

朱雨晴,薛晓萍.寡照复光试验中设施番茄叶片保护酶活性的变化[J].海洋气象学报,2023,43(4):92-98.  
ZHU Yuqing, XUE Xiaoping. Changes in protective enzyme activity of protected tomato leaf in sparse sunlight and relighting experiments[J]. Journal of Marine Meteorology, 2023, 43(4): 92-98. DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.010. (in Chinese)

## 寡照复光试验中设施番茄叶片保护酶活性的变化

朱雨晴<sup>1</sup>, 薛晓萍<sup>2</sup>

(1. 济宁市气象局, 山东 济宁 272113; 2. 山东省气候中心, 山东 济南 250031)

**摘要:** 番茄是山东地区的主要设施作物之一, 研究光照对设施番茄的影响程度, 对山东地区的设施农业生产有重要意义。以无限生长型番茄“粉冠”为试材, 在花果期于日光温室内设置3、6、9、12和15 d共5个遮阴日数处理, 以日光温室内自然光为对照, 研究在不同遮阴日数下, 番茄叶片的保护酶活性和复光后叶片保护酶的恢复能力。结果表明: 寡照会使番茄叶片的保护酶活性升高, 比叶重减小; 随着遮阴日数的增加, 番茄叶片的保护酶和比叶重的恢复能力逐渐降低, 遮阴时间过长(12 d以上)则会对叶片光合系统产生不可逆的损伤, 使保护酶活性无法恢复。

**关键词:** 寡照; 恢复; 番茄; 保护酶; 比叶重

中图分类号: S641.2; S42 文献标志码: A 文章编号: 2096-3599(2023)04-0092-07

DOI: 10.19513/j.cnki.issn2096-3599.2023.04.010

## Changes in protective enzyme activity of protected tomato leaf in sparse sunlight and relighting experiments

ZHU Yuqing<sup>1</sup>, XUE Xiaoping<sup>2</sup>

(1. Jining Meteorological Bureau, Jining 272113, China; 2. Shandong Climate Center, Jinan 250031, China)

**Abstract:** Tomato is one of the main facility crops in Shandong. It is important to study the effect of light on protected tomato for the production of protected agriculture in Shandong. The experiment takes the infinite-growth-type tomato “Power Corolla” as experimental material to study the protective enzyme activity of tomato leaf under different shading days and the recovery capability of protective enzyme under relighting. Five shading treatments of tomatoes are set in solar greenhouse during the flowering and fruiting period: T1 (3-day shading), T2 (6-day shading), T3 (9-day shading), T4 (12-day shading), and T5 (15-day shading). Moreover, the growth of tomatoes under natural light in solar greenhouse is used as the control check. The results are as follows. Sparse sunlight would increase the protective enzyme activity of tomato leaf and reduce the specific leaf weight. As the number of shading days increases, the recovery capability of protective enzyme activity and specific leaf weight of tomato leaf would reduce. Long shading time (above 12 days) would cause irreversible damage to the photosynthetic system of leaf and make the protective enzyme activity unrecoverable.

**Keywords:** sparse sunlight; recovery; tomato; protective enzyme; specific leaf weight

收稿日期: 2022-04-10; 修回日期: 2022-11-17

基金项目: 山东省气象局科研项目(2020sdqxm15); 济宁市气象局科研项目(2022JNZL05); 山东省气候中心科研项目(2021sdqxz08)

第一作者简介: 朱雨晴, 女, 硕士, 工程师, 主要从事设施农业气象研究, 2806217750@qq.com。

通信作者简介: 薛晓萍, 女, 博士, 正高级工程师, 主要从事农业气象研究, xxpdyh@163.com。

## 引言

番茄,又称西红柿,是一种管状花目、茄科、番茄属的一年生或多年生草本植物,原产地为南美洲<sup>[1]</sup>。山东是我国的蔬菜大省,设施蔬菜种植面积约1 400多万亩<sup>①[2]</sup>,同时也是设施番茄的主要产区之一,因此,提高设施番茄的产量对山东设施蔬菜生产具有重要意义。近年来,北方地区设施农业发展的主要问题是秋冬季灾害天气频发<sup>[3-6]</sup>,受连阴天和雾霾的共同影响,秋冬季节日照时数显著减少。大棚内,作物生长所需要的水分、土壤、肥力、二氧化碳浓度均有专业人员调控,但光照仍然依赖于自然环境,多数大棚结构及设备相对简陋,无法抵御连阴雨、低温、寒潮等气象灾害<sup>[4]</sup>。在无法完善大部分日光温室环境的前提下,掌握光照对设施作物影响程度以应对气象灾害便显得尤为重要<sup>[7]</sup>。

