

胡晨曦, 李子恒, 张云虹, 等. 低温弱光对不同品种辣椒幼苗生长和光合特性的影响 [J]. 福建农业学报, 2022, 37 (5): 617–625.
HU C X, LI Z H, ZHANG Y H, et al. Effects of Low Temperature and Reduced Light on Growth and Photosynthesis of Seedlings of Different Pepper Cultivars [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 37 (5): 617–625.

低温弱光对不同品种辣椒幼苗生长和光合特性的影响

胡晨曦^{1,2}, 李子恒^{1,2}, 张云虹¹, 张林巧¹, 祁建波², 张 瑛¹,
周如美¹, 张永泰¹, 张永吉^{1,2*}

(1. 江苏里下河地区农业科学研究所, 江苏 扬州 225007; 2. 扬州农科农业发展有限公司, 江苏 扬州 225007)

摘 要:【目的】为选育耐低温弱光的辣椒品种提供理论依据。【方法】以 6 个不同品种辣椒为材料, 研究低温弱光 [15 °C/5 °C (昼/夜), 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] 对其幼苗生长和光合特性的影响。【结果】与正常温光 [25 °C/15 °C (昼/夜), 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$] 相比较, 低温弱光降低了不同品种辣椒幼苗株高、茎粗、叶面积和植株干重等生长指标, 其中扬椒 5 号的降低幅度要小于其他品种, 不同品种冷害指数表现为: 扬椒 5 号 < 科技之光 9 号 < 苏椒 5 号 < 巨无霸 5 号 < 海花 3 号 < 茄门甜椒。同时, 低温弱光降低了不同品种辣椒幼苗叶片净光合速率 (P_n)、气孔导度 (G_s)、蒸腾速率 (T_r)、最大光化学效率 (F_v/F_m)、实际光化学效率 (Φ_{PSII})、电子传递速率 (ETR) 和光化学淬灭系数 (qP), 其中扬椒 5 号的降低幅度要小于其他品种, 维持了叶片较强的光合能力和光能利用率。此外, 低温弱光降低了不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素含量, 其中扬椒 5 号的降低幅度要小于其他品种, 有利于维持叶片良好的光合特性。相关分析表明, 低温弱光下 P_n 、 G_s 、 T_r 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP 与冷害指数呈显著负相关, 与植株干重呈显著正相关。【结论】低温弱光抑制了不同品种辣椒幼苗生长和光合特性, 而扬椒 5 号能通过维持叶片较强的光合特性来缓解低温弱光对其生长的抑制, 因此具有较强的耐性。

关键词: 低温弱光; 辣椒; 生长; 光合特性

中图分类号: S 641.3

文献标志码: A

文章编号: 1008-0384 (2022) 05-0617-09

Effects of Low Temperature and Reduced Light on Growth and Photosynthesis of Seedlings of Different Pepper Cultivars

HU Chenxi^{1,2}, LI Ziheng^{1,2}, ZHANG Yunhong¹, ZHANG Linqiao¹, QI Jianbo², ZHANG Ying¹,
ZHOU Rumei¹, ZHANG Yongtai¹, ZHANG Yongji^{1,2*}

(1. Lixiahe Institute of Agricultural Sciences, Yangzhou, Jiangsu 225007, China; 2. Yangzhou Nongke Agricultural Development Co., Ltd., Yangzhou, Jiangsu 225007, China)

Abstract: 【Objective】Resistance to low temperature and reduced light exposure of pepper plants were studied for breeding purpose. 【Method】Seedlings of 6 pepper cultivars of different varieties were exposed to controlled day/night conditions of 25 °C/15 °C and 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ as control or 15 °C/5 °C and 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ for treatment. Growth and photosynthetic characteristics of the seedlings cultivated under the conditions were monitored. 【Result】Comparing to the seedlings grown under the normal 25 °C/15 °C and 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ conditions, those exposed to the reduced temperature and light showed reductions in plant height, stem diameter, leaf area, and plant dry weight. Of the various cultivars, Yangjiao No. 5 was least affected by the treatment. The cold injury indices of the cultivars ranked as Yangjiao No. 5 < Kejizhiguang No. 9 < Sujiao No. 5 < Juwuba No. 5 < Haihua No. 3 < Qiemen sweet pepper. The leaf P_n , G_s , T_r , F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR , and qP decreased by the treatment and were least affected on Yangjiao NO. 5 among all cultivars. The reduced temperature and light exposure also induced reductions on the chlorophyll content in the plants. Of which, Yangjiao No. 5 exhibited a higher resistance. There was a negative correlation between the P_n , G_s , T_r , F_v/F_m , Φ_{PSII} , ETR , and qP and the cold injury index, but a positive one between

