

夜间低温胁迫后外源 SA 对恢复中 黄瓜幼苗光合特性的影响

高青海, 王亚坤, 苗永美, 陆晓民

(安徽科技学院 应用微生物研究所, 安徽蚌埠 233100)

摘 要: 为明确低温胁迫后恢复过程中水杨酸(SA)对植物光合特性的影响, 以黄瓜品种‘津研四号’幼苗为材料, 通过沙培试验, 研究了外源 SA 对夜间 5 ℃ 低温胁迫后常温(25 ℃)恢复中黄瓜幼苗叶绿素含量、光合速率、叶绿素荧光参数、气体交换参数等的影响。结果显示: (1) 与喷施清水处理相比, 外源 SA 处理显著促进了夜间低温胁迫后的常温(25 ℃)恢复效果, 显著提高了恢复速度和水平, 表现在黄瓜幼苗叶绿素含量、净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)显著升高, 黄瓜幼苗净光合速率在恢复 6 h 时达到对照水平的 82.18%。(2) 外源 SA 还明显加快了恢复过程中黄瓜幼苗叶片最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})及非循环电子传递速率(ETR)的恢复, 提高了非光化学猝灭系数(NPQ)值, 增强了幼苗自身光保护能力。(3) 外源 SA 也促进了黄瓜幼苗叶片表观量子效率(AQY)和羧化效率(CE)的恢复, 它们在恢复 2 d 时分别达到对照水平的 92.59% 和 90.62%。研究表明, 在夜间低温胁迫后的常温恢复过程中, 外源 SA 可有效地促进黄瓜幼苗光合作用的恢复, 增强其对低温环境的适应能力。

关键词: 夜间低温; SA; 黄瓜幼苗; 光合速率; 恢复

中图分类号: Q945.79

文献标志码: A

Effect of Exogenous SA on Photosynthesis Characteristics in Cucumber Seedling Leaves during the Recovery of the Day after Night Chilling Stress

GAO Qinghai, WANG Yakun, MIAO Yongmei, LU Xiaomin

(Institute for Applied Microbiology, Anhui Science and Technology University, Bengbu, Anhui 233100, China)

Abstract: To figure out the effects of SA on plant photosynthesis characteristics during the recovery of the day after night chilling, with the ‘Jinyou no. 4’ cucumber seedlings as materials, we studied the effect of exogenous SA on chlorophyll content, photosynthetic rate, chlorophyll fluorescence parameters and gas exchange parameters etc during the recovery(25 ℃) of the day after night chilling(5 ℃) using sand culture. The results showed that: (1) The exogenous SA treatment significantly promoted the normal temperature (25 ℃) recovery after night chilling stress, significantly improved the speed and level of recovery compared with H_2O treatment, which significantly increased contents of chlorophyll, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate(T_r), stomatal conductance (G_s), and the intercellular CO_2 concentration(C_i). At recovery 6 h, the photosynthetic rate of cucumber seedlings reached 82.18% of control levels. (2) The exogenous SA significantly increased F_v/F_m , Φ_{PSII} and ETR , which improved the NPQ value and enhanced light protection. (3) Exogenous SA also contributed to the recovery of the apparent quantum yield(AQY) and carboxylation efficiency (CE) in cucumber seedlings, when recovery 2 d, AQY and CE of cucumber leaves return to

收稿日期: 2014-03-09; 修改稿收到日期: 2014-05-19

基金项目: 安徽省自然科学基金(1208085QC55); 安徽科技学院引进人才基金(ZRC2009250)

作者简介: 高青海(1977—), 男, 博士, 副教授, 主要从事蔬菜高产栽培生理的研究。E-mail: gaoqh1977@163.com

92.59% and 90.62% of control levels. Therefore, during recovery after night chilling stress, exogenous SA treatment could promote the recovery of photosynthesis of cucumber seedlings, and enhance its ability to adapt to chilling stress.