前人研究<sup>[8-12]</sup>表明,低温寡照会影响植物叶片的生理生化功能,使植物体内保护酶活性发生变化。植物体内的保护酶系统主要包括超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)、丙二醛(malondialdehyde, MDA)、过氧化物酶(peroxidase, POD)和过氧化氢酶(catalase from micrococcus lysodeiktic, CAT)<sup>[9]</sup>, SOD、POD和CAT统称活性氧清除剂, SOD可以使逆境下植物体内累积的活性氧自由基转化成过氧化氢( $H_2O_2$ )和氧气( $O_2$ ),然后通过POD、CAT清除转化而来的 $H_2O_2$ 以维持植物体内活性氧代谢平衡<sup>[10-11]</sup>。MDA是细胞膜脂过氧化的产物之一,它的产生和积累又可反过来作用于膜系统,影响细胞膜透性并抑制蛋白质的合成,因此,MDA的活性反映着环境的胁迫程度<sup>[12-13]</sup>。熊宇等<sup>[14]</sup>发现,叶片比叶重和光合速率存在正相关关系,寡照环境会使叶片比叶重降低,进而影响植物的光合速率。现有研究内容多集中于以下两个方面:一是寡照会使番茄光合速率降低、叶绿素含量升高、生长发育受阻<sup>[14-20]</sup>;二是寡照会使番茄后期开花坐果进程推迟,果实品质与产量降低<sup>[21-25]</sup>。目前关于低温寡照对番茄的研究,有关叶片保护酶系统的变化前人涉猎较少。因此,本研究通过控制变量法,选取温室大棚为试验场地,测得不同遮阴环境下的番茄叶片保护酶活性变化,通过与未遮阴的自然状态组对照,得出不同程度

遮阴对番茄叶片保护酶活性的影响程度。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验设计

试验分为两个部分,分别在山东省临沂市和济宁市进行。试验1得出初步数据,试验2通过相同试验,得出数据对试验1进行验证、修正,最终数据结论来自修正后的试验1。实时监控棚内的气象数据,人工调控温室内环境,确保试验1与试验2处于相同的试验环境中<sup>[16]</sup>。番茄选取无限生长型品种“粉冠”为试材。遮阴试验开始后采用遮阳网(遮阳网规格为4针密度,遮阳率65%)覆盖的遮光方式(遮阳网覆盖于日光温室棚顶,高4.6 m),模拟阴雨(雪)天气温室内寡照环境。为了避免自然天气状况对试验结果产生影响,本研究利用小型自动气象站监控大棚内的实时气象因素,根据自然天气状况人工控制遮阴程度(参考熊宇等<sup>[14]</sup>的遮阴方式,按照阴雨天气不遮、多云天气遮1层、晴天遮2层的原则,确保试验期间,温室内遮阴处理的番茄最大光照强度低于 $200 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ ,试验期间各处理组的环境差异只有光照强度,其余条件完全相同)、人工控制温湿度和 $\text{CO}_2$ 浓度(通过炭盆增温、棚顶覆盖棉被保温、午间棚内通风降湿等方式),保证棚内除光照外环境因素均保持在高产范围内,光照强度保持在试验范围内。试验期间,棚内光合有效辐射(小时平均,下同)为 $0\sim 700 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ , $\text{CO}_2$ 浓度为 $0.35\sim 0.45 \text{ mL}\cdot\text{L}^{-1}$ ,气温为 $15\sim 25\text{ }^\circ\text{C}$ ,15 cm地温为 $22\sim 28\text{ }^\circ\text{C}$ ,土壤相对含水率为 $65\%\sim 75\%$ ,空气相对湿度为 $70\%\sim 90\%$ 。

田间管理按高产栽培水平进行,苗期施1次高氮肥,番茄进入幼果期(90%的植株开始结果后第10天)后施用氮磷钾(18-18-18)肥,以后每15 d施肥1次。试验1于2017年11月—2018年2月在沂南县的临沂设施农业气象试验站内进行,供试日光温室呈东西走向,长、宽和高分别为68.0、10.0和4.6 m。覆盖聚乙烯无滴膜,透光系数为75%。垄宽95 cm,行间距40 cm,株间距30 cm,每垄60株。供试土壤为沙壤土。10月1日定植,30 d后供试番茄植株高达65~75 cm,进入花果期。11月10日开始遮阴。

①1亩 $\approx 0.067 \text{ hm}^2$ 。

试验2于2021年11月—2022年2月在济宁市的兖州瑞鹏农业设施蔬菜大棚中进行,供试大棚呈东西走向、坐北朝南,长、宽、高分别为60.0、6.0和2.9 m。覆盖聚乙烯无滴膜,透光系数为75%。垄宽50 cm,行间距40 cm,株间距20 cm,每垄40株。供试土壤为沙壤土。10月7日定植,11月17日开始遮阴。

