

# 低温寡照胁迫对设施番茄花期叶片衰老特性的影响

高冠<sup>1</sup>, 邹雨伽<sup>1</sup>, 杨再强<sup>1</sup>, 李军<sup>2</sup>

(1. 南京信息工程大学 气象灾害预报预警与评估协同创新中心, 江苏 南京 210044; 2. 上海市气候中心, 上海 200030)

**摘要:**为了研究低温寡照复合灾害对设施番茄叶片衰老特性的影响,以‘金粉5号’番茄为试材,于2015年2—5月在南京信息工程大学利用人工气候室设置了低温(昼/夜温度分别为18/8℃、16/6℃、14/4℃、12/2℃)和寡照(PAR分别为400、200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ )双因素交互试验,系统测定低温寡照处理下设施番茄叶片细胞色素、电导率以及抗氧化酶活性,并利用主成分分析计算各处理的综合得分。结果表明:短时间内不同低温寡照组合下低温寡照处理叶绿素含量有所波动,随着低温寡照胁迫时间的延长,番茄叶片叶绿素a、叶绿素b含量均有下降,叶绿素a/b也有不同程度的下降,其中昼夜温度为12/2℃,光合有效辐射为200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 处理10 d的叶绿素a、叶绿素b含量最小,分别比CK减少36.31%、36.11%;低温寡照处理下,叶片组织的超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性、丙二醛(MDA)含量以及相对电导率均有不同程度升高,昼夜温度为12/2℃,光合有效辐射为200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理的各指标始终处于较高水平,处理10 d时较CK分别升高了2.09、3.82、3.70、2.49、1.75倍。通过各低温寡照处理的叶绿素总量、保护酶活性以及相对电导率指标计算出各处理的综合得分得出各处理对番茄影响的严重程度排名,在同一寡照水平上,温度越低,番茄植株受的伤害越大;同一低温水平上,光合有效辐射越低,番茄植株受的伤害程度越大;低温对番茄的胁迫要大于寡照对番茄的胁迫。该研究可为番茄抵御低温寡照复合灾害提供科学的理论依据。

**关键词:**低温寡照;番茄;衰老特性;主成分分析

**中图分类号:**S 641.226 **文献标识码:**A **文章编号:**1001-0009(2016)05-0049-07

番茄(*Lycopersicon esculentum*)是我国广泛种植的经济作物,其适宜生长的温度为白天25~28℃,夜间16~18℃,是典型的喜温喜光植物<sup>[1-2]</sup>,而低温寡照是我国多数地区经常出现的复合灾害,连续多天的低温寡照复合灾害对作物的生长发育、产量及品质有很大影响<sup>[3-4]</sup>。因此,研究低温寡照对番茄衰老特性的影响可以为设施番茄生产中低温寡照灾害预警与防御提供科学依据。

叶绿素是与光合作用相关的最重要的色素,绝大部分叶绿素的作用是吸收及传递光能,仅极少数叶绿素a分子起转换光能的作用,通过叶绿素a、叶绿素b含量以及叶绿素a/b的变化可以判断植物叶片的衰老速度以

及衰老程度。细胞膜是物质进出细胞的媒介,通过细胞膜质的透性变化可以判断细胞膜结构和功能受损程度,是反映细胞膜受伤害程度的重要指标<sup>[5-7]</sup>,而相对电导率以及MDA含量均可以最直接地反映细胞膜质透性的变化,酶是植物体内活细胞产生的一种生物催化剂,而保护酶则是延缓植物受害的酶,它的变化也可以表征植物叶片是否受害以及受害的程度<sup>[8-10]</sup>。目前研究低温寡照的影响主要集中在低温或者弱光的单因子条件下,即在一定的弱光条件下变温,或在一定的温度条件下变光来研究。如国外有研究指出,低温胁迫下作物叶绿素含量降低<sup>[11-12]</sup>。POWELS<sup>[13]</sup>在水稻上的试验及MYERS<sup>[14]</sup>在小麦试验中均得出低温胁迫下叶绿素a/b下降的结果。在光照强度不足时,叶绿素含量升高,许多人从花生、大豆、辣椒等作物上也证实了这一结论<sup>[15]</sup>,尤其是叶绿素b含量,因为叶绿素b含量的增加有助于提高补光能力,有利于缓解因光强不足而引起的光合能力下降,同时叶绿素a/b下降。国内的研究低温弱光对叶绿素含量的影响则因低温强度和品种的不同而存在差异<sup>[16]</sup>。张兆轩等<sup>[17]</sup>研究发现10℃低温弱光处理后,番茄幼苗过氧化物酶(POD)活性、丙二醛(MDA)含量上升。张

**第一作者简介:**高冠(1992-),男,硕士研究生,研究方向为设施农业气象灾害预警。E-mail:nuist2010@qq.com

**责任作者:**杨再强(1967-),男,四川安岳人,博士,教授,博士生导师,现主要从事设施环境调控等研究工作。E-mail:yzq6751@163.com

**基金项目:**国家自然科学基金面上资助项目(41475107);国家“十二五”科技支撑计划资助项目(2014BAD10B07)。

**收稿日期:**2015-12-16

强<sup>[18]</sup>研究表明低温弱光会使番茄叶片的电导率升高。上述研究主要集中在单一持续低温或者寡照因子对设施作物生理特性的影响,而关于动态低温和寡照双因素对设施番茄衰老特性的研究较少报道。现以‘金粉 5 号’番茄为试验材料,设置低温寡照双因素控制试验,系统研究动态低温和寡照对番茄叶片细胞色素和抗氧化酶活性的影响,以期对设施番茄生产中低温寡照复合灾害的防御和环境优化管理提供理论支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