Key words: night chilling; salicylic acid; cucumber seedlings; photosynthesis rate; recovery

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是中国设施栽培面积较大的果菜之一,属于喜温蔬菜,在冬春设施栽培时经常遇到低温危害,其中光合器官对低温危害比较敏感^[1]。研究表明,低温胁迫显著降低了黄瓜叶绿素含量、光合速率、气孔导度、蒸腾速率、光化学效率等^[2-4]。低温胁迫中夜间低温胁迫是影响设施黄瓜生长、产量及品质的主要因素之一,尤其是在北方日光温室生产中,夜间低温对蔬菜生长发育障碍更为普遍,它不仅影响到植物的气孔关闭^[5],而且还降低了植物叶片最大光化学效率和实际光化学效率,增加了叶片的热耗散和加剧 PS II 反应中心的破坏或可逆性失活进程^[6],抑制了作物的光合速率和氮代谢水平^[7]。

水杨酸(salicylic acid, SA)是一种广泛存在于植物体内小分子酚类物质,它能够缓解低温对作物叶片最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})及非循环电子传递速率(ETR)等荧光参数的影响^[8],维持其较高地光系统活性和碳同化能力^[9],从而减轻低温对作物光系统的危害。SA 还能提高作物耐盐、耐重金属等能力^[10-11]。栽培设施内一般夜间温度较低,白天温度较高,如何提高蔬菜作物对这种环境的适应能力,促进其在低温胁迫后快速恢复正常生长是当前设施高产栽培亟待解决的问题之一。为此,本研究以低温敏感作物黄瓜为材料,研究夜间低温处理后恢复过程中外源 SA 对黄瓜幼苗光合特性的影响,以期明确低温胁迫后恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗光系统保护作用,探讨 SA 在促进植物适应低温环境过程中的作用机理,为低温季节设施作物的生产提供理论指导。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验材料为黄瓜品种‘津研 4 号’,种子由天津黄瓜研究所提供。

1.2 试验处理

试验于 2013 年 9~12 月份在安徽科技学院种植科技园人工气候室内进行。挑选饱满的黄瓜种子,消毒后浸种催芽,待种子露白后播种在装有干净河砂的营养钵中(10 cm×10 cm),待幼苗长出 2 片

真叶时,定期浇灌 1/2 浓度 Hogland 营养液,每次每钵浇灌 50 mL。幼苗放置在人工气候室内进行培养,昼/夜温度为(25/18±2)℃,光照强度为(240±10) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,光周期为 12 h/12 h,相对湿度 75%~80%。待幼苗长至四叶一心时对幼苗进行处理。试验共设 3 个处理,分别为 CK(昼/夜温度为 25℃/18℃,在 25℃条件下恢复时喷施清水)、H₂O(昼/夜温度为 25℃/5℃,在 25℃条件下恢复时喷施清水)和 SA(昼/夜温度为 25℃/5℃,在 25℃条件下恢复时喷施 5 $\mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$ SA)。分别在恢复前 3 h 和恢复后 3 h 各处理 1 次,每次喷施直到滴水为止。每个处理黄瓜幼苗 30 株,重复 3 次。幼苗恢复期间光照强度为(240±10) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$;在幼苗夜间低温处理 12 h 后,在 25℃条件下进行恢复 0、2、4、6、8、10 h 取样进行相关指标的测定,表观量子效率和羧化效率于恢复第 2 天时进行测定。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 叶绿素含量 选取黄瓜幼苗根部上数第 2 片叶,采用 SPAD-502 叶绿素仪进行测定。

1.3.2 光合参数 在恢复过程中,利用 TPS-2 型光合仪(USA)测定叶片的净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、胞间 CO₂ 浓度(C_i)等指标。测定时使用红蓝光源,光照强度为(200±50) $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,温度为(25±2)℃,空气 CO₂ 浓度(C_a)为(380±10) $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$ 。选取由根部上数第 2 片叶进行测定,每处理测定 5 片叶。并计算气孔限制值(L_s):

$$L_s = 1 - C_i/C_a$$

1.3.3 表观量子效率及羧化效率 在恢复第 2 天时,选取根部上数第 2 片叶进行测定,测定仪器及环境条件同 1.3.2,设定光量子通量密度(PFD)梯度:0、40、80、120、160、200 $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,以及 C_a 梯度:0、50、100、150、200 $\mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$,测定相应的净光合速率,然后制作 P_n -PFD 及 P_n - C_i 响应曲线,根据曲线分别计算表观量子效率(AQY)及 CO₂ 羧化效率(CE)^[12]。