根据山东16个省辖市10 a内平均连阴雨日数统计,冬季持续阴天日数一般在15 d以内,因此,设计最大遮阴日数为15 d。10:00开始遮阴,设3 d(T1)、6 d(T2)、9 d(T3)、12 d(T4)和15 d(T5)5个连续遮阴处理和1个空白对照(control check, CK)处理,每组3个重复。每个处理结束后,于当日10:00标记叶片并撤去遮阳网恢复正常光照,同时测定该处理

和对照组(CK)的叶片保护酶活性和比叶重,观测完成后,将恢复光照的处理组作为恢复组。5个遮阴处理组分别对应5个恢复组,分别用T1H、T2H、T3H、T4H和T5H表示。恢复期间,分别在恢复期内的第3、6、9、12、15 d的10:00同时测量该组和CK的保护酶活性和比叶重。

## 1.2 气象数据测定

采用WS-GP2小型自动气象站分别获取日光温室遮阴和非遮阴条件下环境光合有效辐射。温室内气温、空气相对湿度通过美国WatchDog 2000数据采集器获取,数据采集频率每5 min一次,取1 h内平均值。试验期间,每日温室内最大光合有效辐射如图1a所示,日平均气温、相对湿度变化如图1b、c所示。

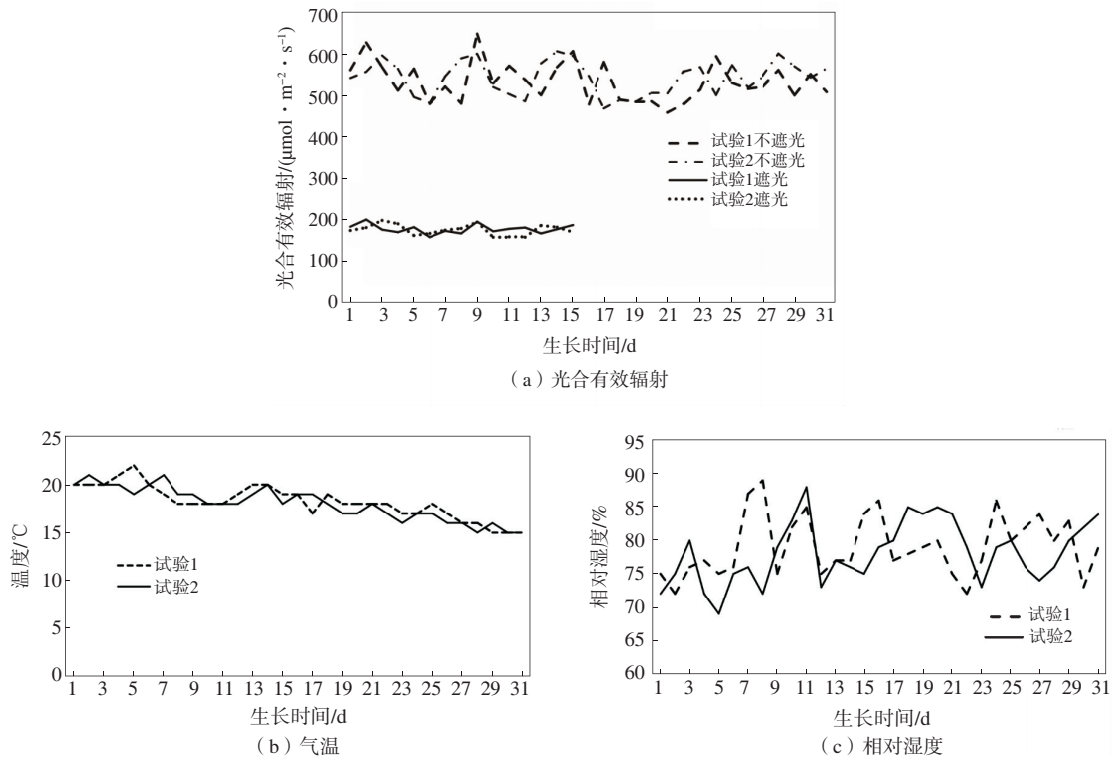


图1 试验期间气象要素变化特征

Fig.1 Characteristics of changes in meteorological elements during the experiments

## 1.3 叶片保护酶的测定

在CK对照组及5个处理组中分别选取3株代表性的植株标记,于测量日10:00—12:00摘取被标记的植株中上部、同一分支上健康、成熟的功能叶片进行保护酶活性的测定(每株摘取2片,每个处理共6片)。叶片超氧化物歧化酶(SOD)和丙二醛(MDA)的测定参照张淑杰等<sup>[26]</sup>提出的方法,叶片过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)的测定参

