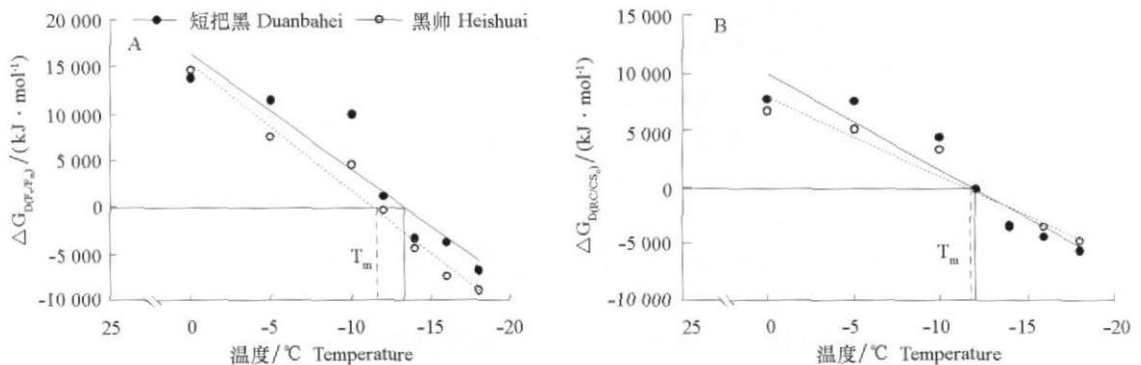


图 5 冷激胁迫温度（胁迫 5 min）对 F_v/F_m (A) 和 RC/CS_0 (B) 冷稳定性标准状态变性自由能变 ΔG_D 的影响

Fig. 5 Effects of cold shock stress temperature (stress 5 min) on ΔG_D of F_v/F_m (A) and RC/CS_0 (B) in leaves of eggplant

3 讨论

3.1 冷胁迫下茄子 PS 的运转机制

郭延平等 (1998) 认为温州蜜柑叶片在低温胁迫下叶绿素荧光参数的变化有助于分析光合机构受影响的部位, PS 失活或破坏导致 F_0 升高, F_v/F_m 降低。李平等 (2000) 研究发现低温下籼稻表现为 qP 下降与 qN 上升。本试验也有类似结果, 随着冷胁迫温度的降低和时间的延长, F_v/F_m 、 F/F_m 降低, PS 活性中心钝化、 D_I/RC 和 qN 增加, 特别是 D_I/RC 和 qN 变幅大于 RC/CS_0 , 反映出冷胁迫下 PS 反应中心的可逆失活和依赖于叶黄素循环的热耗散的双重机制在防止光抑制中起到重要作用, 体现了二者在冷胁迫低温下对 PS 具有较强的保护能力。

Kaniuga等 (1979) 认为, 低温使类囊体膜中 PS 的电子传递活性受抑, 抑制部位主要在其氧化侧。而本试验中, 冷胁迫下所测得的茄子叶绿素荧光动力学曲线中并没有 K相出现, 其原因有待进一步研究。

3.2 通过 PS 行为表征的冷胁迫评价指标

Smillie和 Hetherington (1984) 最早提出将叶绿素荧光技术用于检测植物抗寒性。李智军 (1995) 认为叶绿素荧光的变化可作为鉴定种间或品种间对环境胁迫耐性的手段和指标。李国景等 (2005) 认为长豇豆经低温弱光胁迫后, 叶绿素荧光参数 (F_0 、 F_v/F_m 、 qP 、 qN) 变化趋势相一致, 且与品种的耐低温弱光性能间存在很好的相关性, 认为可应用这些指标对长豇豆品系的耐低温弱光性进行鉴定评价。本研究也得到类似的结果, 同时还发现生产上表现为抗寒性较弱的黑帅圆茄随着冷胁迫温度的降低和时间的延长, 叶绿素 a 荧光参数 F_v/F_m 、 F/F_m 、 F_v/F_0 开始下降以及 qN 、 D_I/RC 大幅度增加的温度高于抗寒性较强的短把黑圆茄 2~4℃, 而且两品种各参数值存在一定差异。它们为通过叶绿素 a 荧光参数来综合鉴定茄子品种间的耐冷性提供了依据, 但是直观性较差。