收稿日期: 2022-02-09 初稿; 2022-04-15 修改稿

作者简介: 胡晨曦 (1992-), 男, 博士, 助理研究员, 主要从事蔬菜栽培技术研究 (E-mail: huchenxi345@126.com)

* 通信作者: 张永吉 (1985-), 男, 硕士, 副研究员, 主要从事蔬菜栽培技术研究 (E-mail: zhangyongji85@126.com)

基金项目: 江苏省农业科技自主创新资金 [CX (20) 3177]; 江苏省科技计划项目 (BE2021330); 江苏省蔬菜产业技术体系建设专项 (JATS[2021]267); 扬州市“绿扬金凤计划”优秀博士项目 (2019 年)

them and the dry weight of the pepper seedlings when exposed to low temperature and reduced light. 【Conclusion】 Exposure to low temperature and reduced light hindered the growth and photosynthesis of the pepper seedlings of different varieties with variances. Among the 6 cultivars, Yangjiao No. 5 appeared to withstand the adverse conditions better than the others and sustain a near normal growth.

Key words: low temperature and reduced light; pepper; plant growth; photosynthetic characteristics

0 引言

【研究意义】辣椒 (*Capsicum annuum* L.) 是我国种植面积最大的蔬菜, 喜温喜光, 对低温弱光较为敏感, 温度低于 15 ℃ 或光强低于 200 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 均会抑制其生长发育, 进而导致减产^[1-3]。近年来, 由于雾霾天气、连阴雨天气和极端低温天气频繁出现的影响, 辣椒生产中的低温弱光胁迫概率增加, 产量和品质因而下降, 严重制约了辣椒的高效栽培和反季节生产^[4-7]。因此, 解决辣椒生产中克服低温弱光逆境的关键问题有助于提高辣椒收成的产量与质量。【前人研究进展】研究表明, 不同品种辣椒对低温弱光的耐性存在显著差异^[6, 8], 因此选育耐低温弱光的辣椒品种是解决上述问题的重要途径。何勇等^[9]的研究表明, 低温弱光能显著提高辣椒幼苗的冷害指数, 不同耐性品种的冷害指数存在显著差异, 对低温弱光耐性较强的品种具有较低的冷害指数。高晶霞等^[6]的研究表明, 不同品种辣椒幼苗生长指标受低温弱光的影响存在显著差异, 其中耐低温弱光品种的株高、茎粗等生长指标降幅较小, 适宜在生产中示范推广。光合作用的同化积累提供了辣椒 90% 以上的干物质, 是辣椒进行正常生长发育的基础^[10]。吕晓菡和柴伟国^[11]比较了低温弱光下 4 种不同来源辣椒幼苗光合参数和叶绿素荧光参数的差异, 结果表明, 耐低温弱光的辣椒材料具有更好的光合特性。王春萍等^[8]的结果表明, 耐低温弱光的辣椒幼苗具有较高的光化学淬灭系数、光响应曲线等参数, 因此可用这些指标进行鉴定筛选。研究表明, 不同品种辣椒在苗期和成株期对低温弱光的耐性表现较为一致, 因此利用苗期生长和生理指标进行低温弱光的耐性鉴定不仅有较高的准确性, 而且操作方便、耗时短、见效快^[12, 13]。【本研究切入点】上述研究大多从生长或光合的单一角度来分析不同品种辣椒幼苗对低温弱光的响应, 有关两者在低温弱光下的相互关系还有待进一步研究。【拟解决的关键问题】本研究以 6 个不同品种辣椒幼苗为材料, 研究了低温弱光对其生长和光合特性的影响, 旨在为选育耐低温弱光的辣椒品种提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用辣椒品种为: 茄门甜椒、科技之光 9 号、海花 3 号、扬椒 5 号、巨无霸 5 号和苏椒 5 号, 其中茄门甜椒为低温敏感品种。各品种来源见表 1。供试基质为江苏兴农基质科技有限公司生产的育苗专用基质, 穴盘为 50 孔标准穴盘。