照张志良等<sup>[27]</sup>提出的方法。

## 1.4 叶片比叶重的测定

在测量日10:00—12:00,摘取被标记的植株中上部、同一分支上健康、成熟的功能叶片(每株摘取2片,每个处理共6片),用直径5 mm的打孔器打孔,避开叶脉。将打下的圆形叶片放入烘箱,120  $^{\circ}\text{C}$ 下杀酶30 min,转85  $^{\circ}\text{C}$ 烘干24 h直至重量不再变化,然后用电子天平(型号FA1104B)称量并计算单

位叶面积的叶片干重<sup>[28]</sup>,电子天平精度为0.1 mg,量程为110 g。

### 1.5 数据处理

将试验1、试验2数据分别输入数据处理系统(data processing system, DPS),求出每组数据的误差值,将跳变数据(误差 $e \geq \pm 10$ )剔除。利用独立的试验2数据验证试验1的精确性,方法是将试验1与试验2数据建立离散的回归方程,回归方程与1:1直线间的 $R^2$ 在0.993~0.999范围内,精确度较高。利用Duncan新复极差法<sup>[25]</sup>对验证后的试验1数据进行方差分析,得出显著性差异。

## 2 结果与分析

### 2.1 遮阴对番茄叶片保护酶活性和比叶重的影响

表1为不同遮阴日数胁迫下,番茄叶片保护酶活性和比叶重的变化。由表可知,与同天测得的CK相

比,遮阴处理的番茄叶片SOD、POD、CAT、MDA活性明显升高,比叶重明显减小。随着遮阴日数的增加,番茄叶片SOD活性逐渐升高,相较CK,T1—T5分别升高了15.8%、33.8%、59.5%、74.7%、88.2%;MDA活性随着遮阴日数的增加而升高,T1—T5与CK相比分别升高了2.7%、8.1%、20.3%、29.7%、37.8%;POD和CAT的变化趋势与SOD相同,相比CK,POD活性在不同遮阴胁迫(T1—T5)下分别升高45.5%、67.3%、89.2%、109.7%、130.3%;CAT活性在不同遮阴胁迫(T1—T5)下分别升高37.1%、51.5%、62.4%、75.5%、88.7%;比叶重随着遮阴日数的增加呈现降低趋势,T1—T5相比CK分别降低8.0%、28.0%、28.0%、36.0%、40.0%。与CK相比,番茄叶片SOD、POD、CAT活性均在遮阴3 d后出现显著性差异,叶片MDA活性在遮阴9 d后出现显著性差异;番茄叶片比叶重在遮阴6 d后出现显著性差异。

表1 遮阴对番茄叶片保护酶活性和比叶重的影响

Table 1 Effect of shading on protective enzyme activity and specific leaf weight of tomato leaf

遮阴处理	保护酶				比叶重/(g·cm <sup>-2</sup> )
	SOD/(U·g <sup>-1</sup> ·h <sup>-1</sup> )	MDA/(μmol·g <sup>-1</sup> )	POD/(U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	CAT/(U·g <sup>-1</sup> ·min <sup>-1</sup> )	
CK	282.08±3.46a	0.74±0.04a	31.37±2.05a	45.84±3.27a	0.25±0.01a
T1	326.67±18.66b	0.76±0.07ab	45.65±3.09b	62.86±6.49b	0.23±0.01ab
T2	377.50±10.02c	0.80±0.05abc	52.47±3.13c	69.45±4.42b	0.18±0.01c
T3	450.00±14.38d	0.89±0.06bc	59.35±6.23d	74.44±7.25b	0.18±0.01c
T4	492.92±24.05e	0.96±0.06c	65.79±5.36e	80.44±4.37c	0.16±0.01d
T5	530.83±12.18f	1.02±0.07d	72.24±5.72f	86.49±5.34d	0.15±0.01d

注:a、b、c、d、e、f表示各处理间的显著性,相同字母表示无显著性差异(同一列间进行比较),下同;U为鲜重酶单位,保护酶活性以每克鲜重酶单位表示,下同。

### 2.2 遮阴后复光对番茄叶片保护酶活性和比叶重的影响

#### 2.2.1 遮阴后复光对番茄叶片超氧化物歧化酶活性的影响

表2为花果期番茄在遮阴后的复光过程中,叶片超氧化物歧化酶活性(SOD)的变化。随着遮阴日数的增加,叶片保护酶的恢复能力逐渐降低。叶片SOD活性的恢复过程如表2所示,T1与CK相比,9 d后无显著性差异,因此,T1处理中叶片的SOD活性在复光3 d后恢复正常。T2处理与CK相比,SOD活性在9~15 d内存在显著性差异,18 d之后没有显著性差异,因此,T2处理的SOD活性可在复光后9 d内恢复正常。T3与CK相比,SOD活性在12~27 d内存在显著性差异,30 d时无显著性差异,因此,T3处理的SOD活性可在复光18 d后恢复正常。T4、T5相比CK,15~30 d内的SOD活性均出现显著性差异,因此,T4、

