

引用格式:

黄宇, 单虹虹, 周鸿宇, 欧立军. 不同光强对辣椒卷叶突变体D26卷曲指数及光合特性的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2026, 52(2): 36–44.

HUANG Y, SHAN H H, ZHOU H Y, OU L J. Effects of different light intensities on the curling index and photosynthetic characteristics of the pepper leaf-curling mutant D26[J]. Journal of Hunan Agricultural University(Natural Sciences), 2026, 52(2): 36–44.

投稿网址: <http://xb.hunau.edu.cn>



不同光强对辣椒卷叶突变体D26卷曲指数及光合特性的影响

黄宇^{1,2,3}, 单虹虹^{1,2}, 周鸿宇^{1,2,3}, 欧立军^{1,2,3*}

(1. 湖南农业大学园艺学院, 湖南 长沙 410128; 2. 蔬菜生物学湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410128;
3. 岳麓山实验室, 湖南 长沙 410128)

摘要: 以辣椒A124为对照, 以卷叶突变体D26为试验材料, 设置弱光((25±5) μmol/(m²·s))、中光((200±5) μmol/(m²·s))和强光((500±5) μmol/(m²·s))3种光照强度处理, 连续处理15 d后, 测定叶片卷曲指数、生物量、叶绿素含量、气体交换参数及叶绿素荧光参数, 并结合石蜡切片观察叶片细胞结构变化, 系统分析卷叶突变体D26在不同光强下的生长特性及光合生理特征。结果显示: 光照强度对辣椒叶片形态影响显著; D26在弱光下叶片平展, 在中光、强光下叶片卷曲(叶片卷曲指数分别为19.63%和43.89%); 2个材料在中光、强光、弱光条件下的总生物量均依次降低; 相比A124, D26在弱光下的生物量积累能力较强, 对弱光适应力更佳; 中光影响D26叶片卷曲但不抑制生物量积累, 强光则使D26叶片生物量显著降低; 强光下D26叶片细胞形态和排列结构发生改变, 进而引发叶片卷曲; 弱光下叶片变薄, 组织结构疏松; 不同光强处理下, D26叶绿素含量高于A124的, 其在弱光下通过积累叶绿素增强光捕获能力, 中光下叶绿素含量降幅较大, 强光下显著降低; 弱光下, D26和A124的光合速率无明显差异, 中、强光下D26的气孔导度变小, 蒸腾速率降低, 导致光合速率下降; D26在弱光下可维持良好的光合效能, 中、强光下PSII反应中心活性较低, 但可通过维持较高的非光化学猝灭系数(NPQ)启动光保护机制, 从而适应强光环境胁迫。

关键词: 辣椒; 光强; 卷叶; 细胞结构; 光合特性

中图分类号: S641.3

文献标志码: A

文章编号: 1007–1032(2026)02–0036–09

Effects of different light intensities on the curling index and photosynthetic characteristics of the pepper leaf-curling mutant D26

HUANG Yu^{1,2,3}, SHAN Honghong^{1,2}, ZHOU Hongyu^{1,2,3}, OU Lijun^{1,2,3*}

(1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha, Hunan 410128, China;

2. Key Laboratory for Vegetable Biology of Hunan Province, Changsha, Hunan 410128, China;

3. Yuelushan Laboratory, Changsha, Hunan 410128, China)

Abstract: Using normal-leaf pepper A124 as the control and the leaf-curling mutant D26 as the test material, three light intensity treatments were applied: low light ((25±5) μmol/(m²·s)), moderate light ((200±5) μmol/(m²·s)), and high light ((500±5) μmol/(m²·s)). After 15 days of continuous treatment, leaf-curling index, biomass, chlorophyll content, gas exchange parameters, and chlorophyll fluorescence parameters were measured. In addition, paraffin sectioning was employed to observe changes in leaf cellular structure. The growth characteristics and photosynthetic physiological traits of the leaf-curling mutant D26 under different light intensities were systematically analyzed. The results showed that light

收稿日期: 2025–05–16

修回日期: 2026–03–31

基金项目: 湖南省研究生科研创新项目(CX20240642); 云南省重大科技专项(202402AE090012)

作者简介: 黄宇(1998—), 男, 湖南宁乡人, 博士研究生, 主要从事辣椒生理生化及分子生物学研究, huangyu128@139.com; *通信作者, 欧立军, 博士, 教授, 主要从事辣椒遗传育种及重要功能基因网络调控研究, ou9572@hunau.edu.cn

intensity significantly affected pepper leaf morphology. Under low light, *D26* leaves remained flat, whereas under medium and high light intensities, the leaves rolled up, with leaf-curling indices of 19.63% and 43.89%, respectively. For both accessions, total biomass decreased sequentially under medium, high, and low light conditions. Compared with A124, *D26* had stronger biomass accumulation capacity and better adaptability under low light. Medium light induced leaf curling in *D26* but did not affect its biomass accumulation, while high light significantly reduced leaf biomass in *D26*. Under high light, changes in the morphology and arrangement of leaf cells in *D26* led to leaf curling. Under low light, the leaves became thinner and had a looser structure. Under different light intensities, the chlorophyll content of *D26* was higher than that of A124. *D26* enhanced light capture by accumulating chlorophyll under low light, showed a large decrease in chlorophyll content under medium light, and exhibited significantly reduced chlorophyll content under high light. Under low light, the photosynthetic rates of *D26* and A124 were similar. Under medium and high light, stomatal conductance and transpiration rate of *D26* decreased, leading to a reduction in photosynthetic rate. *D26* maintained good photosynthetic efficiency under low light. Although the activity of its PSII reaction center was lower under medium and high light, *D26* could initiate photoprotection through a higher NPQ level to adapt to high light stress.