供试材料为番茄‘金粉五号’。

### 1.2 试验方法

试验于 2015 年 2—5 月在南京信息工程大学内人工气候箱(TPG-2009, Australian)中进行,用‘金粉 5 号’番茄种子在育苗盘中育苗,待出苗后移至盆中定植,定期浇水施肥,保持水分和养分在适宜的水平,待花期时将番茄植株移至人工气候箱中进行处理,试验设置低温寡照双因素试验,昼温/夜温分别设置 18/8℃、16/6℃、14/4℃、12/2℃ 4 个水平、光合有效辐射(Photosynthetically active radiation, PAR)设置 400、200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  2 个水平,共 8 个处理:L1T1(PAR 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 昼温/夜温 18/8℃)、L1T2(400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 16/6℃)、L1T3(400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 14/4℃)、L1T4(400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 12/2℃)、L2T1(200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 18/8℃)、L2T2(200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 16/6℃)、L2T3(200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 14/4℃)、L2T4(200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , 12/2℃),以昼温/夜温 28/18℃、PAR 1 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  为对照(CK),为了模拟自然低温寡照水平,该试验设计动态低温,14:00 达到最高温度,02:00 达到最低温度,每小时的温度通过程序控制。

### 1.3 项目测定

1.3.1 叶绿素含量测定 番茄叶绿素 a、叶绿素 b 含量的测定采用 HUGO 等<sup>[19]</sup>的方法,选取 3 棵处理后植株同一叶序上相同部位上功能叶片,放置于 96%的乙醇中,密封遮阴 48 h 至叶片中叶绿素完全被提取出,取浸出液用分光光度计分别在 663、646、470 nm 下比色测定吸光度<sup>[2]</sup>,每处理 3 次重复,取平均值计算叶绿素含量。

1.3.2 电导率测定 测定时取一洁净烧杯,加入 40 mL 蒸馏水,利用电导率仪(DDSJ 308, 上海)测其电导率  $R_0$ 。选取植株从顶端向下 5~8 片生长良好的叶片用蒸馏水擦拭干净,晾干,避开主叶脉,每份用直径 5 mm 的打孔器取叶肉组织,每份 10 片,重复 3 次,置于烧杯中,将烧杯用保鲜膜封好浸泡 5~6 h,测出其电导率  $R_1$ 。再放入水浴锅中沸水浴 30 min 后取出,冷却至常温后再次测定其电导率  $R_2$ 。相对电导率  $R$  的计算方法为: $R = (R_1 -$

$R_0) / (R_2 - R_0)$ 。

1.3.3 酶活性测定 选取植株从顶端向下 5~8 片生长良好的叶片,采集后用塑封袋封装迅速冻于液氮中,然后保存于冰箱中备用。制备酶样时称取 0.5 g 左右的样品放入研钵中,加入 1 mL pH 7.8 的磷酸缓冲液(0.2 mol/L 的  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  和 0.2 mol/L 的  $\text{K}_2\text{HPO}_4$  配制)和少量石英砂冰浴研磨,匀浆倒入离心管中,然后分 2 次加入 2 mL pH 7.8 的磷酸缓冲液冲洗研钵和研钵棒,匀浆也倒入离心管中,冷冻离心 20 min(0℃、4 000 r/min)取上清液(酶液)倒入试管中,置于 0~4℃ 下保存备用。超氧化物歧化酶(SOD)活性测定参照 RABINOWITCH 等<sup>[20]</sup>的方法,过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法<sup>[21]</sup>,过氧化氢酶(CAT)活性测定采用紫外吸收法<sup>[22]</sup>,丙二醛(MDA)含量测定参照 BRADFORD<sup>[23]</sup>的方法。

### 1.4 数据分析

采用 Excel 软件、DPS v7.05 及 SAS 9.1 软件进行相关统计计算和多重分析,Excel 软件作图。采用 Duncan 检验( $\alpha = 0.05$ )进行多重比较。

## 2 结果与分析

### 2.1 低温寡照对番茄叶片叶绿素的影响

从表 1 可以看出,叶绿素 a、叶绿素 b 含量以及叶绿素 a/b,随处理时间的延长,总体呈下降趋势,但在下降过程中有所波动。其中 L1T4、L2T4 的叶绿素 a 含量在处理 10 d 时下降显著,分别较 CK 下降 23.57%、36.31%。所有处理叶绿素 a 含量的最小值均出现在处理 10 d。叶绿素 b 含量在处理时间较短时,不同处理间叶绿素 b 含量变化不同,并有波动。随着低温寡照持续时间的延长,叶绿素 b 含量下降,并且不同光合有效辐射间叶绿素 b 含量差异显著,在处理 10 d 时,L1T4、L2T4 的叶绿素 b 含量明显低于其它处理,较 CK 下降 36.11%。L2T3 的叶绿素 a/b 始终处于较低水平,在处理结束时,较 CK 下降 14.51%。