1.3.4 荧光参数 在恢复过程中对 F_0 、 F_m 、 F_m' 、 F_s 等叶绿素荧光参数用 FMS-2 脉冲调制式荧光仪测定。选取根部上数第 2 片叶,先将叶片暗适应 30

min 后,测定 F_0 、 F_m 、 F_s 及 PS II 最大光化学效率 F_v/F_m ,然后在光下测定 F_0' 、 F_m' 、 F_s' 等参数。

$$\Phi_{PSII} = (F_m' - F_s') / F_m'$$

$$NPQ = (F_m - F_m') / F_m' [13]$$

1.4 数据统计分析

数据利用 DPS 7.05 和 EXCEL 2003 进行统计分析,数据为 3 次重复的平均值±标准误差。

2 结果与分析

2.1 夜间低温胁迫恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片叶绿素含量和净光合速率的影响

由图 1,A 可知,与对照相比,夜间低温处理明显降低了黄瓜幼苗叶绿素含量;在常温恢复过程中,随着恢复时间的延长,对照处理的黄瓜幼苗叶绿素含量变化不大,其余处理黄瓜幼苗叶绿素含量均呈升高的趋势,但仍始终低于对照水平;外源 SA 能加快黄瓜幼苗叶绿素含量的恢复,在恢复过程中始终明显高于单独低温处理,如在恢复 6 h 时,其叶片叶绿素含量达到对照处理的 94.6%,单独低温处理达到对照处理的 84.6%。另外,夜间低温处理同样明显降低了黄瓜幼苗净光合速率;在恢复过程中,对照处理的黄瓜幼苗净光合速率基本维持稳定,而低温处理幼苗净光合速率先逐渐升高,而后稍有下降,但始终低于对照水平(图 1,B);外源 SA 处理的黄瓜幼苗净光合速率恢复较快且水平较高,在恢复过程中始终高于单独低温处理,如在恢复 6 h 时,SA 处理黄瓜幼苗净光合速率恢复到 $10.93 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,达到对照处理的 82.18%,而喷施清水处理的仅恢复到对照处理的 58.87%。以上结果说明,夜间低温胁迫明显降低黄瓜叶片叶绿素含量和净光合

速率水平,而外源 SA 可有效地促进黄瓜幼苗叶绿素及光合速率的恢复,进而增强黄瓜幼苗光合作用对低温环境的适应能力。

2.2 夜间低温胁迫恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片气体交换参数的影响

由图 2 可知,夜间低温胁迫后常温恢复过程中,对照和各处理黄瓜幼苗叶片气孔导度(G_s)、胞间 CO_2 浓度(C_i)、蒸腾速率(T_r)均随恢复时间延长呈现先升高后降低趋势,而气孔限制值(L_s)则表现出逐渐降低的趋势;但与对照相比较,各低温处理的 G_s 、 C_i 、 T_r 始终处于较低水平,而其 L_s 始终处于较高水平。外源 SA 处理显著促进了低温处理黄瓜幼苗叶片气孔的开张,其 G_s 、 C_i 增加的同时, T_r 上升,而 L_s 降低;如在常温恢复 6 h 时,SA 处理的黄瓜幼苗气体交换参数达到峰值, G_s 为 $0.53 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$, C_i 为 $206 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$, T_r 为 $1.8 \text{ mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,比同期喷施清水处理的分别提高 28.12%、15.02% 和 28.57%,而 L_s 则降低 11.20%。由此说明,在夜间低温处理后常温恢复过程中,外源 SA 处理可显著促进黄瓜幼苗叶片气体交换的恢复,为黄瓜幼苗光合产物的快速积累提供了条件。

2.3 夜间低温胁迫恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

由图 3 可知,与对照相比,夜间低温处理显著降低了黄瓜幼苗的 PS II 最大光化学效率(F_v/F_m)、实际光化学效率(Φ_{PSII})、非循环电子传递速率(ETR)和非光化学猝灭系数(NPQ)等参数;在常温恢复过程中,随着恢复时间的延长,黄瓜幼苗叶片 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 NPQ 参数数值呈先升高而后降低的趋势,并始终低于对照;外源 SA 处理黄瓜幼苗叶片