Keywords: pepper; light intensity; leaf-curling; cell structure; photosynthetic characteristics

光照是植物生长发育不可或缺的关键环境因子,参与调控植物的生理代谢、形态建成、开花结果以及生态适应性的形成。光照强度(以下简称光强)影响光合速率,光强不足时(如阴生环境),植物光合作用减弱,易引发生长缓慢、叶片变薄、茎秆徒长等现象^[1];光强过高(如夏季正午)可能导致光合系统受损,严重时造成叶片灼伤^[2]。作物的产量受植物光合效率的影响,而叶片形态是调控光合效率的关键因素^[3]。在生殖生长期之前,叶片作为植株主要光合器官,为植株生长发育提供能量^[4]。叶片卷曲是植物应对强光胁迫的重要保护性策略。水稻光敏卷叶突变体1(*psl1*)表现出光合“午睡”及生长减缓特征,在高光强、低相对湿度环境下发生条件性卷叶,进而调控叶片的光响应特性与水分散失水平^[5]。叶片是植物感知和响应光信号的主要器官,光照变化对植物叶片的净光合速率(Pn)、蒸腾速率(Tr)、气孔导度(Gs)、胞间CO₂浓度(Ci)等气体交换参数产生影响^[6];光强提升时,非光化学猝灭系数(NPQ),PSII潜在活性(F_v/F_0)、最大光化学效率(F_v/F_m)、光化学猝灭系数(qP)会出现明显变化^[7]。通过监测这些参数,可以深入解析植物在复杂光照环境下的光合效率调控机制,明确其对光环境的适应性策略。

本课题组成员前期鉴定获得1个辣椒自然卷叶突变体材料,该突变体叶片性状在不同光强下的表现存在差异。本研究通过设置不同光强条件,探究不同光强对辣椒叶片卷曲程度及光合特性的影响,旨在解析辣椒卷叶突变体的卷叶调控条件、分子机制,为卷叶性状的利用提供理论支撑。

1 材料与方法

1.1 植物材料及培养条件

供试辣椒材料为卷叶突变体D26及野生型A124。选取大小均匀且饱满的种子,温汤浸种催芽后点播于50孔穴盘育苗,置于人工气候室中培养,28℃光照16 h,22℃黑暗8 h,正常水肥管理。

1.2 试验设计

待D26和A124植株生长至两叶一心时,选取长势基本一致的幼苗移栽至育苗钵中,设置弱光(L)、中光(M)、强光(H)3组光强,分别为(25±5)、(200±5)、(500±5) μmol/(m²·s),处理下的材料分别记为D26-L、D26-M、D26-H、A124-L、A124-M、A124-H。昼夜光周期为16 h/8 h,温度为28℃/22℃,相对湿度控制在(65±5)%,连续处理15 d后观察叶片及植株变化,并取样测定相关指标。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 表型指标的测定

在第0、3、6、9、12、15天利用直尺测量叶宽A(叶片最宽处的宽度)、叶展开宽B(叶片在完全展开状态下的最大宽度),计算叶片卷曲指数C, $C=(B-A)/B$;测定第15天时2个材料根、茎、叶的鲜质量,用烘箱烘干至恒重,称量其干质量。使用佳能EOS 80D相机拍照。

1.3.2 细胞结构观察

分别取第12天弱光、中光和强光下的D26叶片

及强光下的A124叶片,采用番红-固绿双重染色法观察叶片组织的显微结构。样品经FAA固定液固定后,按常规石蜡切片流程进行梯度脱水;切片经番红染色后,依次置于50%、70%、80%乙醇溶液中梯度脱色,再利用固绿染色液复染;随后经无水乙醇脱水后用二甲苯透明处理5 min,最后以中性树胶封片。利用Nikon Eclipse E100显微镜进行镜检并采集图像,后续进行显微结构的观察与分析。

1.3.3 叶绿素含量测定

采用植物叶绿素含量检测试剂盒(Boxbio公司)检测叶绿素含量。在第0、3、6、9、12、15天分别取各处理的新鲜叶片约0.1 g,加1 mL蒸馏水充分研磨,使用提取液(无水乙醇与丙酮的体积比为1:2)于黑暗条件下浸提3 h后,测定663、645 nm波长下的吸光值,记为 A_{663} 和 A_{645} ,计算叶绿素a(Chl a)、叶绿素b(Chl b)、总叶绿素(Chl)含量及叶绿素a与叶绿素b的比值(Chl a/b)。

1.3.4 气体交换参数的测定

采用美国LI-COR公司制造的便携式LI-6400光合测定仪,在晴天10:00—11:30,选取植株上部第2片功能叶,将光合仪叶室中的红蓝光源光强设定为 $800 \mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, CO_2 浓度为 $400 \mu\text{mol}/\text{L}$,测定净光合速率(P_n)、蒸腾速率(T_r)、气孔导度(G_s)和胞间 CO_2 浓度(C_i)等指标。

1.3.5 叶绿素荧光参数的测定

于晴天10:00—11:30,选取植株上部第3片功能叶,采用便携式叶绿素荧光仪PAR-FluorPen FP 110/D(Photon Systems Instruments, PSI)对D26和A124进行叶绿素荧光参数测定。叶片经30 min暗适应后,分别测定不同光强处理下的荧光参数,包括初始荧光(F_0)、最大荧光(F_m)、 qP 和 NPQ ,计算可变荧光(F_v)、 F_v/F_0 及 F_v/F_m 。