T5胁迫程度超过了番茄叶片SOD活性的恢复阈值,使之无法在复光后恢复正常水平。

#### 2.2.2 遮阴后复光对番茄叶片丙二醛活性的影响

叶片MDA活性的恢复过程如表3所示,在恢复过程中,T1、T2与CK相比,MDA活性均无显著性差异,因此,6 d以内的遮阴对番茄叶片MDA含量无显著影响。与CK相比,T3处理下的MDA活性在12~18 d内存在显著性差异,21 d后无显著性差异,因此,T3处理的MDA活性可在复光9 d后恢复CK水平。与CK相比,T4的MDA含量在15~24 d内存在显著性差异,27 d时显著性差异消失,可见,在T4胁迫下,番茄叶片MDA活性需复光12 d才能恢复正常水平。T5处理下的叶片在恢复过程中,MDA含量与CK对照相比,18~27 d内存在显著性差异,30 d时显著性差异消失,因此,T5胁迫下的叶片MDA活性可在复光12 d后恢复正常。

表2 复光过程中叶片 SOD 活性的变化

Table 2 Changes in SOD activity during relighting

单位:  $U \cdot g^{-1} \cdot h^{-1}$ 

遮阴处理	不同生长日数的叶片 SOD 活性								
	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	24 d	27 d	30 d
CK	291.67±6.31a	293.75±7.22a	311.25±14.67a	299.17±12.13a	305.42±19.63a	280.00±16.36ab	295.00±9.10a	269.58±15.89a	268.75±6.23a
T1	310.42±3.70b	298.42±4.96a	320.83±6.51a	284.58±6.76a	268.33±9.15b	271.25±7.59a	264.58±4.95b	301.25±8.24b	287.92±15.64ab
T2		430.83±7.65b	385.00±22.12b	381.67±12.85b	339.58±16.74ac	301.25±22.35b	294.17±10.89b	306.25±8.66b	283.75±12.00b
T3			426.25±10.02c	450.42±25.09c	414.58±10.69d	380.42±14.69c	331.25±14.47c	357.08±5.27c	292.08±11.17b
T4				458.75±7.31c	488.33±35.84e	442.08±8.1d	420.83±5.27d	427.92±32.93d	384.58±9.29c
T5					519.58±6.34f	495.42±11.33e	475.00±13.78e	464.17±8.66d	452.08±12.18d

注: 生长日数为番茄开始试验后的生长天数, 空白格表示仍在遮阴, 尚未开始复光过程(T1 从第 6 天开始复光, T2 从第 9 天开始复光, T3 从第 12 天开始复光, 以此类推), 下同。

表3 复光过程中叶片 MDA 活性的变化

Table 3 Changes in MDA activity during relighting

单位:  $\mu\text{mol} \cdot g^{-1}$ 

遮阴处理	不同生长日数的叶片 MDA 活性								
	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	24 d	27 d	30 d
CK	0.50±0.06a	0.56±0.05a	0.46±0.06a	0.49±0.04a	0.39±0.08a	0.50±0.10a	0.35±0.05a	0.48±0.07a	0.47±0.02a
T1	0.64±0.02b	0.54±0.06a	0.56±0.06ab	0.53±0.07a	0.49±0.04a	0.49±0.09a	0.38±0.07a	0.41±0.09a	0.39±0.01ab
T2		0.71±0.04b	0.66±0.07b	0.69±0.07b	0.67±0.08b	0.59±0.09ab	0.55±0.07b	0.50±0.08a	0.46±0.02ab
T3			0.92±0.09c	0.84±0.07c	0.74±0.05b	0.72±0.06bc	0.61±0.06b	0.67±0.08b	0.60±0.01b
T4				1.24±0.09d	1.13±0.07c	0.85±0.07c	0.87±0.06c	0.77±0.05b	0.79±0.06b
T5					1.36±0.08d	1.32±0.03d	1.26±0.04d	1.04±0.06c	0.79±0.06b

### 2.2.3 遮阴后复光对番茄叶片过氧化物酶活性的影响

叶片 POD 活性的恢复过程如表 4 所示, T1 与 CK 相比, POD 活性在 9 d 后无显著性差异, 因此 3 d 的复光可使 T1 胁迫下的叶片 POD 活性恢复 CK 状态。与 CK 相比, T2 胁迫中, POD 活性在 9~15 d 内存在显著性差异, 18 d 后无显著性差异, 因此 9 d 的复光可使 T2 胁迫下的叶片 POD 活性恢复正常状态。T3 与 CK 相比, POD 活性在 12~21 d 内存在显著性差异, 在 24 d 后显著性差异消失, 可见 T3 胁迫下的叶片 POD 活性在复光 12 d 后可恢复正常。在复光期间, T4、T5 胁迫下的叶片 POD 活性, 与 CK 相比均存在显著性差异, 可见 T4、T5 胁迫程度超过了叶片 POD 活性的恢复阈值, 使之无法在复光后恢复 CK 状态。