表 1 辣椒品种及来源
Table 1 Pepper cultivars and sources

编号 Number	品种名称 Cultivar	来源 Source
C1	茄门甜椒 Qiemen sweet pepper	沧州津科力丰种苗有限责任公司 Cangzhou Jinkelifeng Seedling Co., Ltd
C2	科技之光9号 Kejizhiguang No. 9	徐州市彭大种业有限公司 Xuzhou Pengda Seed Industry Co., Ltd
C3	海花3号 Haihua No. 3	北京海花生物科技有限公司 Beijing Haihua Biotechnology Co., Ltd
C4	扬椒5号 Yangjiao No. 5	江苏里下河地区农业科学研究所 Lixiahe Institute of Agricultural Sciences
C5	巨无霸5号 Juwuba No. 5	江苏省镇江市镇研种业有限公司 Jiangsu Zhenjiang Zhenyan Seed Industry Co., Ltd
C6	苏椒5号 Sujiao No.5	江苏省江蔬种苗科技有限公司 Jiangsu Jiangshu Seedling Technology Co., Ltd

1.2 试验方法

试验于 2021 年 4 月在江苏省现代农业产业技术体系扬州邗江蔬菜综合示范基地进行。辣椒种子浸种催芽后播种于装好基质的穴盘中并置于育苗温室内进行育苗, 其他管理同一般设施蔬菜育苗管理, 当幼苗长至四叶一心时 (播种后 35 d), 选择长势较为整齐的幼苗移入 RXZ 智能型人工气候箱 (宁波江南仪器厂) 进行试验。试验采用 2 因素随机区组设计, 设置正常温光 [CK, 温度为 25 ℃ /15 ℃ (昼/夜), 光照强度为 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光周期为 12 h/12 h (昼/夜)] 和低温弱光 [T, 温度为 15 ℃ /5 ℃ (昼/夜), 光照强度为 100 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 光周期为 12 h/12 h (昼/夜)] 2 个温光处理 (处理 5 d) 以及茄门甜椒 (C1)、科技之光 9 号 (C2)、海花 3 号 (C3)、

扬椒5号(C4)、巨无霸5号(C5)和苏椒5号(C6)6个品种处理,共12个处理,每个处理设3次重复,每个重复50株幼苗。

1.3 测定项目和方法

1.3.1 冷害指数 温光处理结束后,参照王春萍等^[2]的方法分别对6个低温弱光处理进行冷害指数统计,每个低温弱光处理统计150株辣椒幼苗。根据辣椒幼苗受低温弱光伤害程度将其分为5个冷害等级,0级:无明显症状;1级:植株第1、2叶叶缘失水,其他无明显冷害症状;2级:植株第1、2叶叶缘失水严重,第3叶叶缘略失水,心叶无明显冷害症状;3级:植株第1、2叶叶缘出现脱水斑,第3叶叶缘严重失水,心叶略失水;计算冷害指数,冷害指数=Σ(各级株数×级数)/(总株数×最高级别数)。

1.3.2 生长指标 温光处理结束后,每个处理设3个重复,每个重复随机选取10株幼苗,测定株高、茎粗和叶面积等指标,并将地上和地下部分分开,于105℃杀青10 min后75℃烘干至恒重,测定各部分干重。

1.3.3 光合参数 温光处理结束后,每个处理在生长指标选取的辣椒幼苗之外设3个重复,每个重复随机选取10株幼苗,选取辣椒幼苗生长点下方第1片功能叶,参考董乔等^[14]的方法采用便携式光合速率测定仪LI-6400(美国LI-COR公司)测定叶片净光合速率(P_n)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)和胞间二氧化碳浓度(C_i)等光合参数。光合仪参数设定光强为 $1000\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,胞间 CO_2 浓度为 $380\ \mu\text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,温度为25℃,相对湿度为75%。