### 2.2 低温寡照对番茄叶片保护酶活性的影响

2.2.1 低温寡照对番茄叶片超氧化物歧化酶活性的影响 从图 1 可以看出,所有处理的超氧化物歧化酶(SOD)活性随着处理天数的延长,呈现出上升的趋势,且所有处理的 SOD 活性均高于对照,由图 1(a)可知,在 PAR 为 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理下,SOD 活性以昼夜温度为 12/2℃ 的处理最高,18/8℃ 的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 3.03、2.21 倍。由图 1(b)可知,在 PAR 为 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理下,SOD 活性以昼夜温度为 12/2℃ 的处理最高,18/8℃ 的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 3.09、2.61 倍,在相同温度下,PAR 为 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理比 PAR 为 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理 SOD 活性平均高 5.8%。

表 1 低温寡照胁迫对番茄叶片叶绿素 a 含量、叶绿素 b 含量、叶绿素 a/b 的影响

Table 1 Effect of stress and recovery of low temperature and low irradiation on Chl a content, Chl b content and Chl a/b of tomato leaves

指标 Indicator	处理天数 Treatment days/d	L1T1	L1T2	L1T3	L1T4	L2T1	L2T2	L2T3	L2T4	CK
叶绿素 a 含量 Chl a content	2	2.12±0.16bc	1.88±0.14cd	1.82±0.13d	1.62±0.11d	2.44±0.02a	1.82±0.34d	2.20±0.087ab	1.22±0.12e	1.84±0.22d
	4	2.05±0.12a	2.03±0.14a	1.78±0.09ab	1.60±0.12b	1.82±0.12ab	1.85±0.32ab	1.67±0.07b	1.64±0.26b	1.65±0.03b
	6	2.27±0.07a	1.78±0.08bc	1.97±0.02b	1.71±0.17bc	1.92±0.37bc	1.80±0.09bc	1.61±0.15c	1.65±0.24bc	1.67±0.04bc
	8	1.93±0.05a	1.95±0.45a	1.94±0.02a	1.76±0.00ab	1.31±0.80b	1.77±0.11ab	1.90±0.26a	1.44±0.13ab	1.67±0.04ab
	10	1.52±0.09a	1.58±0.27a	1.58±0.21a	1.20±0.13b	1.29±0.08b	1.40±0.06ab	1.30±0.19b	1.00±0.06c	1.57±0.08a
叶绿素 b 含量 Chl b content	2	0.42±0.01b	0.36±0.03c	0.37±0.01bc	0.36±0.02c	0.51±0.02a	0.34±0.06c	0.48±0.01a	0.27±0.02d	0.39±0.05bc
	4	0.42±0.01a	0.37±0.03ab	0.38±0.01ab	0.33±0.02b	0.38±0.01ab	0.35±0.04b	0.35±0.01b	0.36±0.06ab	0.36±0.02ab
	6	0.50±0.03a	0.33±0.01cd	0.42±0.01b	0.36±0.02c	0.46±0.03ab	0.32±0.02cd	0.43±0.04b	0.30±0.04d	0.36±0.00c
	8	0.42±0.01a	0.34±0.04b	0.41±0.00a	0.32±0.01bc	0.31±0.15bc	0.32±0.02bc	0.42±0.04a	0.28±0.02c	0.36±0.01b
	10	0.37±0.01b	0.31±0.02d	0.39±0.02a	0.23±0.02f	0.29±0.00d	0.27±0.01e	0.34±0.01c	0.23±0.02f	0.36±0.01bc
叶绿素 a/b Chl a/b	2	5.06±0.22bc	5.22±0.08ab	4.91±0.12c	4.54±0.11de	4.83±0.15c	5.34±0.04a	4.57±0.17de	4.49±0.18e	4.74±0.02d
	4	4.93±0.22bc	5.56±0.13a	4.90±0.15bc	4.85±0.16bc	4.83±0.35ab	5.21±0.35ab	4.82±0.15bc	4.54±0.12c	4.54±0.20c
	6	4.54±0.11b	5.38±0.11a	4.72±0.04b	4.78±0.22b	4.23±0.48c	5.62±0.06a	3.75±0.04d	5.41±0.18a	4.69±0.08b
	8	4.60±0.08b	5.74±0.62a	4.70±0.03b	5.57±0.19a	4.27±1.00c	5.53±0.13a	4.55±0.20b	5.08±0.11ab	4.69±0.08b
	10	4.15±0.22bc	5.14±0.88a	4.05±0.28bc	5.17±0.92a	4.46±0.28b	5.25±0.18a	3.77±0.44c	4.27±0.13bc	4.41±0.19bc

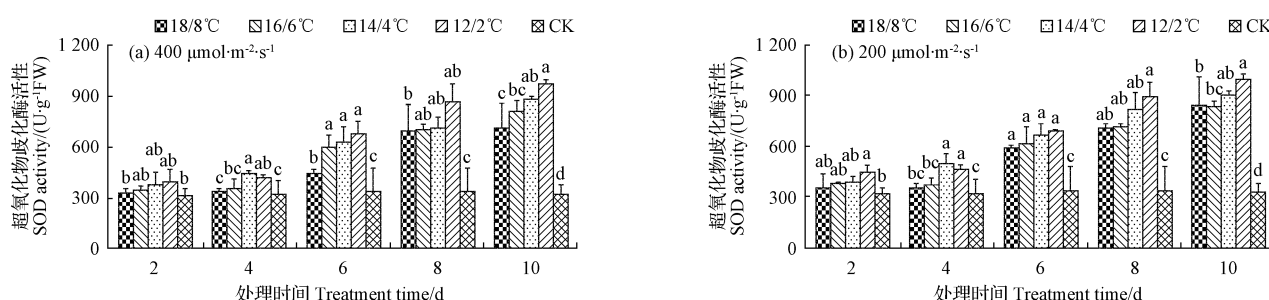
注:小写字母表示利用邓肯新复极差法检验在  $P<0.05$  水平下差异显著性。Note: Different lowercase letters ( $P<0.05$ ) show significant differences within each column according to the Duncan's Multiple Range test.