### 2.2.4 遮阴后复光对番茄叶片过氧化氢酶活性的影响

叶片 CAT 的恢复过程如表 5 所示, T1 的 CAT 活性与 CK 相比在 9 d 后无显著性差异, 因此复光后 3 d 可使 T1 胁迫下的叶片 CAT 活性恢复正常。与 CK 相比, T2 胁迫下的叶片 CAT 活性在 9~15 d 内存在显著性差异, 18 d 后显著性差异消失, 由此可知, 9 d 的复光可使 T2 胁迫后的番茄叶片 CAT 活性恢复 CK 状态。T3 胁迫下的 CAT 活性在恢复过程中, 与 CK 相比, 12~27 d 均存在显著性差异, 30 d 后显著性差异消失, 因此 18 d 的复光可使 T3 处理下的叶片 CAT 含量恢复 CK 状态。T4、T5 胁迫下, CAT 活性在恢复过程中与 CK 均存在显著性差异, 由此说明 T4 以上的胁迫程度超过了叶片 CAT 的恢复阈值, 使之无法在复光后恢复。

表4 复光过程中叶片 POD 活性的变化

Table 4 Changes in POD activity during relighting

单位:  $U \cdot g^{-1} \cdot \text{min}^{-1}$ 

遮阴处理	不同生长日数的叶片 POD 活性								
	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	24 d	27 d	30 d
CK	36.44±1.55a	39.84±2.17a	39.56±3.12a	40.46±2.07a	38.45±3.27a	30.38±2.08a	32.62±1.58a	37.38±1.72a	34.48±2.78a
T1	41.51±2.04b	40.98±1.61a	38.68±1.63a	41.35±2.69a	39.65±4.61a	34.50±1.53a	36.40±3.79ab	33.43±3.13a	38.87±1.17a
T2		44.56±3.50b	42.60±4.35b	40.56±0.78b	40.36±3.20a	37.58±3.02ab	39.31±2.16b	38.35±2.19a	36.47±2.16a
T3			54.07±3.80c	49.65±3.69c	47.62±1.06b	48.62±4.35c	44.51±3.87c	42.38±2.71b	39.04±3.21ab
T4				60.33±1.91d	56.32±2.29c	53.81±1.05d	55.31±2.20d	50.42±4.95c	48.51±2.08b
T5					72.64±5.93d	68.35±5.07e	66.79±2.52e	63.35±2.26d	62.25±4.19c

表5 复光过程中叶片CAT活性的变化  
Table 5 Changes in CAT activity during relighting

单位:  $\text{U}\cdot\text{g}^{-1}\cdot\text{min}^{-1}$ 

遮阴处理	不同生长日数的叶片CAT活性								
	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	24 d	27 d	30 d
CK	48.56±3.06a	52.46±2.63a	55.45±4.79a	49.38±4.41a	53.62±2.77a	56.38±4.79a	50.48±4.77a	49.87±2.78a	54.60±5.16a
T1	63.90±2.31b	59.44±3.56ab	55.30±7.54ab	54.98±4.05ab	52.35±3.17a	52.24±3.18a	50.23±6.58a	46.86±4.67a	49.24±7.63a
T2		65.87±3.98b	64.74±2.14bc	60.44±3.95b	57.54±2.64a	58.40±2.28a	54.82±0.52ab	55.39±3.74b	56.83±3.31a
T3			75.35±7.01c	72.43±3.99c	69.46±5.53b	65.24±2.78b	60.36±3.66b	61.49±2.73c	58.24±3.56a
T4				79.24±3.04c	81.49±7.89c	76.36±3.10c	74.25±4.18c	72.59±1.32d	69.26±5.19b
T5					85.23±5.28d	82.24±5.16d	77.54±6.67d	74.25±3.58e	70.33±3.44c

### 2.2.5 遮阴后复光对番茄叶片比叶重的影响

叶片比叶重的恢复过程如表6所示,T1的比叶重与CK相比未出现显著性差异,因此T1胁迫对叶片比叶重影响不大。与T1相似,T2的比叶重与CK相比在9~30 d内未出现显著性差异,因此T2胁迫对比叶重没有显著影响。与CK相比,T3的比叶重含量在12~15 d时存在显著性差异,18 d之后显著

