

温室黄瓜低温气象灾害指标

彭晓丹¹ 杨再强^{1,2*} 柳笛³ 张婷华¹ 周志龙¹ 朱凯¹ 赵翔¹

(1 南京信息工程大学江苏省农业气象重点实验室, 南京 210044; 2 南京信息工程大学应用气象学院, 南京 210044; 3 南京信息工程大学计算机与软件学院, 南京 210044)

摘要 以黄瓜品种津优 35 号(Jingyou 35)为试材,于 2011 年设计不同低温(5、7、9、11 ℃,以 25 ℃为对照)处理的人工环境控制试验,系统研究不同低温胁迫对黄瓜叶片光合作用特性及抗氧化酶活性的影响。结果表明:黄瓜叶片最大光合速率随低温胁迫程度的增加依次降低;在不同低温胁迫下,随胁迫时间的延长,黄瓜叶片光补偿点不断升高,光饱和点不断降低;在 5 ℃、7 ℃和 9 ℃低温处理下,随胁迫时间的延长,光系统 II 最大光化学效率呈下降趋势,光化学淬灭不断降低,非光化学淬灭的变化趋势相反;黄瓜叶片中的超氧化物歧化酶活性随着处理温度的降低先升高后下降;过氧化物酶活性在 9 ℃处理 24 h 后达到最高;过氧化物酶活性随着处理温度的降低而升高;丙二醛含量大于对照,随胁迫程度的增加先升高,后略有下降。通过研究建立了温室黄瓜低温气象灾害指标,划分为 4 个等级,分别为轻度、中度、重度和极重,可为设施农业气象服务提供科学依据。

关键词 黄瓜 光合特性 叶绿素荧光参数 酶活性 低温气象指标

引言

黄瓜(*Cucumis sativus* L.)起源于亚热带,是我国冬春设施栽培的主要蔬菜之一,生长过程对温度反应敏感,在深冬和早春生产中,低温胁迫成为限制黄瓜高产高效栽培的一个关键因子。因此,研究低温胁迫下黄瓜生理特性的影响,确定温室黄瓜低温气象灾害指标,对设施农业气象灾害预警及环境调控具有重要意义。同国外一些国家相比,我国对冷害的研究起步较晚,到目前只有 50 余年的历程^[1]。近年来,关于低温胁迫对作物生长及生理特性的研究受到国内外学者的广泛关注^[2-6]。前人研究表明,持续低温胁迫对作物的光合速率、叶绿素荧光参数、超氧化物歧化酶(SOD: SuperOxide Dismutase)活性等的生理过程均具有较显著的调控作用^[7-9]。据报道低温胁迫导致辣椒叶片的净光合速率、蒸腾速率、气孔导度、光系统 II 最大光化学效率(F_v/F_m)、光合电子传递量子效率呈下降趋势,天线

热耗散、反应中心过剩光能增加^[10]。Georgieva 等^[11]研究表明 4 ℃低温胁迫下豌豆的光合活性随最大荧光产量(F_m)和可变荧光(F_v)的降低而降低,而 F_o 无明显变化,在不低于 4 ℃的温度条件下,叶绿素荧光参数可逆,此温度范围内可以研究豌豆的冷适应机制。目前国内外关于利用光合作用、叶绿素荧光参数、酶活性同时系统地分析低温灾害致灾机理的报道尚不多见。本研究通过设计不同低温处理的设施黄瓜栽培试验,系统地研究黄瓜低温气象灾害指标,研究结果可为低温灾害防御及气象灾害预警提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2011 年 1—6 月在南京信息工程大学农业气象试验站中进行,供试材料为黄瓜津优 35 号,前期育苗在玻璃温室中进行。选择结果初期相对一致黄瓜植株(规格:苗叶片 9~11 叶,植株高度 1.4

<http://www.qxkj.net.cn> 气象科技

公益(气象)行业科研专项(GYHY201206024)、公益(气象)行业科研专项(GYHY201006028)、江苏省科技支撑项目(社会发展)(No. BE2010734)资助

作者简介:彭晓丹,女,1988 年生,硕士研究生,主要从事农业气象灾害指标的研究,Email:pxd19881217@163.com

收稿日期:2011 年 11 月 15 日;定稿日期:2012 年 4 月 5 日

* 通信作者,Email:yzq@nuist.edu.cn

m)移入智能型人工气候箱(TPG1260, Australian)中。试验设计 5、7、9、11℃共 4 个低温水平(以 25℃为对照),分别处理 12、24、48、72 h,每个温度水平设置 3 盆作为重复,不同温度水平在不同人工气候箱中进行,相对湿度和光合有效辐射分别控制在 85% 和 800 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,水分和养分条件维持在正常水平。