图 1 不同低温寡照处理下番茄叶片超氧化物歧化酶活性的动态变化

Fig. 1 The dynamic changes of tomato leaves' SOD activity under different treatments of low temperature and low irradiation

## 2.2.2 低温寡照对番茄叶片过氧化物酶活性的影响

由图 2 可以看出,所有处理的过氧化物酶(POD)活性随着处理天数的延长,呈现出上升的趋势,与 SOD 活性变化相比,POD 活性在 2、4、6 d 时变化不大,在 8 d 和 10 d 时才迅速上升,且所有处理的 POD 活性均高于对照,由图 2(a)可知,在 PAR 为  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理下,POD 活性以昼夜温度为  $12/2^\circ\text{C}$  的处理最高,

$18/8^\circ\text{C}$  的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 4.05、2.34 倍。由图 2(b)可知,在 PAR 为  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理下,POD 活性以昼夜温度为  $12/2^\circ\text{C}$  的处理最高, $18/8^\circ\text{C}$  的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 4.82、3.35 倍,在相同温度下,PAR 为  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理比 PAR 为  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理 POD 活性平均高 11.60%。

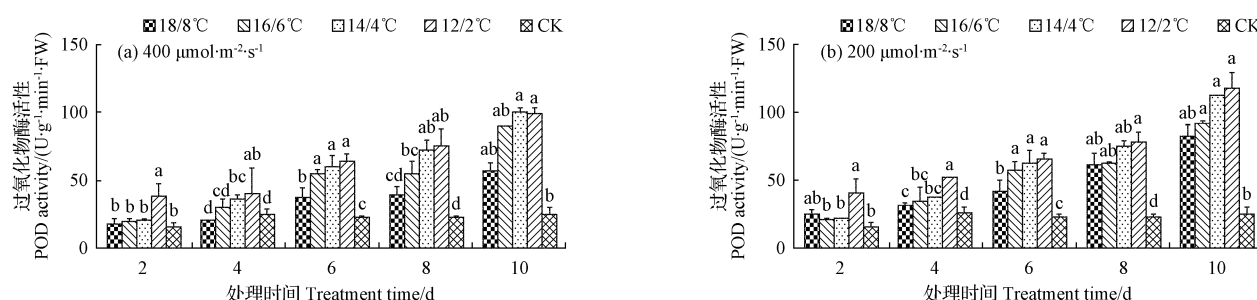


图 2 不同低温寡照处理下番茄叶片过氧化物酶活性的动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of tomato leaves' POD activity under different treatments of low temperature and low irradiation



## 2.2.3 低温寡照对番茄叶片过氧化氢酶活性的影响

图3表明,所有处理的过氧化氢酶(CAT)活性随着处理天数的延长,呈现出上升的趋势,且所有处理的CAT活性均高于对照,由图3(a)可知,在PAR为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理下,CAT活性以昼夜温度为 $12/2^\circ\text{C}$ 的处理最高, $18/8^\circ\text{C}$ 的处理最低,在处理结束时分

别为CK的4.17、3.35倍。由图3(b)可知,在PAR为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理下,CAT活性以昼夜温度为 $12/2^\circ\text{C}$ 的处理最高, $18/8^\circ\text{C}$ 的处理最低,在处理结束时分别为CK的4.70、3.67倍,在相同温度下,PAR为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理比PAR为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理CAT活性平均高6.2%。

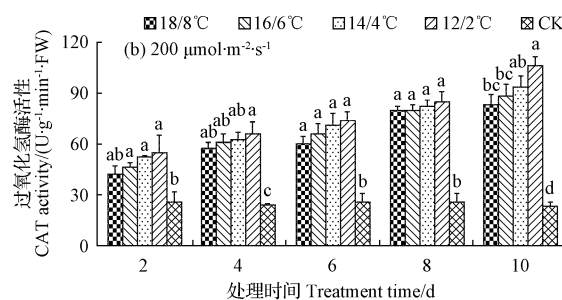
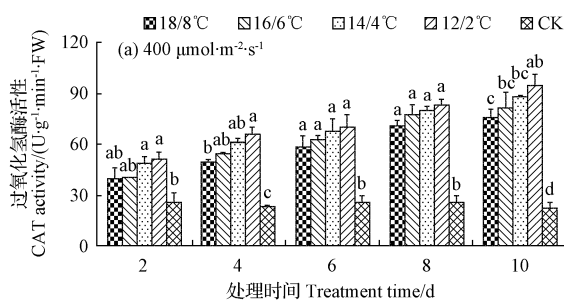


图3 不同低温寡照处理下番茄叶片过氧化氢酶活性的动态变化

Fig. 3 The dynamic changes of tomato leaves' CAT activity under different treatments of low temperature and low irradiation