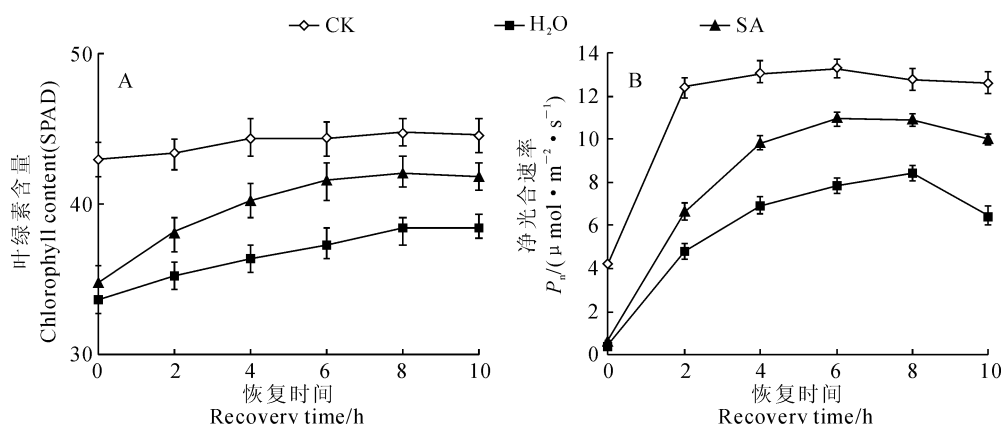


图 1 低夜温处理后恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片叶绿素含量(A)和净光合速率(B)的影响
 Fig. 1 Effects on SA on chlorophyll content(A) and net photosynthetic rate(B) in cucumber seedling leaves during the recovery of the day after night chilling

F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 NPQ 参数不仅恢复较快,而且恢复水平较高,在恢复 6 h 时分别达到 0.717、0.467、180 和 0.726 并达到峰值,分别为对照的 91.33%、92.29%、92.46% 和 92.48%,而喷施清水

处理幼苗在恢复 8 h 才达到最高峰,但相应值仅分别达到对照的 76.72%、78.78%、85.36% 和 84.25%。由此说明,夜间低温处理明显降低了黄瓜幼苗叶片的 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 NPQ 等参数,外

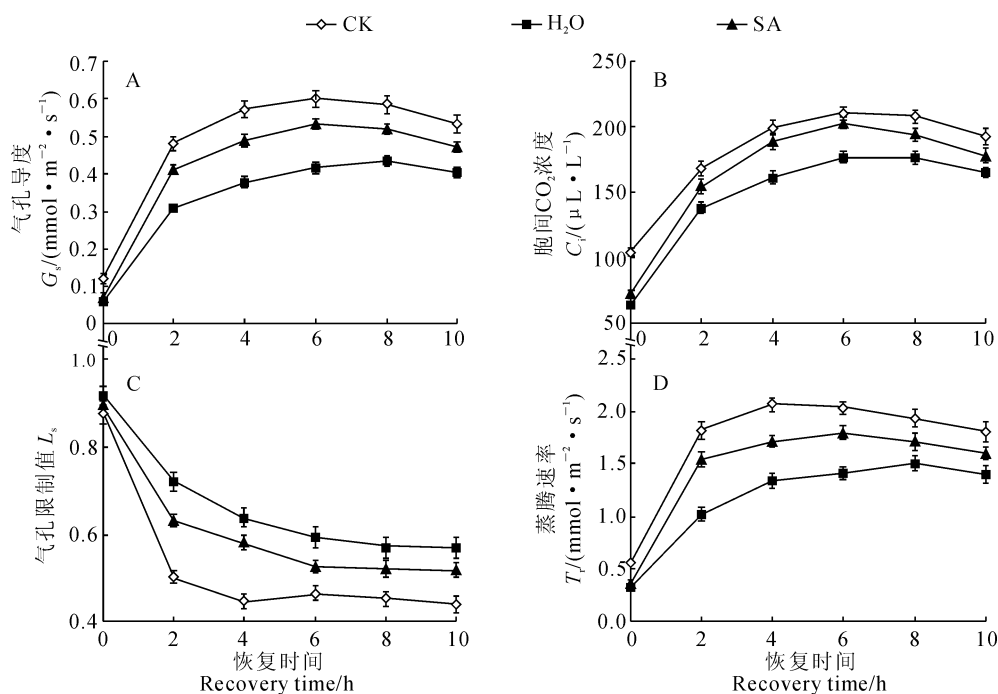


图2 夜间低温处理后恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片气孔导度、胞间 CO_2 、气孔限制值及蒸腾速率的影响

Fig. 2 Effects of SA on G_s , C_i , L_s and T_r in cucumber seedling leaves during the recovery of the day after night chilling