为了便于直观比较品种间的耐冷性, 本研究引入了两组新的参数。一是 F_v/F_m 或 F/F_m 的半衰温度 $T_{1/2}$ 或 $t_{1/2}$ 值。本试验测试表明, 黑帅圆茄 F_v/F_m 、 F/F_m 的半衰温度 $T_{1/2}$ 和 $t_{1/2}$ 值分别高于短把黑圆茄 1.4℃ 和 0.8℃。二是 PS 冷稳定性的热力学参数—PS 蛋白复合体冷稳定性的标准状态变性自由能变 $G_D(F_v/F_m)$ 或 $G_D(RC/CS_0)$ 。根据 Marangoni (2003) 对酶稳定性的热力学分析, 在低温范围内, 温度降低, 会导致蛋白质变性, 酶活降低。在特定温度下计算的标准状态变性自由能变 G_D 包括焓变和熵变的作用, 它是酶稳定性更可靠的指标。 G_D 越小越容易变性, 或者稳定性更差。本试验测试出黑帅圆茄的 $G_D(F_v/F_m)$ 值和变性中点温度 T_m 都低于短把黑圆茄, 表明黑帅圆茄的 PS 蛋白复合体在冷胁迫下更容易变性, 或者稳定性更差。

本研究采用离体叶圆片冷胁迫处理, 较好地表征出 PS 的低温光化学抑制现象, 这为鉴定茄子抗寒性探索出了简便快捷的新方法。

References

- Brgemann W, Linger P. 1992. Long-term chilling of young tomato plants under low light and subsequent recovery chlorophyll fluorescence carbon metabolism and activity of Rubisco. *Planta*, 186: 179 - 187.
- Duan Xue-wu, Pang Xue-qun, Zhang Zhao-qi, Ji Zuo-liang. 2002. Effects of cold shock treatment on softening of postharvest banana and some related enzymes activities. *Acta Horticulturae Sinica*, 29 (3): 214 - 216. (in Chinese)
- 段学武, 庞学群, 张昭其, 季作梁. 2002. 冷激处理对香蕉后熟软化及相关酶活性的影响. *园艺学报*, 29 (3): 214 - 216
- Guo Yan-ping, Zhang Liang-cheng, Shen Yun-gang. 1998. Effects of chilling stress on photosynthesis of satsuma mandarin (*Citrus unshiu* Marc.). *Acta Horticulturae Sinica*, 25 (2): 111 - 116. (in Chinese)
- 郭延平, 张良诚, 沈允钢. 1998. 低温胁迫对温州蜜柑光合作用的影响. *园艺学报*, 25 (2): 111 - 116
- Hu Wen-hai, Yu Jing-quan. 2001. Effects of chilling under low light on photosynthesis and chlorophyll fluorescence characteristic in tomato leaf