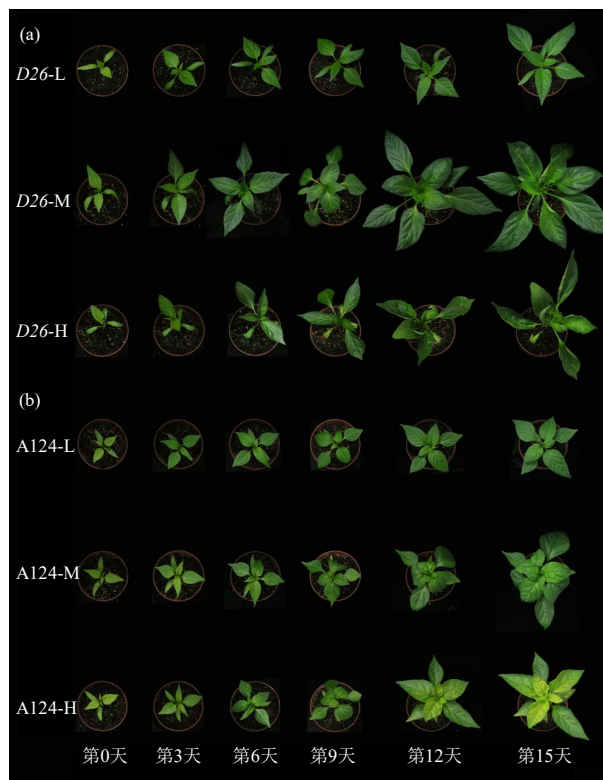
1.4 数据处理

采用Microsoft Excel 2010和SPSS 22.0进行数据统计分析;采用Duncan's检验法进行差异显著性多重比较,所有试验均重复3次以上。

2 结果与分析

2.1 不同光强对辣椒叶片卷曲的影响

由图1可知,D26和A124在第0~15天内的叶片卷曲情况差异显著,在弱光条件下,叶片均不卷曲;与A124相比,随光强增加,D26的叶片发生卷曲的时间提前,叶片卷曲的程度也增加。在强光条件下,D26的叶片数量少于中光条件下的,说明强光对D26的生长具有明显抑制作用。



(a) D26在不同光强、不同时间下的表型图;

(b) A124在不同光强、不同时间下的表型图;比例尺长度为5 cm。

图1 不同光强不同时间下D26和A124的生长情况

Fig. 1 Growth of D26 and A124 under different light intensities and durations

由表1可知,弱光条件下,同一处理时间,D26和A124叶片卷曲指数无显著差异(第15天除外)。中光条件下,D26叶片卷曲指数自第9天明显增加,并随处理时间延长持续增加,而A124,从第3天开始,卷曲指数差异均不显著。强光条件下,相较于第3天,D26叶片卷曲指数在第6天显著增加,并随处理时间延长而增加,在第15天达43.89%;A124在第12天叶片卷曲指数显著增加。上述结果表明,光强对辣椒叶片卷曲影响较大,且D26的叶片卷曲程度受光强调控更明显,弱光条件下能保持叶片不卷曲,而强光可显著促进其叶片卷曲。

表1 不同光强下辣椒叶片的卷曲指数

Table 1 The curling index of pepper leaves under different light intensities							%
材料	第0天	第3天	第6天	第9天	第12天	第15天	
D26-L	(0±0)b	(2.53±0.90)Ba	(3.23±1.90)Ba	(3.84±2.80)Ca	(2.73±2.08)Da	(1.88±0.73)Da	
D26-M	(0±0)d	(2.42±1.06)Bc	(4.69±0.82)Bbc	(9.21±4.27)Bb	(17.06±2.45)Ba	(19.63±1.64)Ba	
D26-H	(0±0)d	(8.30±3.03)Ac	(25.04±1.25)Ab	(26.10±2.39)Ab	(36.21±3.74)Aa	(43.89±10.64)Aa	
A124-L	(0±0)b	(1.85±1.30)Ba	(4.56±0.91)Ba	(2.26±1.67)Ca	(1.90±1.39)Da	(3.65±0.46)Ca	
A124-M	(0±0)b	(3.76±0.64)Ba	(5.23±1.87)Ba	(4.16±1.34)BCa	(6.28±3.69)Ca	(5.21±0.68)Ca	
A124-H	(0±0)d	(5.01±0.93)ABc	(5.36±3.40)Bc	(5.05±1.22)BCc	(8.20±3.05)Cb	(17.79±2.22)Ba	

注：不同大写字母表示同列数据不同处理间的差异有统计学意义；不同小写字母表示同行数据同一材料不同时间处理的差异有统计学意义($P<0.05$)。

2.2 不同光强对辣椒生物量的影响

从表2可以看出，2个材料在中光、强光、弱光条件下的总生物量均依次减少。在弱光条件下，D26根、茎、叶各部位的生物量与A124的差异均不显著，但总干质量显著高于A124的；在中光条件下，D26

的根、茎鲜质量和干质量及总干质量与A124的均无显著差异，但叶鲜质量和干质量以及总鲜质量显著高于A124的；在强光条件下，D26与A124的根、茎鲜质量和干质量以及总干质量和总鲜质量均无显著差异，但D26叶干质量、鲜质量显著低于A124的。