## 2.3 低温寡照对番茄叶片丙二醛含量的影响

从图4可以看出,随着处理天数的增加,所有处理的丙二醛(MDA)含量均呈上升趋势,且均大于对照,由图4(a)可知,在PAR为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理下,MDA含量以昼夜温度为 $12/2^\circ\text{C}$ 的处理最高, $18/8^\circ\text{C}$ 的处理最低,在处理结束时分别为CK的3.28、2.42倍。

由图4(b)可知,在PAR为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理下,MDA含量以昼夜温度为 $12/2^\circ\text{C}$ 的处理最高, $18/8^\circ\text{C}$ 的处理最低,在处理结束时分别为CK的3.49、2.48倍,在相同温度下,PAR为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理比PAR为 $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理MDA含量平均高9.6%。

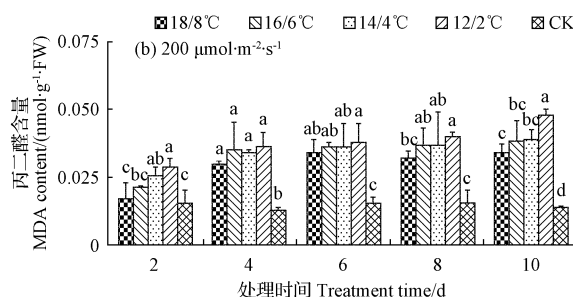
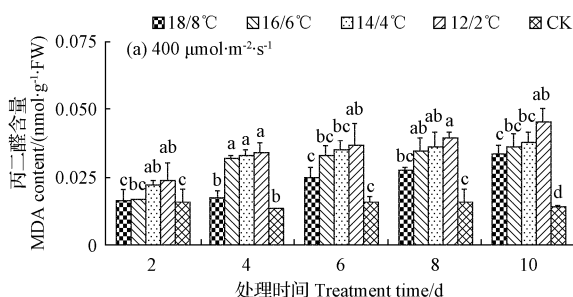


图4 不同低温寡照处理下番茄叶片丙二醛含量的动态变化

Fig. 4 The dynamic changes of tomato leaves' MDA content under different treatments of low temperature and low irradiation

## 2.4 低温寡照对番茄叶片相对电导率的影响

由图5可知,随着处理天数的延长,所有处理的相

对电导率均呈现出上升的趋势,且均大于对照,由图5(a)可知,在PAR为 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 的处理下,相

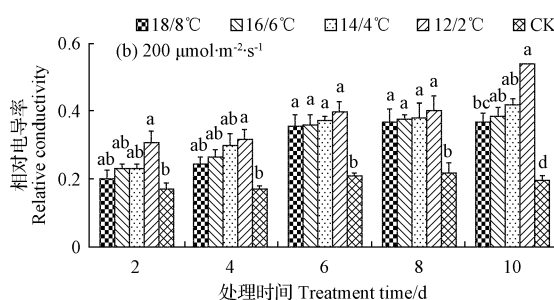
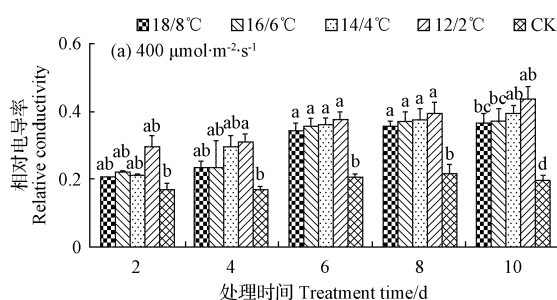


图5 不同低温寡照处理下番茄叶片相对电导率的动态变化

Fig. 5 The dynamic changes of tomato leaves' relative conductivity under different treatments of low temperature and low irradiation

对电导率以昼夜温度为 12/2℃ 的处理最高,18/8℃ 的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 2.23、1.86 倍。由图 5(b)可知,在 PAR 为 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理下,相对电导率以昼夜温度为 12/2℃ 的处理最高,18/8℃ 的处理最低,在处理结束时分别为 CK 的 2.75、1.88 倍,在相同温度下,PAR 为 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理比 PAR 为 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  的处理相对电导率平均高 4.5%。

## 2.5 低温寡照下各指标主成分分析

将经过低温寡照处理的番茄叶片的叶绿素总量、SOD 活性、POD 活性、CAT 活性、MDA 含量以及相对电导率进行主成分分析,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,低温寡照胁迫下第一个主成分的贡献率达到了

表 2 低温寡照处理番茄各指标的主成分分析

Table 2 Principal component result of every indicators for tomato under low temperature and low irradiation stress

指标	叶绿素总量	超氧化物歧化酶活性	过氧化物酶活性	过氧化氢酶活性	丙二醛含量	相对电导率	特征值	贡献率
Indicator	Total chlorophyll a content	SOD activity	POD activity	CAT activity	MDA content	Relative conductivity	Eigenvalue	Contribution rate
Prin1	-0.390 266	0.413 655	0.413 826	0.416 552	0.409 555	0.405 067	5.627 222 95	0.937 9

表 3 各处理的综合得分

Table 3 Composite scores of every treatments

处理	L1T1	L2T1	L1T2	L2T2	L1T3	L2T3	L1T4	L2T4
Treatment								
得分 Score	-3.811 33	-1.552 54	-1.398 93	-0.208 87	-0.076 30	1.041 66	2.189 39	3.816 93