1.2 光合参数测定

分别在不同温度处理后 12、24、48、72 h 采用 LI-6400 便携式光合作用测定系统(LI-COR Biosciences Inc., USA)在上午 09:00—11:00 间测定叶片光合特性,测定时控制叶室中 CO_2 浓度为 375 $\mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,光量子通量密度设置为 2000、1500、1000、800、500、200、100、50、20、0 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。由 LI-6400 内置程序自动完成测定,每个处理重复 3 次。

1.3 荧光参数测定

叶绿素荧光参数的测量用 LI-6400 光合作用测定系统的 6400-40 荧光叶室,在上午 10:00 左右测量同一叶片的光适应荧光参数 F_v' 、 F_m' 、 F_s ,再测量暗适应荧光参数 F_0 、 F_m ,进而计算得到 PSII 最大量子产量(F_v/F_m)、光下开放的 PSII 反应中心的激发能捕获效率(F_v'/F_m')、作用光存在时 PSII 实际的光化学量子效率(Φ_{PSII})、光化学淬灭(qP)及非光学淬灭(qN),每个处理重复 3 次。

1.4 酶活性参数测定

SOD 活性采用氮蓝四唑(NBT)法测定,POD 活性采用愈创木酚法测定,CAT 活性采用紫外吸收法测定,丙二醛(MDA)含量采用 T BA (硫代巴比妥酸)显色法测定^[12]。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对黄瓜光合特性的影响

2.1.1 对黄瓜最大光合速率的影响

光合作用是植物合成有机质和获取能量的根本源泉,同时光合器官又是植物的冷敏感部位,低温直接影响光合机构的性能和活性^[13]。不同温度处理的黄瓜最大光合速率(P_{max})的变化见图 1。可以看出,随着低温胁迫程度的增加,黄瓜最大光合速率依次降低,温度越低,最大光合速率降低幅度越大;相同低温条件下黄瓜最大光合速率随处理天数的增加而降低。在 5℃低温处理下,最大光合速率经 48 h

出现负值;而 7℃低温处理 48 h 后最大光合速率仍为正值,经 72 h 后出现负值,最大光合速率负值的出现证实黄瓜停止生长。在同等的低温胁迫时间下,7℃低温处理下的最大光合速率高于 5℃处理,11℃低温处理下的最大光合速率略大于 9℃处理,且在 72 h 内 11℃和 9℃低温处理下的最大光合速率未出现负值。由此判断,低温 5℃处理 48 h 和 7℃处理 72 h 为低温胁迫的初步致灾指标,72 h 内 9℃和 11℃的低温处理显著抑制黄瓜的最大光合速率,但未出现致灾现象。

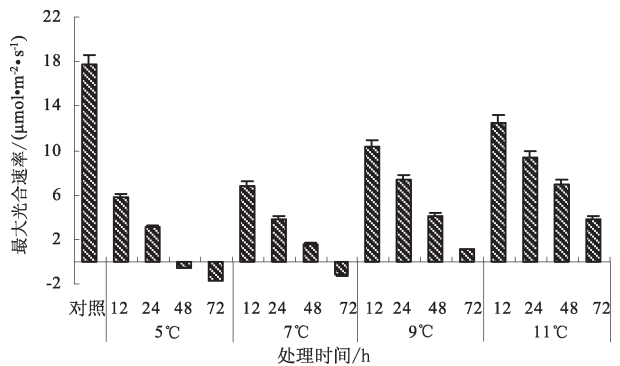


图 1 低温胁迫下黄瓜最大光合速率的变化

2.1.2 对黄瓜光补偿点和光饱和点的影响

光补偿点(LCP; Light Compensation Point)是植物利用弱光能力大小的重要指标,光补偿点越低,耐弱光的能力越强。光饱和点(LSP; Light Saturation Point)是植物利用强光能力大小的指标。净光合速率(P_n)最大时即为 P_{max} ,此时的光合有效辐射(PAR)为光饱和点(LSP),净光合速率(P_n)为 0 时的光合有效辐射(PAR)为光补偿点(LCP)。由表 1 可知,不同程度低温胁迫下 LCP 随处理时间的延长不断升高,低温 5℃处理 48 h 及以后,低温 7℃处理 72 h 后光强在 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 没有达到光补充点(LCP),即黄瓜的净光合速率在上述胁迫过程中始终小于 0,植物无干物质产生,该低温处理导致黄瓜致灾。不同温度处理下的 LSP 变化趋势不同:5℃、9℃和 11℃低温处理下,LSP 随胁迫时间的延长不断降低,7℃低温处理下,LSP 随胁迫时间的延长先增加后降低,且 72 h 低温胁迫后 LSP 较之前下降幅度较大,说明低温 7℃处理 48 h 内光合速率较大,但是由于呼吸速率同时增大,导致净光合降低。LCP 的升高和 LSP 的降低说明黄瓜维持光合呼吸平衡,在低温胁迫下需要更高的光强。初始光