1.3.4 叶绿素荧光参数 温光处理结束后,在光合参数测定完成后,选择与光合参数测定相同的辣椒叶片(设3个重复,每重复10株幼苗),参考王振华等^[15]的方法采用便携式叶绿素荧光仪PAM-2500(德国WALZ公司)测定叶绿素荧光参数。测量前先将叶片暗适应30 min,开启测量光测得初始荧光产量(F_o),再由饱和脉冲光测得最大荧光产量(F_m)。然后打开光化学光,强度为 $300\ \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,测定实际荧光产量(F')、光适应下的最大荧光产量(F_m')和光适应下的最小荧光产量(F_o'),并按如下公式计算最大光化学效率(F_v/F_m)= $(F_m'-F_o')/F_m'$,实际光化学效率(Φ_{PSII})= $(F'-F_o')/F_m'$,电子传递速率(ETR)= $\Phi_{\text{PSII}}\times\text{PAR}\times0.5\times0.84$ (PAR 为光合有效辐射),光化学淬灭系数(qP)= $(F'-F_o')/(F_m'-F_o')$,非光化学淬灭系数(NPQ)= $F_m/F_m'-1$ 。

1.3.5 叶绿素含量 温光处理结束后,在光合参数和叶绿素荧光参数测定完成后,选择与光合参数和叶绿素荧光参数测定相同的辣椒叶片(取3个重复,每重

复10株幼苗)。参考巩雪峰等^[16]的方法测定叶片叶绿素含量。取0.2 g鲜叶,加入20 mL体积分数80%的丙酮,密封后于室温下避光浸提24 h,取上清液,用分光光度计分别测定645 nm和663 nm的吸光值 A_{645} 和 A_{663} ,并按如下公式计算叶绿素含量:叶绿素a含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)= $(12.71A_{663}-2.59A_{645})/V/1000m$,叶绿素b含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)= $(22.88A_{645}-4.67A_{663})/V/1000m$,总叶绿素含量($\text{mg}\cdot\text{g}^{-1}$)=叶绿素a含量+叶绿素b含量,其中 V 为提取液体积(mL), m 为叶片鲜重(g)。

1.4 数据处理

采用Excel 2010对数据进行处理,SPSS 19.0对数据进行方差分析和差异显著性检验,并采用SigmaPlot 12.5作图。

2 结果与分析

2.1 低温弱光对不同品种辣椒幼苗生长指标的影响

与正常温光(CK)相比较,低温弱光(T)显著降低了不同品种辣椒幼苗的生长指标,且不同品种的降低幅度存在显著差异,降低幅度表现为: $C4<C2<C6<C5<C3<C1$ (表2)。低温弱光下,不同品种辣椒幼苗株高分别降低23.88%(C1)、12.50%(C2)、20.68%(C3)、9.50%(C4)、18.11%(C5)和14.15%(C6),茎粗分别降低19.45%(C1)、10.58%(C2)、17.61%(C3)、8.27%(C4)、14.31%(C5)和12.26%(C6),叶面积分别降低15.44%(C1)、9.49%(C2)、13.86%(C3)、8.53%(C4)、10.86%(C5)和9.92%(C6),地上部干重分别降低18.87%(C1)、10.13%(C2)、15.36%(C3)、7.05%(C4)、13.19%(C5)和11.49%(C6),地下部干重分别降低22.27%(C1)、10.32%(C2)、19.26%(C3)、8.03%(C4)、14.34%(C5)和11.31%(C6),植株干重分别降低19.29%(C1)、10.16%(C2)、15.83%(C3)、7.18%(C4)、13.34%(C5)和11.47%(C6)。此外,温光处理和品种对辣椒幼苗株高和地下部干重存在显著的互作效应,说明低温弱光下扬椒5号能维持较高的株高和地下部干重。以上结果表明,低温弱光抑制了不同品种辣椒幼苗的生长,但扬椒5号受到的抑制作用要小于其他品种。