## 3 结论与讨论

叶绿素作为植物光合作用过程中最重要的色素,与植被的光能利用及转化效率密切相关<sup>[24]</sup>,叶绿素光合作用的物质基础,是光合作用的光敏化剂<sup>[25]</sup>。叶绿素包括叶绿素 a 和叶绿素 b,其中绝大部分叶绿素 a 分子和全部叶绿素 b 分子主要起捕捉和转递光能的作用,少数特殊状态的叶绿素 a 分子有将光能转换为电能的作用。不同逆境对植株叶绿素含量影响有所差异<sup>[26]</sup>。研究表明在低温寡照处理下,处理时间不同对叶绿素含量影响不同,与孙治强等<sup>[27]</sup>在西葫芦上的研究结论一致。低温寡照综合作用对番茄叶绿素含量高低的影响结果取决于低温与寡照相互作用的大小,如果低温的作用大于寡照,则叶绿素含量可能会下降,若低温的作用弱于寡照,则叶绿素含量可能会升高<sup>[18]</sup>,研究表明在低温寡照前期叶绿素含量有所波动,在某一处理时间,叶绿素含量高于 CK,与庞金安等<sup>[28]</sup>在黄瓜幼苗的试验结论一致。随着处理时间的增加,叶绿素含量下降,且叶绿素 a 和叶绿素 b 含量变化趋势一致。叶绿素 a/b 也有所下降,且与 CK 相比不同处理间差异不同,与黄伟等<sup>[29]</sup>在对“毛粉 802”和“Skala”研究中番茄叶片中各成分含量降低,叶绿素 a/b 几乎全都高于对照处理结论不同。这可能是不同品种间抗逆性不同,番茄所处发育时期不同的原因。

0.937 9,所以第一个主成分足以描述番茄在低温寡照胁迫下的情况。所有指标的系数均比较接近,说明低温寡照对番茄生理特性的影响需要用所有指标来共同描述才比较科学。

根据处理的各指标的数值,由主成分的特征向量计算出番茄在低温寡照胁迫下,即各处理的综合得分,如表 3 所示(负值说明得分低于平均水平)。从表 3 可以看出,L1T1、L2T4 与其它处理差异很大,各处理对番茄影响的严重程度排名为 L1T1<L2T1<L1T2<L2T2<L1T3<L2T3<L1T4<L2T4,L1T1 与 L2T1、L1T2 与 L2T2、L1T3 与 L2T3、L1T4 与 L2T4 相差比较大,与上述处理间的差异相比,L2T1 与 L1T2、L2T2 与 L1T3、L2T3 与 L1T4 差异不大。

低温寡照胁迫会造成番茄叶片细胞膜不同程度的伤害,使膜的选择透过性降低或丧失,导致细胞内电解质外渗,组织浸出液的电导率增大。通过测定组织浸出液的电导率变化即可反映出膜受害程度<sup>[30]</sup>。张强<sup>[18]</sup>研究发现低温弱光会使番茄的电导率上升,与该研究结果一致,该研究表明,在处理期间,随着处理时间的延长,低温寡照严重程度的增加,番茄叶片的电导率呈现出上升的趋势,说明低温寡照胁迫使番茄叶片的细胞膜透性降低,细胞内的电解质外渗,对番茄叶片造成伤害。

植物在受到逆境胁迫时,体内会积累活性氧自由基,使植物细胞膜的结构和功能遭到破坏<sup>[31]</sup>。酶是植物体内活细胞产生的一种生物催化剂,它的变化也可以表征植物叶片是否受害以及受害的程度。番茄叶片的 SOD、POD 和 CAT 活性随着处理天数的增加以及低温寡照程度的加深而升高,说明低温寡照复合灾害使番茄叶片产生了有害物质,需要酶来清除,因此酶活性增加。SOD 活性增加有助于番茄叶片消除新陈代谢过程中产生的有害物质<sup>[32]</sup>。周艳虹等<sup>[33]</sup>认为低温弱光胁迫会使 SOD 活性上升,与该研究结果一致。POD 活性增加有助于番茄叶片清除逆境过程中产生的过氧化氢,减轻过氧化氢对细胞的伤害<sup>[34]</sup>;CAT 活性增加有助于催化过氧化氢分解成 O<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O,使得 H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> 不至于与 O<sub>2</sub> 在铁螯合物作用下反应生成非常有害的·OH;MDA 含量增

加,说明番茄叶片膜脂过氧化程度加深<sup>[35]</sup>,MDA 含量的积累会对膜和细胞产生进一步的伤害<sup>[36]</sup>。与陈贵等<sup>[37]</sup>认为膜脂过氧化作用可以产生 MDA,而 MDA 含量的高低可以反映细胞膜损伤程度的大小的结论一致。

通过对低温寡照处理下各指标进行主成分分析,并计算各处理的综合得分,结果表明在同一寡照水平上,温度越低,番茄叶片受害的程度越深;在同一低温水平上,光合有效辐射越低,番茄叶片受害的程度越深;由综合得分排序可以看出,同样的低温条件下光合有效辐射由  $400 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  降低到  $200 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  番茄受伤害的程度要小于同样的光合有效辐射下温度下降  $2^\circ\text{C}$  时番茄受伤害的程度,且由受伤害程度  $L2T1 < L1T2, L2T2 < L1T3, L2T3 < L1T4$  可以看出,在温度较低时,低温对番茄的胁迫要大于寡照对番茄的胁迫,但上述处理间的差异不大,试验结果可能会受其它因素的影响而产生波动。