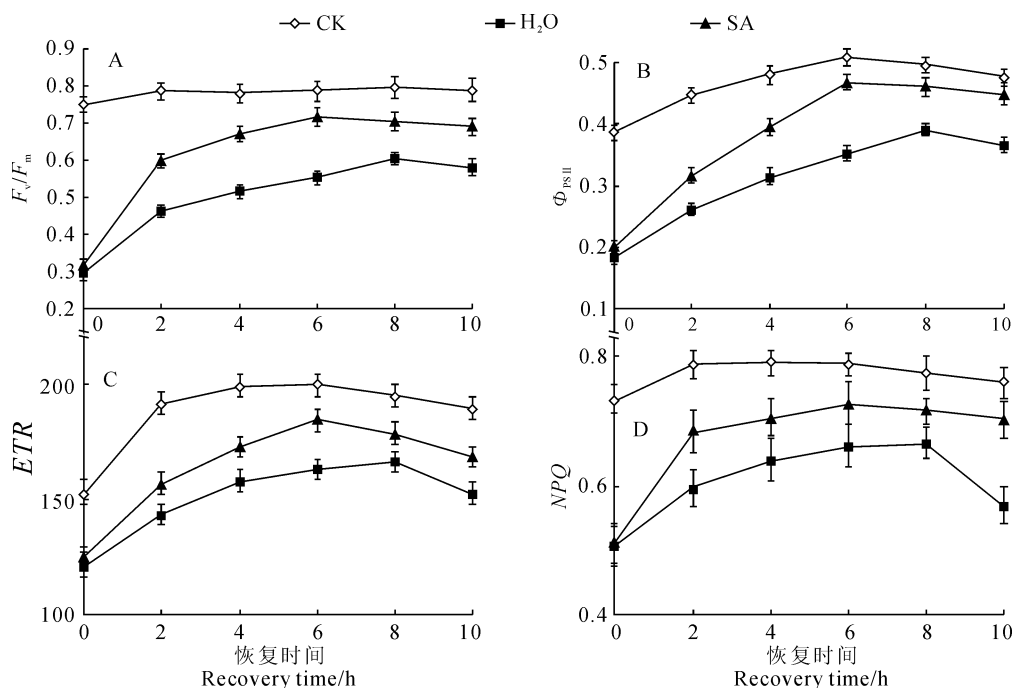


图3 夜间低温处理恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 NPQ 的影响

Fig. 3 Effects of SA on F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR and NPQ in cucumber seedling leaves during the recovery of the day after night chilling

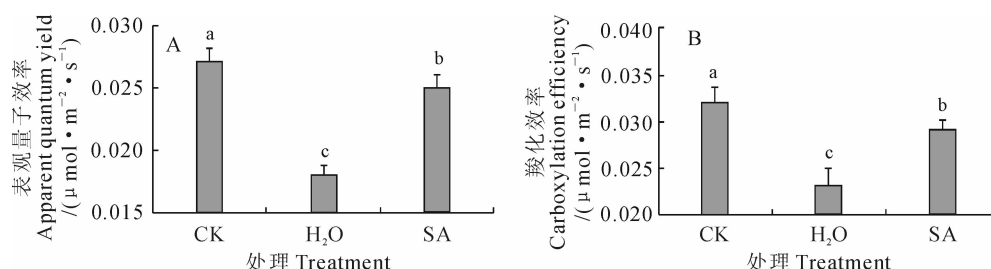


图4 夜间低温处理恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片表观量子效率(A)和羧化效率(B)的影响
不同字母表示处理间在 0.05 水平存在显著性差异 ($P < 0.05$)

Fig. 4 Effect of SA on apparent quantum yield(A) and carboxylation efficiency(B) in cucumber seedling leaves during the recovery of the day after night chilling
Different letters meant significant difference among treatments at 0.05 levels

源 SA 可一定程度上促进黄瓜叶片这些荧光参数的恢复,从而提高叶片对光能的利用效率。

2.4 夜间低温胁迫恢复过程中 SA 对黄瓜幼苗叶片表观量子效率和羧化效率的影响

由图 4, A 可以看出,夜间低温处理恢复过程中,外源 SA 可显著提高黄瓜幼苗叶片表观量子效率恢复效果,其表观量子效率($0.025 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)恢复达到对照处理的 92.59%,比喷施清水处理提高了 38.89%;外源 SA 也可显著促进夜间低温处理后黄瓜幼苗叶片羧化效率的恢复,如在常温恢复 2 d 时 SA 处理的黄瓜幼苗羧化效率达到对照水平的 90.62%,比清水处理提高了 26.09%(图 4, B)。由此说明,夜间低温处理后常温恢复过程中,外源 SA 可有效促进黄瓜幼苗叶片对光能和 CO_2 利用能力的恢复。