2.2 低温弱光对不同品种辣椒幼苗冷害指数的影响

辣椒幼苗受低温弱光的伤害程度可以用冷害指数来表示。6个品种辣椒幼苗均受到了低温弱光的伤害,冷害指数表现为: $0.237(C4)<0.289(C2)<0.311(C6)<0.347(C5)<0.427(C3)<0.452(C1)$ (图1),说明低温弱光对茄门甜椒的伤害最大,对扬椒5号的伤害最小。

表 2 低温弱光对不同品种辣椒幼苗生长指标的影响
Table 2 Effects of low temperature and reduced light on growth of pepper seedlings

温光处理 Temperature and light treatment	品种 Cultivar	株高 Plant height /cm	茎粗 Stem diameter /mm	叶面积 Leaf area /cm ²	地上部干重 Aboveground dry weight/mg	地下部干重 Underground dry weight/mg	植株干重 Plant dry weight /mg
CK	C1	8.42±0.32 bcd	1.53±0.04 cd	7.75±0.25 bc	301.35±8.85 cd	43.01±1.27 ef	344.36±9.99 c
	C2	8.09±0.30 de	1.70±0.04 a	7.48±0.27 c	307.02±11.20 bcd	48.63±1.57 a	355.66±12.77 bc
	C3	8.89±0.35 ab	1.61±0.05 abc	7.40±0.26 c	326.17±7.26 ab	44.33±1.34 cde	370.50±8.60 ab
	C4	8.27±0.29 cde	1.66±0.05 a	8.02±0.27 ab	319.80±13.86 bc	47.80±1.52 ab	367.59±15.06 ab
	C5	8.72±0.29 abc	1.56±0.04 bc	8.30±0.28 a	311.90±8.64 bcd	45.76±1.42 bcd	357.66±9.96 bc
	C6	9.10±0.34 a	1.65±0.05 ab	8.13±0.30 ab	341.35±10.80 a	46.40±1.45 abc	387.75±12.15 a
T	C1	6.41±0.24 h	1.23±0.05 f	6.55±0.25 d	244.49±6.49 f	33.43±1.11 h	277.92±7.56 e
	C2	7.07±0.18 g	1.52±0.06 cd	6.77±0.26 d	275.91±10.09 e	43.61±1.54 def	319.53±11.58 d
	C3	7.05±0.28 g	1.32±0.05 e	6.37±0.24 d	276.05±10.10 e	35.79±1.24 h	311.85±11.34 d
	C4	7.49±0.27 fg	1.53±0.06 cd	7.33±0.30 c	297.25±12.93 d	43.96±1.70 cde	341.21±14.62 c
	C5	7.14±0.25 g	1.34±0.06 e	7.40±0.30 c	270.76±10.59 e	39.19±1.43 g	309.96±12.01 d
	C6	7.81±0.28 ef	1.45±0.07 d	7.32±0.26 c	302.14±13.21 cd	41.16±1.54 fg	343.29±14.74 c
F值 F value	F _T	221.05**	158.08**	96.46**	130.04**	182.32**	137.64**
	F _C	9.49**	17.54**	12.91**	15.05**	29.13**	14.65**
	F _{T×C}	4.16**	2.02	0.79	2.07	3.56*	2.24

CK代表正常温光，T代表低温弱光。同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。 F_T 和 F_C 分别代表温光处理和品种的F值； $F_{T\times C}$ 代表温光处理和品种互作的F值。*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著。

CK: normal temperature and light; T: low temperature and reduced light. Data with different lowercase letters on same column indicate significant differences at $P<0.05$. F_T and F_C : F values under treatment and of cultivars, respectively. $F_{T\times C}$: F value of interaction between treatment and cultivar. * and ** indicate significant at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively.