### 参考文献

- [1] HU W H, ZHOU Y H, DU Y S, et al. Differential response of photosynthesis in greenhouse and field-ecotypes of tomato to long-term chilling under low light[J]. Journal of Plant Physiology, 2006, 163: 1238-1246.
- [2] COLEMAN W K, GREYSON R I. The growth and development of the leaf in tomato (*Lycopersicon esculentum*). I. The plastochron index, a suitable basis for description[J]. Can J Bot, 1976, 54: 2421-2428.
- [3] 魏瑞江. 日光温室低温寡照灾害指标[J]. 气象科技, 2003(1): 50-53.
- [4] 关福来, 杜克明, 魏瑞江, 等. 日光温室低温寡照灾害监测预警系统设计[J]. 中国农业气象, 2009(4): 601-604.
- [5] CHEN H J. Electrolyte leakage and Ethylene production induced by chilling injury of papayas[J]. Hort Science, 1985(6): 1070-1072.
- [6] 舍戈. 未结冰低温胁迫下小麦叶细胞质膜透性的变化进程及性质[J]. 植物生理学报, 1991(3): 295-300.
- [7] 王飞, 陈文登, 李嘉瑞. 应用 Logistic 方程确定杏枝条低温半致死温度的研究[J]. 河北农业技术师范学院, 1998(4): 30-35.
- [8] SMILLIE R M. A method for chilling tolerance using chlorophyll fluorescence *in vivo*[M]. New York: Academic Press, 1984: 471-474.
- [9] HORTON P. Non-photochemical quenching of chlorophyll fluorescence [M]. In: Jennings R C. Light as an Energy Source and information Carrier in Plant Physiology. New York: Plenum Press, 1996: 99-112.
- [10] KRAUSE G H. Chlorophyll fluorescence and photosynthesis[M]. The Basics Ann Rew Plant Physiol Plant Mol Boil, 1991, 42: 313-349.
- [11] HETHERINGTON S E, He J, Smillie R M. Photoinhibition at low temperature in chilling-sensitive and resistant plants[J]. Plant Physiology, 1989, 90: 1609-1615.
- [12] FRIEND D J C. The control by state transition of the distribution of excitation energy in photosynthesis[J]. Physiol Plant, 1960, 13: 776-785.
- [13] POWELS S B. Photoinhibition of photosynthesis induced by visible light[J]. Annu Rev Plant Physiol, 1984, 35: 15-44.
- [14] MYERS J. Is there significant cyclic electron flow around photoreaction I in cyanobacteria? [J]. Photosynth Res, 1987(14): 55-69.
- [15] LYONS J M, GRAHAM D, RAISON J K, et al. Low temperature stress in crop plants: the role of the membrane[M]. New York: Academic Press, 1979: 565-578.
- [16] 张国斌. 低温弱光对辣椒幼苗生长与光合生理特性的影响[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2005: 24-25.
- [17] 张兆轩, 万赛罗, 欧超, 等. 低温弱光对以色列番茄幼苗生长及生理指标的影响[J]. 激光生物学报, 2007(5): 608-613.
- [18] 张强. 低温弱光对番茄形态和生理生化影响的研究[D]. 郑州: 河南农业大学, 2003: 31-41.
- [19] HUGO A P, JOSE V S, LAURCIO E, et al. Leaf gas exchange, chloroplastic pigments and dry matter accumulation in castor bean (*Ricinus communis* L.) seedlings subjected to salt stress conditions[J]. Industrial Crops and Products, 2008(27): 385-392.
- [20] RABINOWITCH H D, SKLAN D. Sunscald tolerance in tomatoes; Role of superoxide dismutase[J]. Planta, 1980, 148: 162-167.
- [21] LI H S. Plant physiological and biochemical principles and experimental techniques[M]. Beijing: Higher Education Press, 2000: 164-167.
- [22] CHANCE B, MAEHLI A C. Assay of catalase and peroxidase. Methods of Enzymology[M]. New York: Academic Press, 1955: 755-764.
- [23] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the determination of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding[J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72: 248-255.
- [24] RICHARDSON A D, DUGAN S P, BERLYN G P. An evaluation of noninvasive methods to estimate foliar chlorophyll content[J]. New Phytol, 2002, 153(1): 185-194.
- [25] 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.
- [26] 杨再强, 张波, 张继波, 等. 低温胁迫对番茄光合特性及抗氧化酶活性的影响[J]. 自然灾害学报, 2012(4): 168-174.
- [27] 孙治强, 白玉玲, 张惠梅, 等.  $\text{CO}_2$  施肥对日光温室西葫芦光合特性的影响[J]. 河南农业大学学报, 1997(4): 18-22.
- [28] 庞金安, 沈文云, 马德华. 黄瓜幼苗耐低温指标研究初报[J]. 天津农业科学, 1998(2): 55-58.
- [29] 黄伟, 任华中, 张福慢. 低温弱光对番茄苗期生长的光合作用的影响[J]. 中国蔬菜, 2002(4): 15-17.
- [30] 熊庆娥, 叶珍, 杨世民, 等. 植物生理学实验教程[M]. 成都: 四川科学技术出版社, 2003: 122-123.
- [31] 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 Japanese Society for Horticultural Science, 1999, 68(5): 967-973.
- [32] KAVITA S, SAREETA N. Heat exposure alters the expression of SOD, POD, APX and CAT isozymes and mitigates low cadmium toxicity in seedlings of sensitive and tolerant rice cultivars[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2012, 57: 106-113.
- [33] 周艳虹, 喻景权, 钱琼秋, 等. 低温弱光对黄瓜幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 应用生态学报, 2003(6): 921-924.
- [34] 曹锡清. 脂质过氧化对细胞与机体的作用[J]. 生物化学与生物物理进展, 1986(2): 17-23.
- [35] 朱世东. 茄果类幼苗低温伤害与膜脂过氧化作用[J]. 安徽农学院学报, 1991(2): 141-147.
- [36] WANG R G, CHEN S L, MA H Y, et al. Genotypic differences in antioxidative stress and salt tolerance of three *Poplars* under salt stress[J]. Frontiers of Forestry in China, 2006, 1(1): 82-88.
- [37] 陈贵, 胡文玉, 谢甫绵, 等. 提取植物体内 MDA 的溶剂及 MDA 作为衰老指标的探讨[J]. 植物生理学通讯, 1991(1): 44-46.