3 讨 论

低温胁迫影响到光合作用的全过程,不仅影响到光合系统的功能^[14],而且还影响到气体交换、 CO_2 的固定和光能的利用等^[15]。低温胁迫后植物光合作用恢复速度及恢复水平,不仅受到低温胁迫的程度及时间影响,而且还受到恢复过程中环境的影响。李国强等^[16]研究表明,短期夜间亚低温处理的番茄幼苗叶片叶绿素含量及光合速率均可恢复到对照水平,但夜间低温处理的叶绿素含量不能恢复到处理前的水平。胡文海等^[17]报道,弱光有利于受胁迫番茄幼苗光合作用的迅速恢复,强光则不利于其恢复,甚至会造成一定的伤害^[18]。本研究结果表明,夜间低温处理显著降低了黄瓜幼苗叶绿素含量和净光合速率,在之后常温恢复过程中,与喷施清水处理相比,外源 SA 能明显提高黄瓜幼苗光合速率的恢复速度和水平。这主要是由于低温抑制了植

物叶绿素的合成,从而降低了叶绿素含量,但叶绿素含量在恢复过程中会逐渐增加^[19]。这与前人关于 SA 能提高逆境胁迫下黄瓜^[20]、玉米^[21]光合作用的结果类似。

气孔因素也直接影响到作物光合作用,低温胁迫引起植物叶片气孔关闭,气体交换受阻,进而降低了光合速率^[22]。在恢复过程中,叶片气孔会逐渐张开,气孔导度增加,气孔限制值减小,蒸腾速率增加。在本研究的低温胁迫后恢复过程中,黄瓜幼苗叶片气孔开展度增加,叶片气孔阻力减小,蒸腾速率增大,细胞间 CO_2 浓度也增大;与单纯常温恢复相比,外源 SA 处理显著提高了黄瓜幼苗叶片 C_i 、 G_s 和 T_r 数值,改善了气体交换的条件,有效地促进叶片对 CO_2 吸收利用效率^[14];同时,外源 SA 处理的黄瓜幼苗叶片羧化效率回升速度较快,恢复水平达到对照水平的 87.5%。这与李亮等在黄瓜上相关研究结果相似^[23]。

低温胁迫降低了作物叶片对光能的利用效率^[24],在恢复过程中,植物对光能的利用能力会逐渐升高。与气体交换参数相比,叶绿素荧光参数能更准确地反映植物对光能的利用特点,其中 F_v/F_m 可反映植物叶片的最大光化学效率, Φ_{PSII} 代表了植物叶片的实际光化学效率^[25]。本研究结果表明,夜间低温胁迫降低了黄瓜幼苗 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 ETR 值,它们在常温恢复过程中又逐渐升高,尤其是外源 SA 处理黄瓜幼苗 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 和 ETR 值回升速度较快,而且恢复水平较高。主要是由于 SA 可以作用于 PSII 反应中心^[26],能够加快黄瓜幼苗 PSII 反应中心的修复,提高其 PSII 反应中心活性、电子传递速率和光能转化利用效率,从而促进黄瓜幼苗光合作用的恢复。并且外源 SA 还可有效提高黄瓜幼苗 NPQ 值,说明在常温恢复过程中,为防止强光对

植物造成光抑制,还可以通过 SA 提高植物自身的保护能力。前人在辣椒上也有类似的报道^[27]。

总之,夜间低温降低了黄瓜幼苗光合作用,在常温恢复过程中,与喷施清水处理相比,外源 SA 能够提高受胁迫幼苗叶片叶绿素含量的回升速度和恢复水平,加快其气孔运动,增强其气体交换能力,进而促进其对 CO₂ 的吸收和利用;同时外源 SA 还可通

过提高净光合效率,增强叶绿体 PS II 反应中心活性,加速其电子传递和光能的转化,从而促进黄瓜幼苗在夜间低温处理后的快速恢复,提高其对低温季节设施环境的适应能力。有关外源 SA 在夜间低温胁迫后恢复过程中对黄瓜幼苗光合系统影响的分子机理还有待于进一步深入研究。

参考文献:

- [1] ALLEN D J, ORT D R. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants[J]. *Trends in Plant Science*, 2001, **6**(1): 36—42.
- [2] GARSTKA M, VENEMA J H, RUMAK I, *et al.* Contrasting effect of dark-chilling on chloroplast structure and arrangement of chlorophyll-protein complexes in pea and tomato: plants with a different susceptibility to non-freezing temperature[J]. *Planta*, 2007, **226**(5): 1 165—1 181.
- [3] LIU W (刘 伟), AI X ZH (艾希珍), LIANG W J (梁文娟), *et al.* Effects of salicylic acid on the leaf photosynthesis and antioxidant enzyme activities of cucumber seedlings under low temperature and light intensity[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2009, **20**(2): 441—445 (in Chinese).
- [4] ZHANG Z SH (张子山), YANG CH (杨 程), GAO H Y (高辉远). Chilling photoinhibition of photosystem I and its recovery after photoinhibition[J]. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 2013, **49**(4): 301—308 (in Chinese).
- [5] HUANG W, ZHANG S B, CAO K F. The different effects of chilling stress under moderate light intensity on photosystem II compared with photosystem I and subsequent recovery in tropical tree species[J]. *Photosynth. Research*, 2010, **103**(3): 175—182.
- [6] LI T L (李天来), LIU Y F (刘玉凤), SONG L Y (宋礼毓). Effect of sub-low night temperature treatment and recovery on the photoinhibition of tomato leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2008, **35**(7): 1 003—1 010 (in Chinese).
- [7] LIU Y F (刘玉凤), LI T L (李天来), JIAO X CH (焦晓赤). Effects of short-term sub-low night temperature treatment and recovery on the photosynthesis and sucrose-metabolizing of tomato leaves[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2011, **38**(4): 683—691 (in Chinese).
- [8] LI L (李 亮), DONG CH J (董春娟), SHANG Q M (尚庆茂). Role of endogenous salicylic acid in responding of cucumber leaf photosynthetic systems to low temperature stress[J]. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2013, **40**(3): 487—497 (in Chinese).
- [9] CHANG Y X (常云霞), XU K D (徐克东), CHEN C (陈 璨), *et al.* Salicylic acid mitigating the inhibition of low temperature stress to soybean seedlings[J]. *Soybean Science* (大豆科学), 2012, **31**(6): 927—931 (in Chinese).
- [10] SHI Q H, ZHU Z J. Effects of exogenous salicylic acid on manganese toxicity, element contents and antioxidative system in cucumber[J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2008, **63**(1—3): 317—326.
- [11] STEVENS J, SENARATNA T, SIVASITHAMPARA K. Salicylic acid induces salinity tolerance in tomato (*Lycopersicon esculentum* cv. Roma): Associated changes in gas exchange, water relations and membrane stabilization[J]. *Journal of Plant Growth Regulation*, 2006, **49**(1): 77—83.
- [12] XU D Q (许大全), XU B J (徐宝基), SHEN Y G (沈允钢). Diurnal changes of photosynthetic efficiency of C₃ plants[J]. *Acta Phytophysiological Sinica* (植物生理学报), 1990, **16**(1): 1—5 (in Chinese).
- [13] DEMMIG A B, ADAMS W. Photoprotection and other responses of plants to high light stress[J]. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology*, 1992, **43**(1): 599—626.
- [14] LIANG W J (梁文娟), WANG M L (王美玲), AI X ZH (艾希珍), *et al.* Photosynthesis adaptation of cucumber seedlings to suboptimal temperature and low light intensity stress[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering* (农业工程学报), 2008, **24**(8): 240—244 (in Chinese).
- [15] WU X X (吴雪霞), YANG X CH (杨晓春), ZHU Z W (朱宗文), *et al.* Effects of exogenous 6-BA on photosynthesis, chlorophyll fluorescence characteristics and the allocation of absorbed light in eggplant seedlings under low temperature stress[J]. *Plant Physiology Journal* (植物生理学报), 2013, **49**(11): 1 181—1 188 (in Chinese).
- [16] LI G Q (李国强), QI M F (齐明芳), LI T L (李天来), *et al.* The change of photosynthesis and growth of tomato seedlings in recovery af-