能利用率(ϵ)为光合有效辐射(PAR)与对应的净光合速率(P_n)的比值,其中光合有效辐射(PAR)为 $200\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。光能利用率是表征植物固定太阳能效率的指标,指植物通过光合作用将所截获(吸收)的能量转化为有机干物质的效率^[14],初始光能利用率反映了植物对弱光的利用效率。5℃、7℃和11℃低温胁迫下, ϵ 随胁迫时间的延长不断降低,低温5℃和7℃处理72 h后 ϵ 为负,植物光合产生低于呼吸消耗。9℃低温胁迫在处理24 h后 ϵ 达到最低,此后随胁迫程度的增加和时间的延长 ϵ 不断增加。

表 1 低温胁迫下黄瓜光补偿点和光饱和点的变化

处理	光补偿点		光饱和点	初始光能利用率
	$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$		$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	
5℃	12 h	28.7a	1501.2d	0.0041d
	24 h	78.4b	1201.8c	0.0015b
	48 h		801.5b	0.0024c
	72 h		572.9a	-0.0015a
7℃	12 h	17.7a	1201.3b	0.0049d
	24 h	28.5b	1567.9c	0.0061c
	48 h	123.3c	1999.4d	0.0015b
	72 h		501.7a	-0.009a
9℃	12 h	13.8a	1538.0c	0.0035b
	24 h	27.1b	1201.6b	0.0010a
	48 h	48.6c	1000.4a	0.0045c
	72 h	68.9d	1001.9a	0.0049d
11℃	12 h	8.5a	1758.8d	0.0028a
	24 h	26.3b	1507.9c	0.0171d
	48 h	45.9c	1358.5b	0.0105c
	72 h	60.6d	1201.3a	0.0080b

注:a,b,c,d表示 $\rho=0.05$ 水平下不同程度的差异显著性,下同。

2.2 低温胁迫对黄瓜叶绿素荧光特性的影响

2.2.1 对黄瓜 PSII 最大光化学效率的影响

分析叶绿素荧光参数的变化有助于探明光合机构受影响的部位。 F_v/F_m 是暗适应下PSII最大光化学效率,反映PSII反应中心最大光能转换效率,图2反映低温胁迫对黄瓜PSII最大光化学效率的影响。由图2可知,随着处理时间的延长和低温胁迫强度的增加,与对照相比 F_v/F_m 呈下降趋势,表明低温导致光合机构的部分失活或破坏,PSII反应中心产生损害,其光能转化能力显著下降。72 h后不同低温处理下黄瓜的 F_v/F_m 分别下降了74.4%、70.7%、67.1%、36.6%,5℃低温处理下的 F_v/F_m 下降幅度最大。胁迫期间随着黄瓜自身保护机制

的形成,下降幅度趋于平缓,低温11℃处理48 h后的 F_v/F_m 大于处理24 h后的 F_v/F_m ,并随处理时间的延长呈上升趋势。

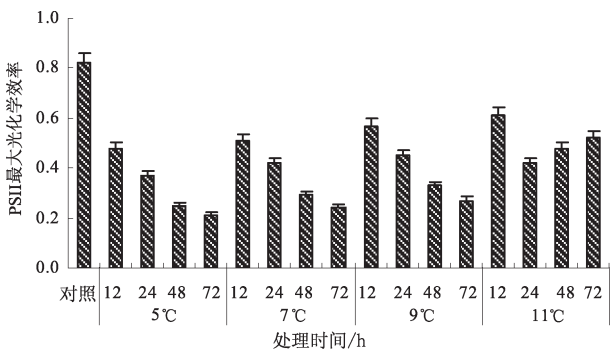


图 2 低温胁迫下黄瓜 PSII 最大光化学效率的变化

2.2.2 对黄瓜的光化学淬灭和非光化学淬灭影响

植物光合机构吸收的光能有3个去向:光化学反应、叶绿素荧光和热耗散。根据能量守恒: $1 = \text{光化学反应} + \text{叶绿素荧光} + \text{热耗散}$ 。即叶绿素荧光产量的下降(淬灭)有可能是由光合作用的增加或热耗散的增加引起的,因此可以通过测量叶绿素荧光参数来研究光化学反应和热耗散过程。荧光淬灭是叶绿体耗散能量的一种途径,分为光化学淬灭(qP)和非光化学淬灭(qN)两种形式。qP反映PSII所捕获的光量子转化成化学能的效率,qN反映PSII天线色素吸收的光能以热的形式耗散的那部分光能^[15]。