性差异消失,因此,T3比叶重在复光6 d之时可恢复至CK状态。T4的叶片比叶重与CK相比,在15~18 d内存在显著性差异,21 d后显著性差异消失,因此,6 d的复光可使T4胁迫下的叶片比叶重恢复CK状态。T5与CK相比,在18~24 d内存在显著性差异,27 d后恢复,因此,T5胁迫下的叶片比叶重可在复光9 d后恢复正常。

表6 复光过程中叶片比叶重的变化  
Table 6 Changes in specific leaf weight during relighting

单位:  $\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ 

遮阴处理	不同生长日数的叶片比叶重								
	6 d	9 d	12 d	15 d	18 d	21 d	24 d	27 d	30 d
CK	0.22±0.01a	0.26±0.01a	0.32±0.03a	0.29±0.01a	0.23±0.02a	0.26±0.01a	0.26±0.01a	0.23±0.02a	0.25±0.01a
T1	0.23±0.02a	0.25±0.02a	0.27±0.03ab	0.30±0.01a	0.25±0.01a	0.23±0.00b	0.23±0.01b	0.27±0.01b	0.24±0.02a
T2		0.21±0.02ab	0.22±0.03c	0.26±0.01b	0.24±0.01a	0.22±0.01bc	0.23±0.01bc	0.24±0.01a	0.25±0.00a
T3			0.21±0.03d	0.22±0.01c	0.24±0.01a	0.24±0.00cd	0.22±0.01c	0.24±0.01a	0.24±0.01a
T4				0.19±0.01d	0.21±0.01a	0.22±0.01d	0.20±0.01d	0.23±0.01a	0.25±0.00a
T5					0.18±0.01a	0.20±0.01d	0.19±0.01d	0.22±0.02a	0.26±0.01a

## 3 结论

研究通过人工控制变量法,获得不同遮阴环境下的番茄叶片保护酶活性变化,后利用Duncan新复极差法得出不同遮阴处理间保护酶的显著性差异,主要结论如下:

(1)番茄叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)活性随遮阴日数增加而增加,均在3 d后出现显著性差异。在恢复过程中,T4、T5处理下的叶片SOD、CAT活性在复光后无法恢复正常水平,表明持续遮阴12 d以上会对叶片保护酶系统产生不可逆转的损伤,使有害产物持续增加,这与杨再强等<sup>[8]</sup>的研究结果一致。

(2)丙二醛(MDA)是植物叶片膜脂过氧化的探针,遮阴9 d以上,番茄叶片MDA活性显著增加。在恢复期间,6 d以内的遮阴,MDA活性均可快速恢复至CK水平,在9~15 d的遮阴胁迫下,MDA活性均可在复光12 d内恢复,由此说明15 d

以内的遮阴未对番茄叶片膜脂系统造成不可逆的损伤。

(3)过氧化酶含量是判断植株生理老化的指标之一,随着遮阴日数的增加,番茄叶片过氧化物酶(POD)含量随之增加,在3 d后出现显著性差异,说明低温寡照环境会加速番茄叶片的衰老过程。在恢复过程中,9 d以内遮阴处理下的叶片POD活性均可在12 d内恢复,12 d以上的遮阴则无法恢复,说明12 d以上的遮阴会对番茄叶片的生长发育及抗性产生不可逆的损伤。

(4)叶片比叶重与光合速率呈现正相关关系,比叶重的变化反映着叶片光合特性的变化。研究发现,番茄叶片比叶重随着遮阴日数的增加而减小,6 d以上的遮阴会对叶片比叶重产生显著影响。在复光恢复期间,T1、T2的比叶重均可快速恢复,T3—T5的比叶重均在复光9 d内恢复至CK状态。因此,15 d以内的遮阴未对叶片光合系统产生不可逆的损伤,这与熊宇<sup>[28]</sup>研究结果一致。

以上结果表明,遮阴会使番茄叶片内自由基超标、过氧化氢含量增加、活性氧代谢失衡,致使叶片加速老化、光合性能降低。一定程度的遮阴后及时复光,番茄叶片的保护酶活性则可在复光后逐渐恢复,进而使叶片光合系统恢复至正常状态。遮阴时间过长(12 d 以上)则会对叶片产生不可逆的损伤,使其无法在复光后恢复。