表2 不同光强下2个辣椒材料的生物量

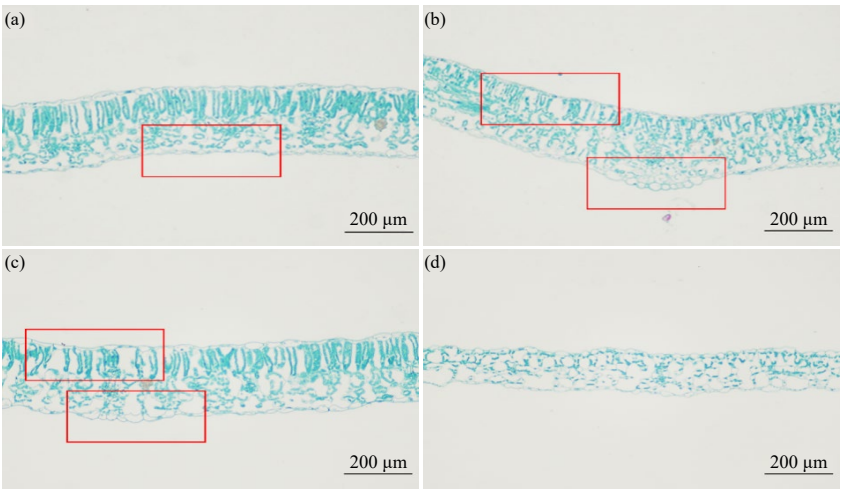
Table 2 Biomass of two pepper accessions under different light intensities									g
材料	根鲜质量	茎鲜质量	叶鲜质量	根干质量	茎干质量	叶干质量	总鲜质量	总干质量	
D26-L	(0.53±0.06)c	(0.80±0.10)b	(1.13±0.15)e	(0.05±0.01)c	(0.13±0.01)b	(0.12±0.02)e	(2.47±0.15)d	(0.31±0.01)c	
D26-M	(2.57±0.42)a	(2.50±0.53)a	(6.37±0.35)a	(0.33±0.08)a	(0.36±0.07)a	(0.66±0.04)a	(11.43±0.67)a	(1.35±0.12)a	
D26-H	(1.64±0.16)b	(2.12±0.27)a	(2.60±0.10)d	(0.14±0.01)b	(0.39±0.05)a	(0.33±0.01)d	(6.37±0.31)c	(0.86±0.05)b	
A124-L	(0.47±0.09)c	(0.71±0.03)b	(1.00±0.17)e	(0.05±0.01)c	(0.12±0.01)b	(0.11±0.01)e	(2.18±0.24)d	(0.27±0.01)d	
A124-M	(2.37±0.38)a	(2.33±0.47)a	(4.43±0.51)b	(0.32±0.08)a	(0.35±0.07)a	(0.52±0.07)b	(9.13±0.59)b	(1.19±0.09)a	
A124-H	(1.42±0.21)b	(2.32±0.24)a	(2.97±0.06)c	(0.16±0.02)b	(0.36±0.03)a	(0.38±0.02)c	(6.71±0.32)c	(0.90±0.03)b	

注：同列数据不同小写字母表示处理间的差异有统计学意义($P<0.05$)。

上述结果表明，光照强度是调控辣椒植株生物量积累与分配的关键环境因子。D26在弱光条件下能维持较高的总干质量，表现出对弱光的较强适应性；中光虽诱导D26叶片卷曲，但未对其生物量积累产生不利影响；而强光对D26叶片生长抑制作用明显，导致其生物量显著降低。

2.3 辣椒叶片的组织结构

于处理第12天，分别取A124-H、D26-H、D26-M及D26-L的叶片制作石蜡切片并进行组织学观察。结果(图2)显示：与A124-H相比，D26-H叶片卷曲处



(a) A124-H; (b) D26-H; (c) D26-M; (d) D26-L

图2 D26和A124的叶片细胞结构

Fig. 2 Cell structure of D26 and A124 leaves

的下表皮细胞呈中度膨胀, 栅栏细胞与海绵细胞排列紧密且不规则。*D26*-M叶片弯曲处的下表皮细胞同样出现一定程度的膨胀, 栅栏细胞排列相对紧密且不规则。*D26*-L叶片表型平展, 无明显弯曲, 但叶肉细胞发育缓慢, 叶片较薄, 组织结构趋于疏松。

上述叶片组织学观察结果表明, *D26*相关基因的突变扰乱了叶片发育过程中细胞分裂与扩张的动态平衡。具体表现为下表皮细胞异常膨大, 导致叶片下表面生长速度快于上表面的, 进而产生内部物理张力, 最终导致叶片卷曲。据此推测, *D26*突变可能通过调控叶片细胞分裂与扩张相关基因的表达, 影响细胞间的松弛结构及排列方式, 进而影响叶片的形态建成。

2.4 不同光强对辣椒叶片叶绿素含量的影响

2个辣椒材料的叶片叶绿素含量(质量分数, 下同)在不同光强处理下的变化趋势存在一定差异(图3)。弱光条件下, *D26*的Chl a、Chl b和Chl含量均高于A124的, 并在第3、6、15天存在显著差异; *D26*和A124的Chl a、Chl b和Chl含量均随处理时间延长

呈动态波动, 其中, Chl a含量的波动幅度相对较小; 与第0天相比, 在第15天, *D26*和A124的Chl b含量分别下降19.82%和27.14%, Chl含量分别下降11.07%和15.46%, *D26*的叶绿素含量降低幅度较小。中光条件下, 2个材料的叶绿素含量差异随处理时间延长逐渐缩小, 至第15天, A124的Chl a、Chl b和Chl含量平均值超过*D26*的, 与第0天相比, *D26*和A124的Chl a含量分别下降38.16%和17.20%, Chl b含量分别下降38.36%和22.60%, Chl含量分别下降38.22%和18.80%, A124的降幅较小。强光条件下, *D26*和A124的Chl a、Chl b和Chl含量均随处理时间延长而降低, 与第0天相比, 在第15天, *D26*和A124的Chl a含量分别下降43.37%和45.74%, Chl b含量分别下降45.84%和42.61%, Chl含量分别下降44.08%和44.83%, 可见强光严重影响了2个材料的叶绿素含量。同一时间相同光照条件下2个材料的Chl a/b均无显著差异, 与第0天相比, 第15天时弱光条件下Chl a/b均有所上升, 中光和强光条件下无显著变化。