由图3可知:低温胁迫下qP与对照相比呈下降趋势,在5℃、7℃和9℃低温处理下,随胁迫时间的延长qP不断降低,而在11℃低温处理下,qP呈现先降后增的趋势,这是因为轻度胁迫能够促进植物体应急机制的产生,使得植物对胁迫产生抗性。与qP的变化相反,低温胁迫下qN与对照相比呈下降趋势,在5℃、7℃和9℃低温处理下,随胁迫时间的延长qN不断升高,而在11℃低温处理下,qN呈现先增加后降低的趋势。qP与PSII的光化学反应有关,反映了PSII原初电子受体QA的氧化还原状态,qP的降低说明QA重新氧化能力减弱,PSII的电子传递活性下降^[16]。qN与ATP和NADPH的形成、累积及光合膜的状态有关,qN的升高说明黄瓜通过耗散多余能量以保护光合机构免受低温伤害的能力增强^[17]。

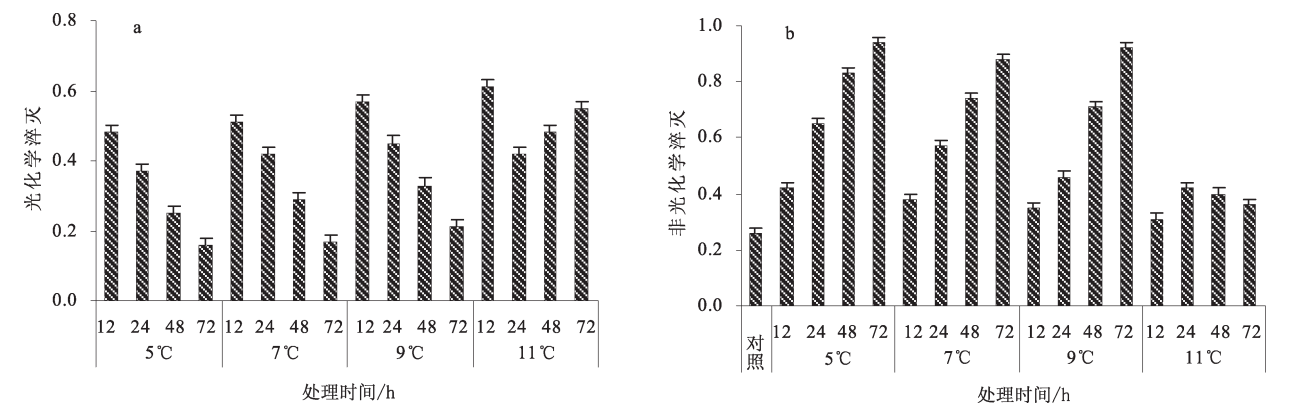


图 3 低温胁迫下黄瓜 PSII 光化学淬灭(a)和非光化学淬灭(b)的变化

2.3 低温胁迫对黄瓜抗氧化酶活性的影响

SOD、POD 和 CAT 统称保护酶, SOD 的作用是清除超氧自由基 O_2^- , 同时产生歧化产物 H_2O_2 , POD 和 CAT 主要起到酶促降解 H_2O_2 的作用, 将 H_2O_2 直接分解为 H_2O 和 O_2 予以清除^[18]。MDA 是膜脂过氧化分解的主要产物之一, 其含量与植物受伤害程度呈正相关。SOD、POD 和 CAT 活性, MDA 含量是较好地反映植物抗逆能力的指标^[19]。

低温胁迫对黄瓜 SOD、POD、CAT 和 MDA 的影响如表 2 所示。由表 2 可以看出, 不同程度的低温胁迫下 SOD 酶的活性呈现不同的变化趋势, 在 5℃ 和 7℃ 的低温处理下, SOD 酶的活性随胁迫时