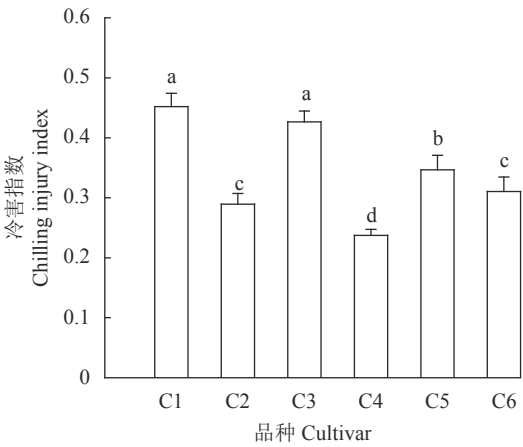
2.3 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片光合参数的影响

与正常温光（CK）相比较，低温弱光（T）显著降低了不同品种辣椒幼苗叶片 P_n 、 G_s 和 T_r ，提高了 C_i ，且不同品种的降低（提高）幅度存在显著差异，降低（提高）幅度表现为：C4<C2<C6<C5<C3<C1（图 2）。低温弱光下，不同品种辣椒幼苗叶片 P_n 分别降低 27.39%（C1）、13.74%（C2）、25.59%（C3）、9.43%（C4）、19.33%（C5）和 15.60%（C6）， G_s 分别降低 25.19%（C1）、9.97%（C2）、23.51%（C3）、7.84%（C4）、16.31%（C5）和 12.42%（C6）， T_r 分别降低 18.15%（C1）、9.19%（C2）、16.10%（C3）、8.51%（C4）、13.12%（C5）和 11.49%（C6）， C_i 分别提高 18.28%（C1）、8.41%（C2）、15.68%（C3）、7.22%（C4）、13.08%（C5）和 11.21%（C6）。以上结果表明，不同品种辣椒幼苗叶片的光合能力在低温弱光下均有所降低，而扬椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较强的光合能力。

2.4 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

与正常温光（CK）相比较，低温弱光（T）显著

降低了不同品种辣椒幼苗叶片 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、ETR 和 qP，提高了 NPQ，且不同品种的降低（提高）幅度存在显著差异，降低（提高）幅度表现为：C4<



不同小写字母表示处理间差异显著（ $P<0.05$ ）。下同。

Data with different lowercase letters indicate significant differences at $P<0.05$. Same for the below.