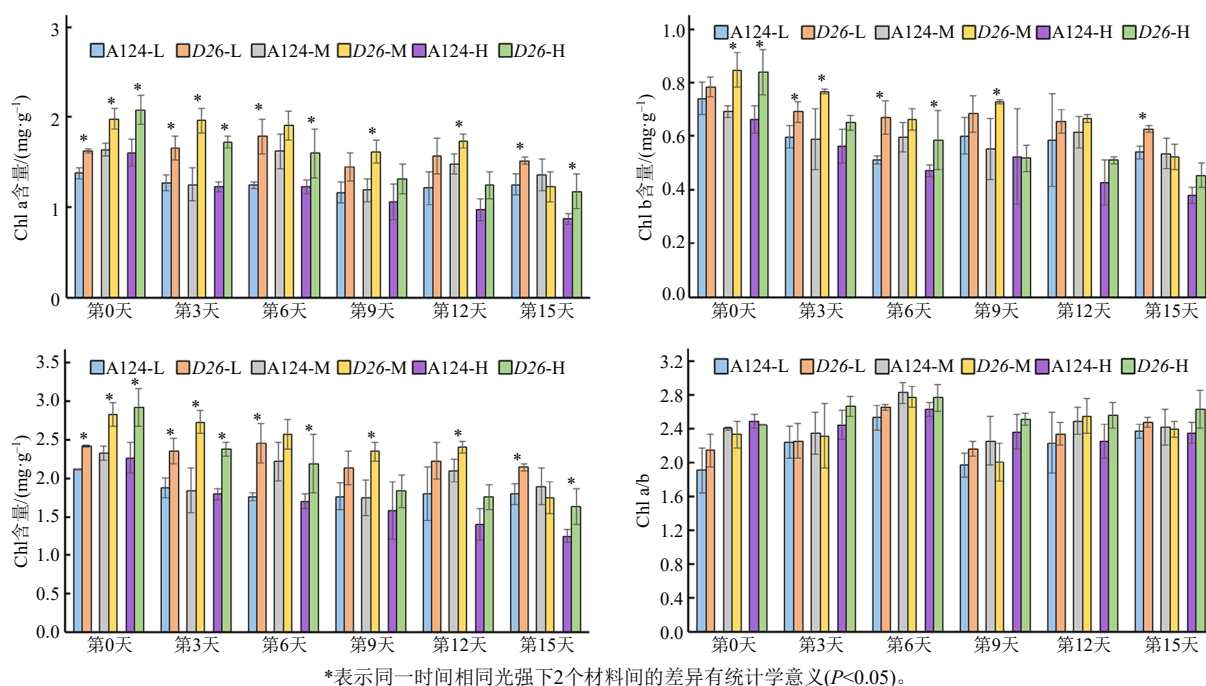


图3 不同光强处理下2个辣椒材料的叶绿素含量

Fig. 3 Chlorophyll content of two pepper accessions under different light intensity treatments

自两叶一心期开始, 除第15天中光处理外, *D26*在各光强下的Chl a、Chl b及Chl含量均高于A124的, 说明*D26*具有更强的叶绿素合成能力。弱光条件下, *D26*通过提高叶绿素含量增强光捕获能力以

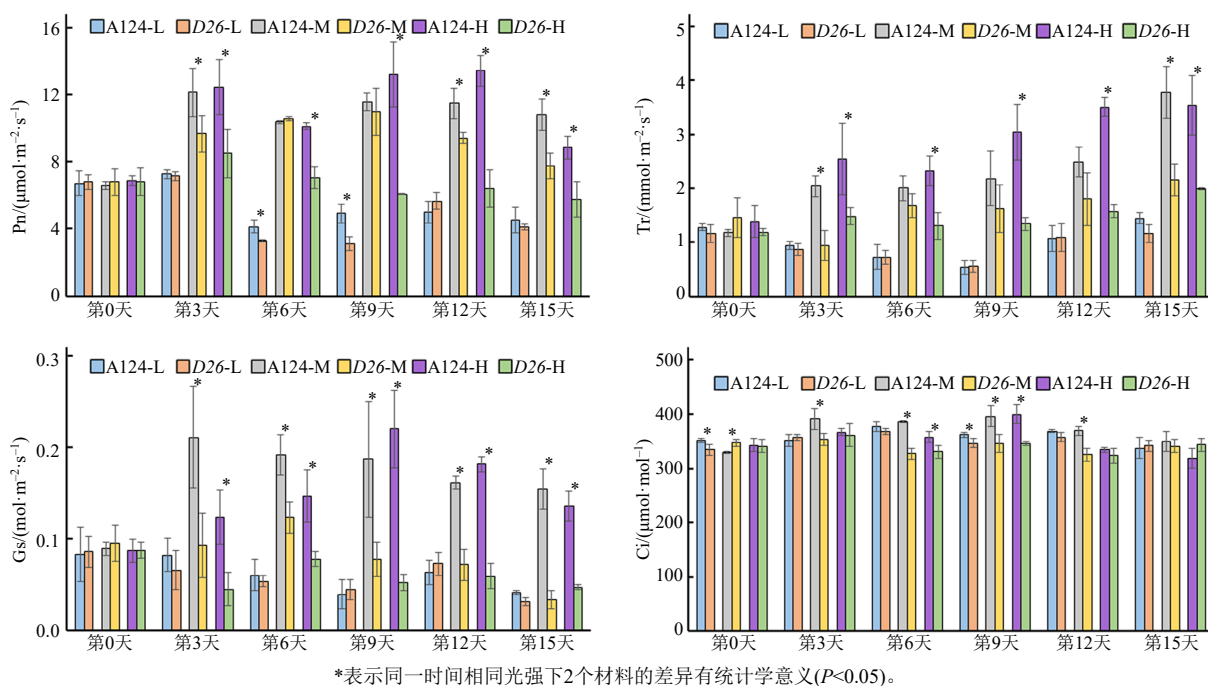
适应弱光生境; 中光条件下, *D26*叶绿素含量降幅较大, 表明中光对其叶绿素代谢的影响较为明显; 强光条件下, 2个材料的叶绿素含量均持续降低, 说明强光对二者均产生显著胁迫。2个材料的Chl a/b

表现为弱光下较低、强光下较高,体现了其对光强的适应性调节。强光下D26的Chl a/b相对较高,推测其可能通过降低叶片捕光天线复合体的相对比例、减少对过剩光能的捕获来有效缓解强光引起的光抑制与光氧化损伤,进而维持强光下的光合稳定性。

2.5 不同光强对辣椒卷叶材料光合特性的影响

不同光强处理下,D26与A124的光合参数表现出明显差异(图4)。在中光和强光处理下,部分时期D26的净光合速率(Pn)显著低于A124的。强光处理第9天,两者Pn差异最大,相对差异为54.13%,且在测定的15 d内相对差异呈先上升后下降的趋势;中光处理第15天,两者的相对差异最大,为28.04%,相对差异在第6~15天内呈上升趋势。弱光处理下,