- ter night sub-low temperature[J]. *Journal of Shenyang Agricultural University*(沈阳农业大学学报), 2006, **37**(3): 491—494(in Chinese).
- [17] HU W H(胡文海), YAN X H(闫小红), YUAN L F(袁丽芳), *et al.* The role of light intensity in the recovery of photosynthesis in tomato leaves after chilling under low light[J]. *Bulletin of Botanical Research*(植物研究), 2011, **31**(2): 164—168(in Chinese).
- [18] XIE J M(颀建明), YU J H(郁继华), HUANG G B(黄高宝), *et al.* Effects of light intensity on photoinhibition in pepper seedlings treated under low temperature and poor irradiance[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*(农业工程学报), 2008, **24**(5): 231—234(in Chinese).
- [19] KROL M, HURRY V M, MAXWELL D P, *et al.* Low grow temperature inhibition of photosynthesis in cotyledons of jack pine seedlings (*Pinus banksiana*) is due to impaired chloroplast development[J]. *Canadian Journal of Botany*, 2002, **80**(10): 1 042—1 051.
- [20] HAO J H(郝敬虹), YI Y(易 畅), SHANG Q M(尚庆茂), *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on membrane lipid peroxidation and photosynthetic characteristics of *Cucumis sativus* seedlings under drought stress[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*(应用生态学报), 2012, **23**(3): 717—723(in Chinese).
- [21] WANG ZH B(王志斌), GE Y X(葛云侠), WANG J M(王建民), *et al.* Effects of SGM on photosynthetic characteristics of maize plants in chilling stress[J]. *Journal of Maize Sciences*(玉米科学), 2010, **18**(6): 43—45(in Chinese).
- [22] HARTLEY I P, ARMSTRONG A F, MURTHY R, *et al.* The dependence of respiration on photosynthetic substrate supply and temperature; Integrating leaf soil and ecosystem measurements[J]. *Global Change Biology*, 2006, **12**(10): 1 954—1 968.
- [23] TUZET A, PERRIER A, LEUNING R. A coupled model of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2003, **26**(7): 1 097—1 116.
- [24] BAKER N R. Chlorophyll fluorescence: a probe of photosynthesis *in vivo*[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2008, **59**(1): 89—113.
- [25] ZHU X C, SONG F B, XU H W. Arbuscular mycorrhiza improves low temperature stress in maize via alterations in host water status and photosynthesis[J]. *Plant Soil*, 2010, **331**(1): 129—137.
- [26] JANDA K, HIDEĞ E, SZALAI G, *et al.* Salicylic acid may indirectly influence the photosynthetic electron transport[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2012, **169**(10): 971—978.
- [27] HE Y(何 勇), FU Q G(符庆功), ZHU ZH J(朱祝军). Effects of chilling under low irradiance on photosynthesis, chlorophyll fluorescence quenching and light allocation in pepper leaves[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*(核农学报), 2013, **27**(4): 479—486(in Chinese).

封面植物介绍——裸茎碎米荠

裸茎碎米荠(*Cardamine scaposa* Franch.) 隶属于十字花科(Brassicaceae)碎米荠属。多年生草本, 高 4~18 cm, 花葶状, 全株无毛。根状茎纤细, 匍匐生长。茎单一直立, 无叶。基生叶单一; 叶柄长 1~12 cm; 叶近于圆形或肾状圆形, 长 0.3~2.0 cm, 宽 0.5~3.0 cm, 基部心形, 边缘波状或全缘。无茎生叶。总状花序顶生, 具 2~10 朵花。果期花梗直立或上升, 长 1~4 cm, 基部的最长。萼片卵圆形或椭圆形, 长 3~4 mm, 宽 1.5~2.2 mm, 边缘膜质, 白色透明。花瓣白色, 倒卵形, 长 8~13 mm, 宽 5~7 mm, 顶端圆或微凹, 基部渐狭呈短爪。中间一对花丝长 4.5~8.0 mm, 基部略扩大; 外侧一对花丝长 2.5~4.5 mm; 花药狭长卵形, 长 1.5~1.8 mm; 花柱长 3.0~7.5 mm。每室具胚珠 8~14 个。长角果长 2.0~3.5 cm, 宽 1.2~1.7 mm; 光滑无毛。种子淡褐色, 长圆形, 长 2~3 mm, 宽 1.0~1.5 mm, 无翅。花期 4~6 月, 果期 6~7 月。

裸茎碎米荠是中国特有一种药用植物, 生长在海拔 1 400~2 900 m 的灌木丛和潮湿地带。分布于河北、内蒙古、陕西、山西和四川。

(图文由西北农林科技大学资环学院朱仁斌提供)