- es Acta Horticulturae Sinica, 28 (1): 41 - 46. (in Chinese)
- 胡文海, 喻景权. 2001. 低温弱光对番茄叶片光合作用和叶绿素荧光参数的影响. 园艺学报, 28 (1): 41 - 46.
- Iwata T. 1984. Cold shock effect on harvested vegetables and fruits. Cold Chain, 10 (4): 107 - 112.
- Jiang Fu-ying, Li Yan, Weng Bo-qi. 2002. Review on physiology of chilling stress and chilling resistance of plants. Fujian Journal of Agricultural Sciences, 17 (3): 190 - 195, 200. (in Chinese)
- 江福英, 李 延, 翁伯琦. 2002. 植物低温胁迫及其抗性生理. 福建农业学报, 17 (3): 190 - 195, 200.
- Kaniuga Z, Zabek J, Sochanoeicz B. 1979. Photosynthetic apparatus in chilling-sensitive plants: contribution of loosely bound manages to the mechanism of reversible inactivation of hill reaction activity following cold and dark storage and illumination of leaves. Planta, 144: 490 - 502.
- Kee S C, Martin B, Ort D R. 1986. The effects of chilling in the dark and in the light on photosynthesis of tomato electron transfer reaction. Photosyn Res, 8: 41.
- Krause G H. 1988. Photoinhibition of photosynthesis: evaluation of damaging and protective mechanisms. Physiol Plant, 74: 566 - 574.
- Li Guo-jing, Liu Yong-hua, Wu Xiao-hua, Wang Bao-gen, Lu Zhong-fu. 2005. Relationship between the tolerant ability to low temperature and low light intensity and chlorophyll fluorescence in seedlings of asparagus bean. Acta Agriculture Zhejiangensis, 17 (6): 359 - 362. (in Chinese)
- 李国景, 刘永华, 吴晓花, 汪宝根, 鲁忠富. 2005. 长豇豆品种耐低温弱光性和叶绿素荧光参数等的关系. 浙江农业学报, 17 (6): 359 - 362.
- Li Ming, Li Fu-xiu, Ma Huan-cheng. 2006. Ecophysiological response of *Manglietia armatica* to short-term low temperature treatment. Northern Horticulture, (1): 37 - 39. (in Chinese)
- 黎明, 李福秀, 马焕成. 2006. 香木莲对短时低温胁迫处理的生理生态响应. 北方园艺, (1): 37 - 39.
- Li Ping, Li Xiao-ping, Chen Yi-zhu, Liu Hong-xian. 2000. Effect of chilling induced photoinhibition stress on chlorophyll fluorescence in flag leaves at heading stage in indica rice varieties with different cold tolerance. Chinese Journal of Rice Science, 14 (2): 88 - 92. (in Chinese)
- 李 平, 李晓萍, 陈贻竹, 刘鸿先. 2000. 低温光抑制胁迫对不同耐冷性的籼稻抽穗期剑叶叶绿素荧光的影响. 中国水稻科学, 14 (2): 88 - 92.
- Li Zhi-jun. 1995. Application of chlorophyll fluorescence to plant in temperature adverse circumstance. Agriculture and Horticulture, 70 (5): 30 - 38. (in Chinese)
- 李智军. 1995. 叶绿素荧光在温度逆境分析中的应用. 农业与园艺, 70 (5): 30 - 38.
- Liu Hui, Guo Yan-ping, Hu Mei-jun. 2005. Chilling-induced photoinhibition of photosynthesis in *Myrica nbru* leaves. Journal of Tropical and Subtropical Botany, 13 (4): 338 - 342. (in Chinese)
- 刘 辉, 郭延平, 胡美君. 2005. 杨梅光合作用的低温光抑制. 热带亚热带植物学报, 13 (4): 338 - 342.
- Makoto Inaba, Philip G C. 1986. Cold-shock treatments of mature green tomatoes to delay color development and increase shelf life during room temperature storage. Proc Fla State Hort Soc, (99): 143 - 145.
- Marangoni A G. 2003. Enzyme kinetics: A modern approach. USA: John Wiley & Sons Inc: 125 - 137.
- Ogata K, Sakamoto T. 1979. Cold-shock effect on keep quality of Japanese apricot fruits and tomato fruits. St Inst Kyoto Univ, (9): 146 - 150.
- Shao Zhi-peng, Ying Tie-jin, Wang Yang-guang. 2002. Effects of cold shock on postharvest physiology of tomato. Journal of Nanjing Agricultural University, 25 (2): 97 - 100. (in Chinese)
- 邵志鹏, 应铁进, 王阳光. 2002. 番茄果实采收后冷激处理的生理研究. 南京农业大学学报, 25 (2): 97 - 100.
- Smillie R M, Hetherington S E. 1984. A Screening method for chilling tolerance using chlorophyll fluorescence in vivo. Sybesna C. Advances in photosynthesis research. New York: Academic Press: 471 - 474.
- Strasser R J, Srivastava A, Tsimilli-Michael M. 2000. The fluorescence transient as a tool to characterize and screen photosynthetic samples. Yunnus M, Pathre U, Mohanty P. Probing photosynthesis: Mechanisms, regulation and adaptation. London: Taylor & Francis, 445 - 483.
- Xiong Xing-miao, Rao Jing-ping, Dai Si-qin, Fang Qi-zhi. 2006. Effect of cold shock treatment on the quality and anti-oxidative enzyme activities of nectarine fruits during storage. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 26 (3): 473 - 477. (in Chinese)
- 熊兴淼, 饶景萍, 戴思琴, 方其帜. 2006. 冷激处理对油桃贮藏品质和抗氧化酶活性的影响. 西北植物学报, 26 (3): 473 - 477.
- Zhao Tao, Gao Zhi-kui, Xu Guang-hui, Wang Mei, Gao Rong-fu. 2006. Study on getting parameters of chlorophyll fluorescence dynamics by non-modulated fluorometer plant efficiency analyzer. Acta Biophysica Sinica, 22 (1): 34 - 38. (in Chinese)
- 赵 弢, 高志奎, 徐广辉, 王 梅, 高荣孚. 2006. 非调制式荧光仪测定叶绿素荧光参数的研究. 生物物理学报, 22 (1): 34 - 38.