Pn呈波动变化,仅在第6天和第9天出现显著性差异。在蒸腾速率(Tr)方面,自第3天开始,中光与强光处理下D26的Tr均低于A124的,其中强光处理下2个材料的差异更为显著,15 d内相对差异平均值为48.01%,最小值为41.59%。弱光处理下2个材料的Tr均无显著差异。在气孔导度(Gs)方面,在相同光强处理下,D26整体低于A124的,中光与强光处理下的相对差异平均值分别为56.91%和64.02%。在胞间CO₂浓度(Ci)方面,弱光处理第9天出现显著差异,相对差异为4.09%;中光处理下,D26的Ci在第3~12天显著低于A124的,第15天的差异不显著;强光处理下仅在第6、9天出现显著差异,15 d内相对差异呈先上升后下降的趋势。



*表示同一时间相同光强下2个材料的差异有统计学意义($P < 0.05$)。

图4 不同光强下D26和A124叶片气体交换参数的变化

Fig. 4 Changes in gas exchange parameters of D26 and A124 leaves under different light intensities

在中、强光条件下,D26的Pn、Gs和Tr整体上低于A124的,而Ci未呈现明显的动态变化趋势,说明D26光合能力的下降主要受气孔限制因素驱动:Gs降低减少了CO₂的供应,同时抑制了蒸腾作用。强光处理第12、15天,D26的Ci与A124的差异不显著但Pn仍显著偏低,推测此时存在非气孔限制(如叶肉细胞活性下降)的叠加影响。强光下Ci与Pn的相对差异的变化趋势一致,推测早期以气孔限制为主,后期逐渐转向非气孔限制。弱光下2个材料各光合参数无持续显著差异,表明D26在弱光下未表现出光合劣势。

2.6 不同光强对辣椒卷叶突变体叶绿素荧光的影响

从图5可以看出,除第15天的中光处理和第12天的强光处理外,D26与A124的 F_v/F_0 均无显著差异,但在弱光条件下其平均值较高,中光和强光条件下其平均值较低,中光条件下浮动变化,强光条件下均动态下降,强光条件下第15天较第0天,A124的 F_v/F_0 下降18.01%,D26的下降了37.08%,D26的下降幅度更大。在同一时期同一光强条件下2个材料的 F_v/F_m 无显著差异(第12天弱光条件下除外),但在强光条件下,与第0天的相比,在第15天时D26

和A124的 F_v/F_m 分别下降12.35%和6.13%, D26的降幅较大。在同一时期同一光强条件下2个材料的qP差异较大, 中光处理第3天D26的qP显著高于A124的, 强光下差异不显著; 与第0天相比, 在第15天时D26的qP在弱、中、强光下增幅分别为49.56%、

39.68%、26.75%, 而A124的qP在弱、中光下显著降低, 降幅分别为26.87%和27.64%, 在强光下则显著升高, 增幅为25.83%。在同一时期同一光强条件下, D26的NPQ均高于A124的; 与第0天相比, 15 d内A124的NPQ在强光下显著下降。

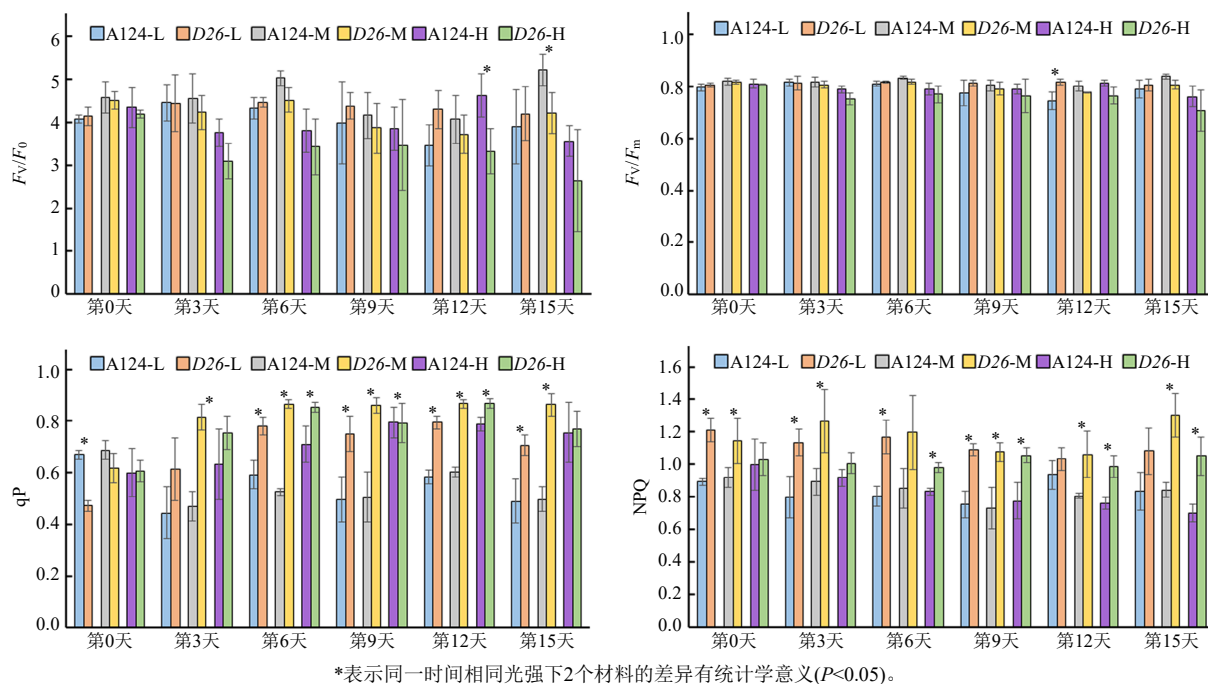


图5 不同光强下D26和A124叶片叶绿素荧光参数的变化

Fig. 5 Changes in chlorophyll fluorescence parameters of D26 and A124 leaves under different light intensities