## Effect of Low Temperature and Low Irradiation Stress on Senescence of Greenhouse Tomato During Flowering Period

GAO Guan<sup>1</sup>, ZOU Yujia<sup>1</sup>, YANG Zaiqiang<sup>1</sup>, LI Jun<sup>2</sup>

(1. Collaborative Innovation Center on Forecast and Evaluation of Meteorological Disasters, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing, Jiangsu 210044; 2. Shanghai Climate Center, Shanghai 200030)

**Abstract:** Taking 'Jinfen 5' as experiment material, the artificial environment control of low temperature and low irradiation was conducted in Nanjing University of Information Science and Technology from February to May in 2015. The daily/night temperature was treated as four levels, 18/8°C, 16/6°C, 14/4°C and 12/2°C, photosynthetically active radiation(PAR) was set two levels, 400  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  and 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , and took daily/night temperature 28/18°C and PAR 1 000  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  as CK, chlorophyll a content, chlorophyll b content, chlorophyll a/b, SOD, POD, CAT activities, MDA content and relative conductivity were studied, to judge the effects of low temperature and low irradiation stress to the senescence of greenhouse tomato leaves. The results showed that with treat time extension, Chl a content, Chl b content and Chl a/b of tomato leaves were declined. The experiment lasted for 10 days at the case of daily/night temperature was 12/2°C, PAR was 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , Chl a content and Chl b content was the least, which decreased 36.31%, 36.11% respectively compared with the CK; moreover SOD, POD, CAT activities, MDA content and relative conductivity of tomato leaves was increased in varying extents with treat time extension. And the experiment lasted for 10 days at the case of daily/night temperature was 12/2°C, PAR was 200  $\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ , every index of tomato leaves always were in higher level than other treatments, they increased 2.09, 3.82, 3.70, 2.49 and 1.75 times respectively compared with the CK. By calculating index of each treatment with principal component analysis and ranking the severity that damaged the tomato, it showed that when at the same low irradiation level, the lower the temperature, or at the same low temperature level, the lower the PAR, the greater damage degree of tomato photosystem were caused. The study could provide scientific theory basis for defense of low temperature and low irradiation disaster in facility tomato.

**Keywords:** low temperature and low irradiation; *Lycopersicon esculentum*; senescence; principal component analysis

## 番茄的药用价值和食用价值

知识窗

**药用价值。**番茄具有止血、降压、利尿、健胃消食、生津止渴、清热解毒、凉血平肝的功效。由于番茄中维生素 A、C 的比例合适,经常食用可增强血管功能,预防血管老化。番茄中的类黄酮,既有降低毛细血管的通透性和防止其破裂的作用,还有预防血管硬化的特殊功效,可以预防宫颈癌、膀胱癌和胰腺癌等疾病。另外,还可以美容和治愈口疮。

**食用价值。**据营养学家研究测定:每人每天食用 50~100 g 鲜番茄,即可满足人体对多种维生素和矿物质的需要。番茄中的“番茄红素”具有抑制细菌的作用;番茄含有苹果酸、柠檬酸和糖类物质,富含胡萝卜素、维生素 C、维生素 B 以及维生素 B<sub>2</sub> 和钙、磷、钾、镁、铁、锌、铜和碘等多种元素,还含有蛋白质、糖类、有机酸、纤维素。番茄中含有丰富的抗氧化剂,而抗氧化剂可以防止自由基对皮肤的破坏,具有明显的美容抗皱的效果。

每 100 g 番茄的营养成分:能量 11 kcal,维生素 B 0.06 mg,蛋白质 0.9 g,脂肪 0.2 g,碳水化合物 3.3 g;核黄素 0.01 mg,烟酸 0.49 mg,维生素 C 14 mg,维生素 E 0.42 mg,钙 4 mg,磷 24 mg,钾 179 mg,钠 9.7 mg,碘 2.5  $\mu\text{g}$ ,镁 12 mg,铁 0.2 mg,锌 0.12 mg,铜 0.04 mg,锰 0.06 mg。

(来源:百度百科)