## 参考文献:

- [1] MENG Z J, LU T, ZHANG G X, et al. Photosystem inhibition and protection in tomato leaves under low light [J]. *Sci Hortic*, 2017, 217: 145-155.
- [2] 李天来. 我国设施蔬菜科技与产业发展现状及趋势 [J]. *中国农村科技*, 2016(5): 75-77.
- [3] 郭世荣, 孙锦, 束胜, 等. 我国设施园艺概况及发展趋势 [J]. *中国蔬菜*, 2012(18): 1-14.
- [4] 孙治贵, 王元胜, 张禄, 等. 北方设施农业气象灾害监测预警智能服务系统设计与实现 [J]. *农业工程学报*, 2018, 34(23): 149-156.
- [5] 魏瑞江, 王鑫. 国内设施种植气象灾害研究进展 [J]. *海洋气象学报*, 2021, 41(4): 73-81.
- [6] 李文科, 杨霏云, 王娜, 等. 山东省设施农业生产季连阴天时空演变特征及其影响 [J]. *海洋气象学报*, 2020, 40(3): 136-142.
- [7] 朱汉青, 陈辰, 李楠. 日光温室番茄寡照低温灾害预警模型构建技术研究 [J]. *海洋气象学报*, 2019, 39(3): 132-139.
- [8] 杨再强, 韩冬, 王学林, 等. 寒潮过程中 4 个茶树品种光合特性和保护酶活性变化及品种间差异 [J]. *生态学报*, 2016, 36(3): 629-641.
- [9] 田敏, 饶龙兵, 李纪元. 植物细胞中的活性氧及其生理作用 [J]. *植物生理学通讯*, 2005, 41(2): 235-241.
- [10] 冯建灿, 毛训甲, 胡秀丽. 光氧化胁迫条件下叶绿体中活性氧的产生、清除及防御 [J]. *西北植物学报*, 2005, 25(7): 1487-1498.
- [11] 黄玉山, 罗广华, 关荣文. 镉诱导植物的自由基过氧化损伤 [J]. *植物学报*, 1997, 39(6): 522-526.
- [12] KORNYEYEV D, LOGAN B A, PAYTON P, et al. Enhanced photochemical light utilization and decreased chilling-induced photoinhibition of photosystem II in cotton overexpressing genes encoding chloroplast-targeted antioxidant enzymes [J]. *Physiol Plant*, 2001, 113(3): 323-331.
- [13] 曹锡清. 膜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, 13(2): 17-22.
- [14] 熊宇, 刁家敏, 薛晓萍, 等. 持续寡照对冬季日光温室黄瓜生长及抗氧化酶活性的影响 [J]. *中国农业气象*, 2017, 38(9): 537-547.
- [15] 朱雨晴, 薛晓萍. 遮阴及复光对花果期番茄叶片光合特性的影响 [J]. *中国农业气象*, 2019, 40(2): 126-134.
- [16] 倪纪恒, 罗卫红, 李永秀, 等. 温室番茄干物质分配与产量的模拟分析 [J]. *应用生态学报*, 2006, 17(5): 811-816.
- [17] 李煜姗, 李平, 杨再强, 等. 低温寡照影响番茄幼苗根系有机酸代谢和养分吸收 [J]. *中国农业气象*, 2019, 40(8): 512-522.
- [18] 王学文, 王玉珏, 付秋实, 等. 弱光逆境对番茄幼苗形态、生理特征及叶片超微结构的影响 [J]. *华北农学报*, 2009, 24(5): 144-149.
- [19] 朱延姝, 冯辉. 弱光胁迫下番茄苗期功能叶片内源激素含量的变化 [J]. *东北师大学报(自然科学版)*, 2005, 37(3): 77-80.
- [20] 邹雨伽, 高冠, 杨再强, 等. 低温寡照对番茄花期植株生长及干物质分配的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2016, 44(12): 178-184.
- [21] 江梦圆, 杨再强, 王明田, 等. 花期低温寡照对番茄植株生长及果实发育的影响 [J]. *江苏农业科学*, 2018, 46(7): 125-131.
- [22] 杨尚龙, 庞胜群, 马海新, 等. 遮阴对番茄产量与品质的影响 [J]. *北方园艺*, 2015(20): 17-22.
- [23] 杨延杰, 李天来, 林多, 等. 光照强度对番茄生长及产量的影响 [J]. *青岛农业大学学报(自然科学版)*, 2007, 24(3): 199-202.
- [24] 李天来, 须晖, 郭泳, 等. 苗期光照度对番茄畸形果发生的影响 [J]. *辽宁农业科学*, 1997(2): 22-25.
- [25] 朱雨晴, 杨再强. 不同品种葡萄叶片光合特性对干旱胁迫的响应及早后恢复过程 [J]. *中国农业气象*, 2018, 39(11): 739-750.
- [26] 张淑杰, 杨再强, 陈艳秋, 等. 低温、弱光、高湿胁迫对日光温室番茄花期生理生化指标的影响 [J]. *生态学杂志*, 2014, 33(11): 2995-3001.
- [27] 张志良, 瞿伟菁, 李小方. *植物生理学实验指导* [M]. 4 版. 北京: 高等教育出版社, 2009.
- [28] 熊宇. 寡照对设施黄瓜生长和品质的影响及模拟研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2017.