F_v/F_0 高表示PSII反应中心活性高、电子传递链通畅、光合膜完整性好。与A124相比, 中、强光下D26的 F_v/F_0 较低, 弱光下较高, 这说明D26在弱光下能更好地进行光合作用, 而中、强光下其PSII反应中心活性相对较低。 F_v/F_m 显著下降是PSII受损的标志。强光下D26的 F_v/F_m 降低, 表明其受到一定的光抑制。D26在弱光和中光下qP较高, 说明PSII下游电子传递通畅, 光合碳同化活跃。强光胁迫下NPQ显著升高是植物启动光保护的重要标志, NPQ水平较低的植株更易发生光损伤(表现为 F_v/F_m 持续下降)。随处理时间延长, 中、强光下D26的NPQ均显著高于A124的, 说明中光和强光对D26均构成胁迫条件, 但结合 F_v/F_m 分析, D26尚未发生严重光损伤。

3 结论与讨论

光强对辣椒叶片卷曲影响较大, 且对易卷叶材料D26的影响更为显著。弱光条件下, D26和A124叶片均不卷曲; 中光和强光条件下, D26的卷曲程度强于A124的, 且卷曲时间早于A124的。王莉^[8]

发现了1个水稻光敏感卷叶突变体 $psII$, 表现为叶片条件性卷曲, 在自然条件下叶片卷曲受光强的影响, 在低光强下, 突变体的叶片平展, 而在高光强下, 突变体的叶片卷曲成桶状。QASEEM等^[9]研究发现, 干旱胁迫易造成叶片卷曲, 产量降低。叶片卷曲与叶温度呈线性相关, 高温或者低温可导致叶片不同程度地卷曲^[10]。除了光强影响叶片卷曲外, 光质也影响叶片卷曲, 如红光和远红光条件下, 红光和远红光受体光敏色素B(phyB)可促进叶片卷曲, 在遮阴条件下, phyB失活触发叶片变平^[11-12]。

研究^[13-14]表明, 表皮细胞中具有气孔, 气孔的开合控制叶片水分流失, 导致叶片卷曲。也有研究^[15]表明, 在干旱条件下, 水稻叶片的表皮细胞结构变化也会引起叶片卷曲。叶肉组织中的细胞数量及排列同样影响叶片的卷曲, 水稻 $Osarv14$ 突变体叶片卷曲的主要原因是叶肉细胞数量减少, 薄壁细胞数量增加^[16]。本研究结果显示, 卷叶辣椒材料在强光条件下, 叶片细胞结构发生改变, 表皮细胞在弯曲处表现为中度膨胀, 栅栏细胞和海绵细胞排列紧密且

不规则。这说明光强影响植物叶片组织结构,从而导致叶片卷曲。

本研究结果表明,弱光下,D26通过维持较高的叶绿素a、叶绿素b及总叶绿素含量,增强光能捕获能力;同时其净光合速率、气孔导度和蒸腾速率与A124的相近,且光化学猝灭系数显著升高,PSII电子传递通畅,从而在弱光下实现较高的生物量积累,表现出良好的弱光适应性。中光条件下,D26叶片卷曲,叶绿素含量降幅大于A124的,光合速率和气孔导度显著降低,但植物生物量积累未受影响,推测气孔限制是D26光合速率降低的主要原因。同时,D26通过提高NPQ增强热耗散,维持较高的qP水平,表明其在中光下能够通过启动光保护机制,维持光合机构的基本功能。强光下,D26的叶绿素含量显著下降,光合速率、气孔导度和蒸腾速率均显著低于A124的,但D26的 F_v/F_m 和 F_v/F_0 未达到严重光抑制阈值,PSII反应中心也未发生不可逆失活;同时其NPQ显著高于A124的,qP也存在一定程度的上升。这表明强光条件下,D26可通过主动降低气孔导度以减少水分散失,并依靠提升NPQ耗散过剩光能,协调光能捕获与光保护过程的动态平衡,进而有效缓解强光诱导的光合机构严重损伤。相关研究表明,植物为适应荫蔽环境,提升光能获取效率,通常会提高Chl a和Chl b的积累量,使二者含量增加^[17]。Chl a含量的增加可以提高植物对光能的利用效率,Chl b含量的增加可以增强捕获光量子的能力^[18]。陈妍等^[19]研究发现,随着光强的降低,山药叶片Pn、Tr、Gs均逐渐减小,而Ci逐渐升高。在干旱过程中,植物可通过急剧降低气孔导度以减少水分流失,叶片在气孔完全闭合之前发生卷曲。与扁平叶片相比,卷曲叶片的水分流失率显著降低^[6]。psII突变体的气孔导度和蒸腾速率更低,有利于植株维持体内水分平衡;同时,突变体叶片表面的结构和强光诱导的卷曲表型也可进一步减少水分蒸腾散失^[8]。强光胁迫下NPQ显著升高是植物启动光保护机制的重要标志,NPQ可通过抑制活性氧的过量生成来缓解高光下的光损伤^[20];同时,叶绿素含量适当降低能够减少叶片对过剩光能的吸收,进而有效减轻强光诱导的光抑制伤害^[21]。

综上所述,D26是一个光敏型卷叶突变体,其叶片卷曲受光强调控,细胞结构改变是叶片卷曲的

直接原因。D26在弱光下具有更强的生物量积累和叶绿素合成能力,表现出良好的弱光适应性;中光虽诱导卷曲但不影响生物量积累;强光抑制其生长,但D26能通过下调气孔导度减少蒸腾耗水,并协同调控qP与NPQ以平衡光能分配,维持光合机构结构与功能的稳定性。

参考文献:

- [1] FU Y M, LI H Y, YU J, et al. Interaction effects of light intensity and nitrogen concentration on growth, photosynthetic characteristics and quality of lettuce (*Lactuca sativa* L. Var. youmaicai)[J]. *Scientia Horticulturae*, 2017, 214: 51–57.
- [2] 罗蛟, 丁新宇, 徐燕妮, 等. 生长光强对黄瓜叶片光合机构活性影响研究[J]. *植物生理学报*, 2022, 58(9): 1790–1800.
- [3] XU P Z, ALI A, HAN B L, et al. Current advances in molecular basis and mechanisms regulating leaf morphology in rice[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2018, 9: 1528.
- [4] 黄菁偲, 唐鹏, 潘路招, 等. 辣椒窄叶突变体Can1遗传定位及转录组分析[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(5): 28–35.
- [5] ZHANG G H, HOU X, WANG L, et al. *PHOTOSENSITIVE LEAF ROLLING 1* encodes a polygalacturonase that modifies cell wall structure and drought tolerance in rice[J]. *New Phytologist*, 2021, 229(2): 890–901.
- [6] YAO X D, ZHOU H L, ZHU Q, et al. Photosynthetic response of soybean leaf to wide light-fluctuation in maize-soybean intercropping system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 8: 1695.
- [7] 戴云花, 沈逸雨, 徐文静, 等. 不同光强对不同叶色辣椒色素及光合特性的影响[J/OL]. *分子植物育种*. (2023–03–08). <https://kns.cnki.net/kcms/detail/46.1068.S.20230308.0908.006.html>.
- [8] 王莉. 水稻株叶形态调控基因PSLI及IPA1对耐旱及营养利用机理研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2018.
- [9] QASEEM M F, QURESHI R, SHAHEEN H. Effects of pre-anthesis drought, heat and their combination on the growth, yield and physiology of diverse wheat(*Triticum aestivum* L.) genotypes varying in sensitivity to heat and drought stress[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 6955.
- [10] KADIOGLU A, TERZI R. A dehydration avoidance mechanism: leaf rolling[J]. *The Botanical Review*, 2007, 73(4): 290–302.
- [11] JOHANSSON H, HUGHES J. Nuclear phytochrome B regulates leaf flattening through phytochrome interacting factors[J]. *Molecular Plant*, 2014, 7(11): 1693–1696.
- [12] KOZUKA T, SUETSUGU N, WADA M, et al.

- Antagonistic regulation of leaf flattening by phytochrome B and phototropin in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Plant and Cell Physiology*, 2013, 54(1): 69–79.
- [13] BRODRIBB T J, SUSSMILCH F, MCADAM S A M. From reproduction to production, stomata are the master regulators[J]. *The Plant Journal*, 2020, 101(4): 756–767.
- [14] 王恺帝, 王士林, 徐陶, 等. 植物叶片表面结构表征及其润湿性能分析[J]. *湖南农业大学学报(自然科学版)*, 2025, 51(6): 69–78.
- [15] WANG X X, HUANG J L, PENG S B, et al. Leaf rolling precedes stomatal closure in rice(*Oryza sativa*) under drought conditions[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2023, 74(21): 6650–6661.
- [16] WANG L, XU J, NIAN J Q, et al. Characterization and fine mapping of the rice gene *OsARVL4* regulating leaf morphology and leaf vein development[J]. *Plant Growth Regulation*, 2016, 78(3): 345–356.
- [17] 耿晓东, 王菊秋, 周英, 等. 不同光照强度下3种萱草属植物的光合特性与叶绿素荧光特性[J]. *分子植物育种*, 2023, 21(4): 1322–1329.
- [18] 刁俊明, 陈桂珠. 盆栽桐花树对不同遮光度的生理生态响应[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(4): 656–663.
- [19] 陈妍, 张艳芳, 赵令敏, 等. 光照强度对山药光合特性的影响和Rubisco羧化酶基因的克隆及表达分析[J]. *植物生理学报*, 2023, 59(6): 1169–1183.
- [20] ZHAO X, CHEN T T, FENG B H, et al. Non-photochemical quenching plays a key role in light acclimation of rice plants differing in leaf color[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, 7: 1968.
- [21] 周振翔, 李志康, 陈颖, 等. 叶绿素含量降低对水稻叶片光抑制与光合电子传递的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(19): 3709–3720.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维

(上接第 35 页)

- [23] THIPYAPONG P, STEFFENS J C. Tomato polyphenol oxidase (differential response of the polyphenol oxidase F promoter to injuries and wound signals)[J]. *Plant Physiology*, 1997, 115(2): 409–418.
- [24] 闫洪波, 李桂琴, 宋亚伟, 等. 5种蔷薇科树种多酚氧化酶比较基因组学分析[J]. *热带作物学报*, 2017, 38(2): 320–327.
- [25] TRAN L T, CONSTABEL C P. The polyphenol oxidase gene family in poplar: phylogeny, differential expression and identification of a novel, vacuolar isoform[J]. *Planta*, 2011, 234(4): 799–813.
- [26] ZHOU Y C, O' HARE T J, JOBIN-DECOR M, et al. Transcriptional regulation of a pineapple polyphenol oxidase gene and its relationship to blackheart[J]. *Plant Biotechnology Journal*, 2003, 1(6): 463–478.
- [27] 王曼玲, 胡中立, 周明全, 等. 植物多酚氧化酶的研究进展[J]. *植物学通报*, 2005(2): 215–222.
- [28] 魏婷婷, 赵志常, 汪自松, 等. 芒果果实多酚氧化酶(PPO)基因的克隆与表达分析[J]. *中国热带农业*, 2023(5): 9–17, 70.
- [29] 朱海生, 康娟, 刘建汀, 等. 丝瓜多酚氧化酶PPO基因家族的克隆与表达分析[J]. *核农学报*, 2018, 32(8): 1502–1512.
- [30] 段杜薇, 田培, 李芳芳, 等. 多酚氧化酶基因*NtPPOE*差异表达的效应分析[J]. *分子植物育种*, 2021, 19(3): 724–729.

责任编辑: 毛友纯

英文编辑: 罗 维