间的延长呈下降趋势, 与对照相比, 在 5℃ 低温胁迫 48 h 后 SOD 酶活性降低, 逆境下植物会产生更多的氧自由基无法被及时清除, 导致膜脂过氧化而导致膜系统受损, 最终组织受到破坏^[20]; 在 9℃ 和 11℃ 的低温处理下, SOD 酶的活性随胁迫时间的延长呈上升趋势, 且在 9℃ 处理 48 h 后 SOD 酶活性达到最大值。与对照相比, 在 5℃ 和 7℃ 低温胁迫下 POD 酶活性降低, 在 9℃ 和 11℃ 的低温胁迫下 POD 酶活性升高, 在 9℃ 处理 24 h 后 POD 酶活性达到最高, 之后随胁迫程度的加剧和处理时间的延长活性降低。CAT 酶活性在不同程度的低温胁迫下均大于对照处理, 随胁迫时间的延长, 在 5℃ 和

表 2 低温胁迫下黄瓜酶活性的变化

处理	SOD		POD		CAT		MDA	
		$U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$		$U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$		$U \cdot g^{-1} \cdot min^{-1}$		$\mu mol \cdot g^{-1}$
对照		513.99		127.29		1.36		0.006
5℃	12 h	618.02±0.23d		75.26±0.46c		1.47±0.76a		0.049±0.014a
	24 h	530.97±0.73c		102.5±0.30d		3.45±0.45d		0.049±0.006a
	48 h	480.34±0.61b		72.35±0.48b		2.90±0.62c		0.051±0.009b
	72 h	367.52±0.31a		58.39±0.72a		1.58±0.37b		0.052±0.027c
7℃	12 h	713.77±0.11d		79.65±0.32b		1.53±0.39b		0.050±0.007a
	24 h	675.62±0.42c		106.8±0.65d		2.39±0.58d		0.063±0.004b
	48 h	656.96±0.80b		86.57±0.44c		1.78±0.37c		0.070±0.006c
	72 h	608.61±0.27a		64.82±0.29a		1.07±0.52a		0.082±0.002d
9℃	12 h	631.71±0.58a		87.71±0.52b		1.48±0.85a		0.036±0.008a
	24 h	741.80±0.05b		261.6±0.34d		1.97±0.69b		0.041±0.012b
	48 h	893.37±0.58c		150.8±0.61c		2.12±0.55c		0.045±0.007c
	72 h	1006.2±0.14d		49.5±0.28a		2.59±0.38d		0.052±0.002d
11℃	12 h	539.56±0.64a		71.79±0.28a		1.43±0.12a		0.027±0.004a
	24 h	679.49±0.56b		81.19±0.39b		1.49±0.61b		0.031±0.002b
	48 h	758.56±0.44c		171.8±0.12c		1.64±0.49c		0.034±0.007c
	72 h	863.91±0.39d		286.3±0.17d		1.83±0.37d		0.039±0.001d

7℃低温处理下CAT酶活性先增加后降低,在9℃和11℃低温处理下CAT酶活性呈上升趋势。MDA含量随胁迫程度的增加先升高后略有下降,在相同程度的低温胁迫下随时间的延长MDA含量增加,表明随低温胁迫时间的延长膜质过氧化程度减小,组织自动氧化速率增大,机体中清除自由基的能力减弱,细胞质膜在活性氧攻击下发生了过氧化,完整性受到损伤^[21]。

3 设施黄瓜低温气象灾害等级指标的确定

低温胁迫时黄瓜叶片光系统活性受到抑制,光合作用速率和最大光化学效率显著降低,因此可以根据它们表征低温胁迫的程度,得出低温胁迫指数LTI(R_{LTI})的计算公式

$$R_{LTI} = \frac{P'_{max}}{P_{max}} \frac{(F_v/F_m)'}{F_v/F_m} \times 10 \tag{1}$$

式中, R_{LTI} 为低温胁迫指数, P_{max} 和 P'_{max} 分别表示最适温度及低温状态下的最大光合速率, F_v/F_m 和 $(F_v/F_m)'$ 分别表示最适温度及低温状态下的PSII最大光化学效率。

将试验所得的 P'_{max} 、 P_{max} 、 $(F_v/F_m)'$ 、 F_v/F_m 值代入公式(1),计算得到LTI的值(表3),最后根据低温胁迫指数确定温室黄瓜低温气象灾害指标体系,如表4所示。在最适宜温度条件下黄瓜的LTI值为10,结合低温胁迫对黄瓜最大光合速率、叶绿素荧光参数及酶活性的影响,可以将9℃低温持续

12 h或11℃低温持续12 h划分为轻度胁迫(I级),即LTI在4~10之间;将5℃低温持续12 h、7℃低温持续12~24 h、9℃低温持续24 h及11℃低温持续24~72 h划分为中度胁迫(II级),即LTI在1~4之间;5℃低温持续24 h、7℃低温持续48 h及9℃低温持续48~72 h划分为重度胁迫(III级),LTI在0~1之间;将 P_{max} 出现负值的情况均划分为极重度胁迫(IV级),即5℃低温持续48 h及以上或7℃低温持续72 h。

表 3 温室黄瓜低温胁迫指数

处理		最大光合速率	最大光	$\frac{P'_{max}}{P_{max}}$	$\frac{(F_v/F_m)'}{F_v/F_m}$	低温胁迫指标
		$\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$	化学效率			
5℃	12 h	5.85	0.48	0.33	0.59	1.93
	24 h	3.14	0.37	0.18	0.45	0.80
	48 h	-0.56	0.25	-0.03	0.30	
	72 h	-1.67	0.21	-0.09	0.26	
7℃	12 h	6.87	0.51	0.39	0.62	2.41
	24 h	3.85	0.42	0.22	0.51	1.11
	48 h	1.56	0.29	0.09	0.35	0.31
	72 h	-1.20	0.24	-0.07	0.29	
9℃	12 h	10.35	0.57	0.58	0.70	4.06
	24 h	7.44	0.45	0.42	0.55	2.30
	48 h	4.14	0.33	0.23	0.40	0.94
	72 h	1.08	0.27	0.06	0.33	0.20
11℃	12 h	12.51	0.61	0.71	0.74	5.25
	24 h	9.43	0.42	0.53	0.51	2.72
	48 h	6.96	0.48	0.39	0.59	2.30
	72 h	3.89	0.52	0.22	0.63	1.39

表 4 温室黄瓜低温气象灾害指标体系

	灾害等级			
	轻度胁迫(I级)	中度胁迫(II级)	重度胁迫(III级)	极重度胁迫(IV级)
低温灾害指数	4.0~10.0	1.0~3.9	0~0.9	<0
气象指标	9℃低温持续时间小于12 h	5℃低温持续时间小于2 h; 7℃低温持续12~24 h; 9℃低温持续时间12~24 h; 11℃低温持续时间24~72 h	5℃低温持续24 h; 7℃低温持续时间48 h; 9℃低温持续时间48~72 h	5℃低温持续48 h及以上; 7℃低温持续72 h以上

4 讨论与结论

对作物造成伤害的主要因素除了温度外,还与光照、相对湿度、CO₂浓度、盐胁迫等有关^[22-24],本试验不同温度处理在同一人工气候箱内进行,控制光照、相对湿度、CO₂浓度等环境条件一致,仅考虑不同温度对黄瓜光合特性、叶绿素荧光参数及酶活性的影响。研究表明:黄瓜的最大光合速率(P_{max})

随低温胁迫程度的增加依次降低,在低温5℃处理48 h、7℃处理72 h后,黄瓜的最大光合速率出现负值。

不同程度低温胁迫下LCP随处理时间的延长不断升高,5℃、9℃和11℃低温处理下,LSP随胁迫时间的延长不断降低,7℃低温处理下,LSP随胁迫时间的延长先增加后降低。5℃、7℃和11℃低

温胁迫下, ϵ 随胁迫时间的延长不断降低, 低温 5°C 和 7°C 处理 72 h 后 ϵ 为负, 9°C 低温胁迫在处理 24 h 后 ϵ 达到最低, 此后随胁迫程度的增加和时间的延长 ϵ 不断增加。以上结果表明, 低温胁迫不仅抑制黄瓜的光能利用能力, 也影响其光能利用效率。该研究结果与郭延平等^[25]的研究结果一致。

叶绿素荧光参数被认为是研究内在膜低温伤害的探针, 叶绿素荧光特性与光合作用结合可以更好地反映低温胁迫对植物光合的伤害机理。本研究显示随着处理时间的延长和胁迫强度的增加, 黄瓜的 F_v/F_m 均降低, 表明光合转换能力降低, 5°C 低温胁迫下黄瓜的 F_v/F_m 下降幅度最大。低温胁迫下黄瓜的 qP 呈下降趋势, 且下降幅度为: $5^{\circ}\text{C} > 7^{\circ}\text{C} > 9^{\circ}\text{C} > 11^{\circ}\text{C}$ (处理)。与 qP 相反, 低温胁迫下黄瓜的 qN 呈上升趋势, 上升幅度与 qP 下降幅度一致: $5^{\circ}\text{C} > 7^{\circ}\text{C} > 9^{\circ}\text{C} > 11^{\circ}\text{C}$ (处理)。根据研究^[26], 低温对植物叶绿素荧光特性的影响与植物种类有关, 具有一定差异。本试验研究结果与 Gunnar 等^[27]研究结果相符, 而与李天来^[28]认为低温胁迫下番茄叶片中的 qP 上升的结论不一致。

低温胁迫下黄瓜叶片中的 SOD 活性随着处理温度的降低先升高后下降, 不同的低度处理 SOD 活性随处理时间延长变化趋势不同, POD 酶活性在 9°C 处理 24 h 后达到最高, 之后随着处理时间的延长和温度的降低而下降, CAT 酶活性随着处理温度的降低而升高, 不同的低温胁迫下变化趋势表现不一致, MDA 含量随处理温度的下降而先升高, 后略有下降。该结果与郁继华等^[28]研究结果基本一致。本试验将温度分别设置在 5°C 、 7°C 、 9°C 、 11°C , 对同一个处理在维持温度不变的情况下进行试验, 没有考虑温度的连续变化对植物生理特性的影响, 不同处理控制相对湿度、光照、 CO_2 浓度等外界环境条件一致, 但是在实际温室中, 低温往往伴随着寡照, 变温及低温寡照对黄瓜生理特性的影响有待进一步的研究。

综上结合 $P_{\max}$ 、 $P'_{\max}$ 、 $(F_v/F_m)'$ 、 F_v/F_m 得出低温胁迫指标 LTI, 研究发现 LTI 在 4~10 为轻度胁迫 (I 级), LTI 在 1~4 为中度胁迫 (II 级), LTI 在 0~1 为重度胁迫 (III 级), 将 P_{gmax} 出现负值的情况划分为极重度胁迫 (IV 级), 最终确定黄瓜低温致灾的气象指标, 研究结果为设施黄瓜气象灾害预警提供依据。

参考文献

- [1] 王书裕. 我国作物冷害研究的进展[J]. 气象科技, 1984, (4): 75-79.
- [2] Wolfgang B, Peter L. Long-term chilling of young tomato plants under low light. IV. differential responses of chlorophyll fluorescence quenching coefficients in lycopersicon species of different chilling sensitivity [J]. Plant Cell Physiol, 1994, 35(4): 585-591.
- [3] Liu P, Meng Q W, Zou Q, et al. Effects of cold-Hardening on chilling-induced photoinhibition of photosynthesis and on xanthophyll cycle pigments in sweet pepper [J]. Photosynthetica, 2001, 39(3): 467-472.
- [4] 钱芝龙, 丁犁平, 曹寿椿. 低温胁迫对辣(甜)椒幼苗膜脂过氧化水平及保护酶活性的影响[J]. 园艺学报, 1994, 21(2): 203-204.
- [5] Devacht S, Lootens P, Roldan R I, et al. Influence of low temperatures on the growth and photosynthetic activity of industrial chicory, Cichorium intybus L. partim [J]. Photosynthetica, 2009, 47: 372-380.
- [6] 张俊峰, 颀建明, 郁继华. 低温对辣椒幼苗光化学效率的影响[J]. 甘肃农业大学学报, 2009, (1): 89-92.
- [7] Liu Y J, Zhao Z G, Si J, et al. Brassinosteroids alleviate chilling-induced oxidative damage by enhancing antioxidant defense system in suspension cultured cells of Chorisporea bungeana [J]. Plant Growth Regul, 2009, (59): 207-214.
- [8] Allen D J, Donald R. et al. Impacts of chilling temperatures on photosynthesis in warm-climate plants [J]. TRENDS in Plant Science, 2001, 6(1): 36-42.
- [9] 杨华庚, 林位夫. 低温胁迫对油棕幼苗光合作用及叶绿素荧光特性的影响[J]. 中国农学通报, 2009, 25(24): 506-509.
- [10] Gary C H, Valerie A, Margi C, et al. Seasonal changes in photosynthesis, protein composition and mineral content in rhododendron leaves [J]. Plant Science, 2006, 170: 314-325.
- [11] 郁继华, 舒英杰, 吕军芬, 等. 低温弱光对茄子幼苗光合特性的影响[J]. 西北植物学报, 2004, 24(5): 831-836.
- [12] 李合生. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000: 164-169, 260-263.
- [13] Srnlie R M. A Screening Method for Chilling Tolerance Using Chlorophyll II Fluorescence in Vivo [M]. New York: Academic Press, 1984: 471-474.
- [14] 赵育民, 牛树奎, 王军邦, 等. 植被光能利用率研究进展[J]. 生态学杂志, 2007, 26(9): 1471-1477.
- [15] Adam M G, Harry Y Y. Zeaxanthin formation and energy-dependent fluorescence quenching in pea chloroplasts under artificially mediated linear and cyclic electron transport [J]. Plant Physiol, 1991, 96(2): 635-643.
- [16] Demmig A, Dams B. Carotenoids and photo-protection in plant: A role for the xanthophylls zeaxanthin [J]. Biochem

Biophys Acta, 1990, (1020): 1-9.

[17] Smirnoff N. The role of active oxygen in the response of plants to water deficit and desiccation [J]. New Phytologist, 1993, 125: 27-58.

[18] Roxas V P, Lodhi S A, Garrett D K, et al. Stress tolerance in transgenic tobacco seedlings that overexpress glutathione transferase /glutathione peroxidase [J]. Plant and Cell Physiology, 2000, 4(1): 1229-1234.

[19] 张恩平, 张淑红, 司龙亭, 等. NaCl 胁迫对黄瓜幼苗子叶膜脂过氧化的影响[J]. 沈阳农业大学学报, 2001, 32(6): 446- 448.

[20] Shen W Y, Nada K, Tachibana S. Effect of cold treatment on enzymic and nonenzymic antioxidant activities in leaves of chilling-tolerant and chilling-sensitive cucumber (*Cucumis sativus* L.) cultivars [J]. Journal of the american society for horticultural science, 1999, 68(5): 967-973.

[21] Patterson B D. An inhibitor of catalase induced by cold in chilling sensitive plant [J]. Plant Physiol, 1984, 76: 1014-1017.

[22] Kee S C, Martin N, Donald R, et al. The effects of chilling in the dark and in the light on photosynthesis of tomato: electron transfer reactions [J]. Photosynthesis Research, 1986, 8: 41-51.

[23] Li X G, Meng Q W, Jiang G Q, et al. The susceptibility of cucumber and sweet pepper to chilling under low irradiance is related to energy dissipation and water-water cycle [J]. Photosynthetica, 2003, 41(2): 259-265.

[24] 邹学校, 马艳青, 张竹青, 等. 环境因子对辣椒光合与蒸腾特性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2005, 14(4) : 15-20.

[25] 郭延平, 张良诚, 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.

[26] Gunnar O, Vaughan M H, Norman P A H. Low-temperature effects on phototsynthesis and correlation with freezing tolerance in spring and winter cultivars of wheat and rye [J]. Plant Physiol, 1993, 101: 245-250.

[27] 李天来, 刘玉凤, 宋礼毓. 夜间亚低温处理及其恢复对番茄叶片光抑制的影响[J]. 园艺学报, 2008, 35 (7): 1003-1010.

[28] 郁继华, 张国斌, 冯致. 低温弱光对辣椒幼苗抗氧化酶活性与质膜透性的影响 [J]. 西北植物学报, 2005, 25 (12): 2478-248.

Study of Low-Temperature Disaster Index of Greenhouse Cucumbers

Peng Xiaodan¹ Yang Zaiqiang^{1,2} Liu Di³ Zhang Tinghua¹
Zhou Zhilong¹ Zhu Kai¹ Zhao Xiang¹

(1 Jiangsu Key laboratory of agricultural Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;
2 College of Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044;
3 College of Computer and Software, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044)

Abstract: Based on the artificial environmental control experiments designed with different low temperatures (5, 7, 9, 11, 25 °C) as a control experiment (CK), the photosynthesis characteristics, fluorescence parameters, and antioxidant enzyme activity of cucumbers (*Cucumis sativus* L. cv. Jingyou 35) leaves were investigated in 2011. It aimed at determining the low temperature meteorological disaster index of greenhouse cucumbers. Results show that: the maximum photosynthesis rate of cucumber leaves reduced with the increasing low temperature stress; with the prolonging and aggravation of low temperature stress, the light compensation point of cucumbers rose and the light saturation point reduced; under the low temperature treatment of 5, 7, 9 °C, with the prolonging of the stress, the maximal efficiency of PS II photochemistry of cucumbers and photochemical quenching decreased, while the tendency of non-photochemical quenching was opposite to photochemical quenching; with the decreasing treatment temperature, the hyperoxide mutase activity in cucumber leaves increased first and then decreased; the peroxidase activity reached the highest after the 24 h treatment at 9 °C; as a result of reducing temperature, the catalase activity increased; affected by low temperature stress, malondialdehyde content was greater than that of the control, and with the increasing stress level, it rose first, then descended slightly. The low-temperature meteorological disaster index is established, which can be divided into 4 levels: mild, moderate, severe, and very severe, can provide a scientific basis for agrometeorological services.

Key words: *Cucumis sativus* L, photosynthetic characteristic, chlorophyll fluorescence parameter, enzymes activity, low temperature index