图 1 低温弱光对不同品种辣椒幼苗冷害指数的影响

Fig.1 Effect of treatment on cold injury index of pepper seedlings

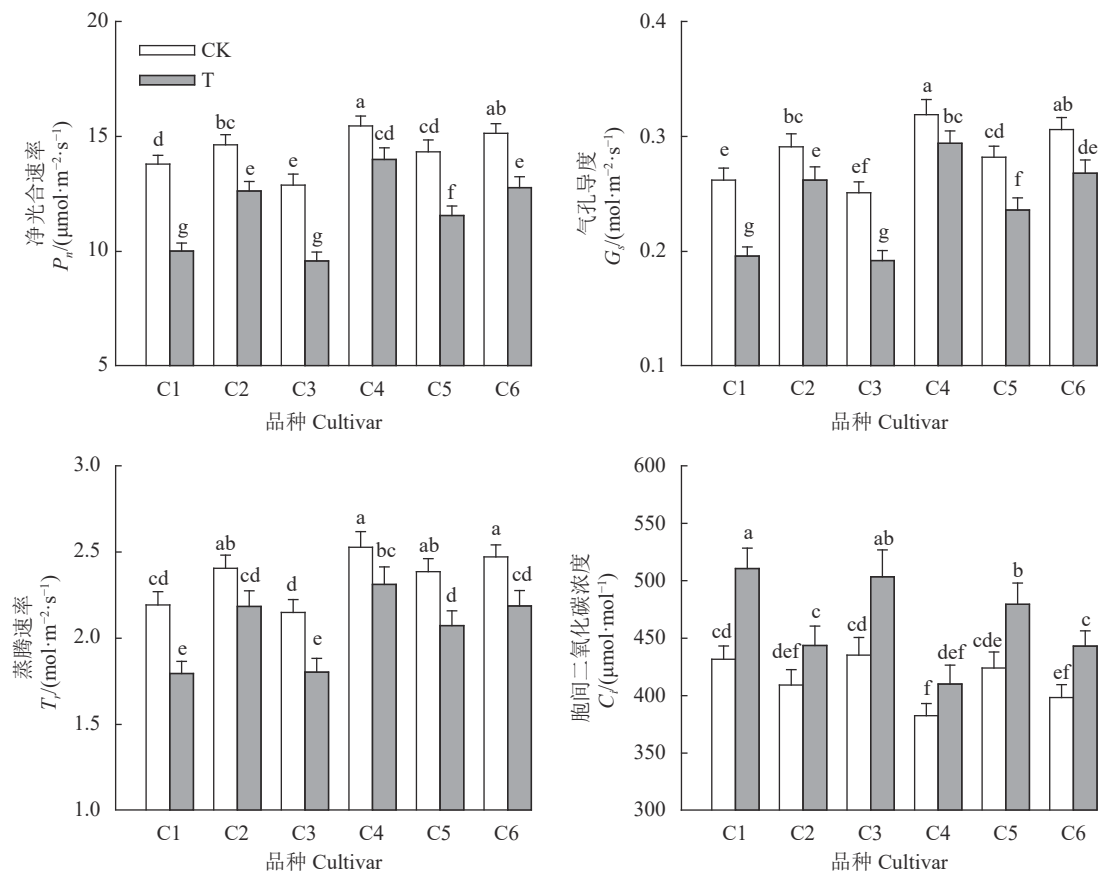


图 2 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片光合参数的影响

Fig. 2 Effects of treatment on leaf photosynthetic parameters of pepper seedlings

C2<C6<C5<C3<C1 (图 3)。低温弱光下，不同品种辣椒幼苗叶片 F_v/F_m 分别降低 28.73% (C1)、11.03% (C2)、26.34% (C3)、9.22% (C4)、18.14% (C5) 和 15.87% (C6)， Φ_{PSII} 分别降低 25.54% (C1)、10.55% (C2)、23.52% (C3)、8.50% (C4)、17.75% (C5) 和 13.43% (C6)， ETR 分别降低 22.29% (C1)、11.43% (C2)、17.06% (C3)、10.57% (C4)、14.19% (C5) 和 13.04% (C6)， qP 分别降低 21.06% (C1)、9.65% (C2)、17.72% (C3)、9.14% (C4)、15.53% (C5) 和 12.43% (C6)， NPQ 分别提高 20.35% (C1)、10.50% (C2)、17.27% (C3)、9.34% (C4)、14.76% (C5) 和 11.99% (C6)。以上结果表明，低温弱光降低了不同品种辣椒幼苗叶片的光能利用率，而扬椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较强的光能利用率。

2.5 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素含量的影响

与正常温光 (CK) 相比较，低温弱光 (T) 显著降低了不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素含量，且不同品种的降低幅度存在显著差异，降低幅度表现为：C4<C2<C6<C5<C3<C1 (图 4)。低温弱光下，不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素 a 含量

分别降低 28.36% (C1)、12.78% (C2)、25.13% (C3)、10.89% (C4)、19.67% (C5) 和 16.63% (C6)，叶绿素 b 含量分别降低 34.98% (C1)、15.66% (C2)、28.69% (C3)、12.50% (C4)、23.27% (C5) 和 19.03% (C6)，总叶绿素含量分别降低 29.96% (C1)、13.49% (C2)、25.99% (C3)、11.29% (C4)、20.55% (C5) 和 17.22% (C6)。此外，不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素 a/b 在低温弱光下略有上升，但差异不显著。以上结果表明，不同品种辣椒幼苗叶片的叶绿素含量在低温弱光下均有所降低，而扬椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较高的叶绿素含量，有利于维持叶片较强的光合特性。

2.6 冷害指数和生长指标与光合和叶绿素荧光参数的相关性分析

由表 3 可知，低温弱光下 P_n 、 G_s 、 T_r 、 Φ_{PSII} 和 ETR 与冷害指数呈显著负相关，与株高、茎粗、叶面积和植株干重呈显著正相关， C_i 和 NPQ 与株高、茎粗和植株干重呈显著负相关， F_v/F_m 和 qP 与冷害指数呈显著负相关，与株高、茎粗和植株干重呈显著正相关，表明叶片维持较强的光合特性能缓解幼苗受低温弱光的伤害程度，有利于维持幼苗良好的生长状况。

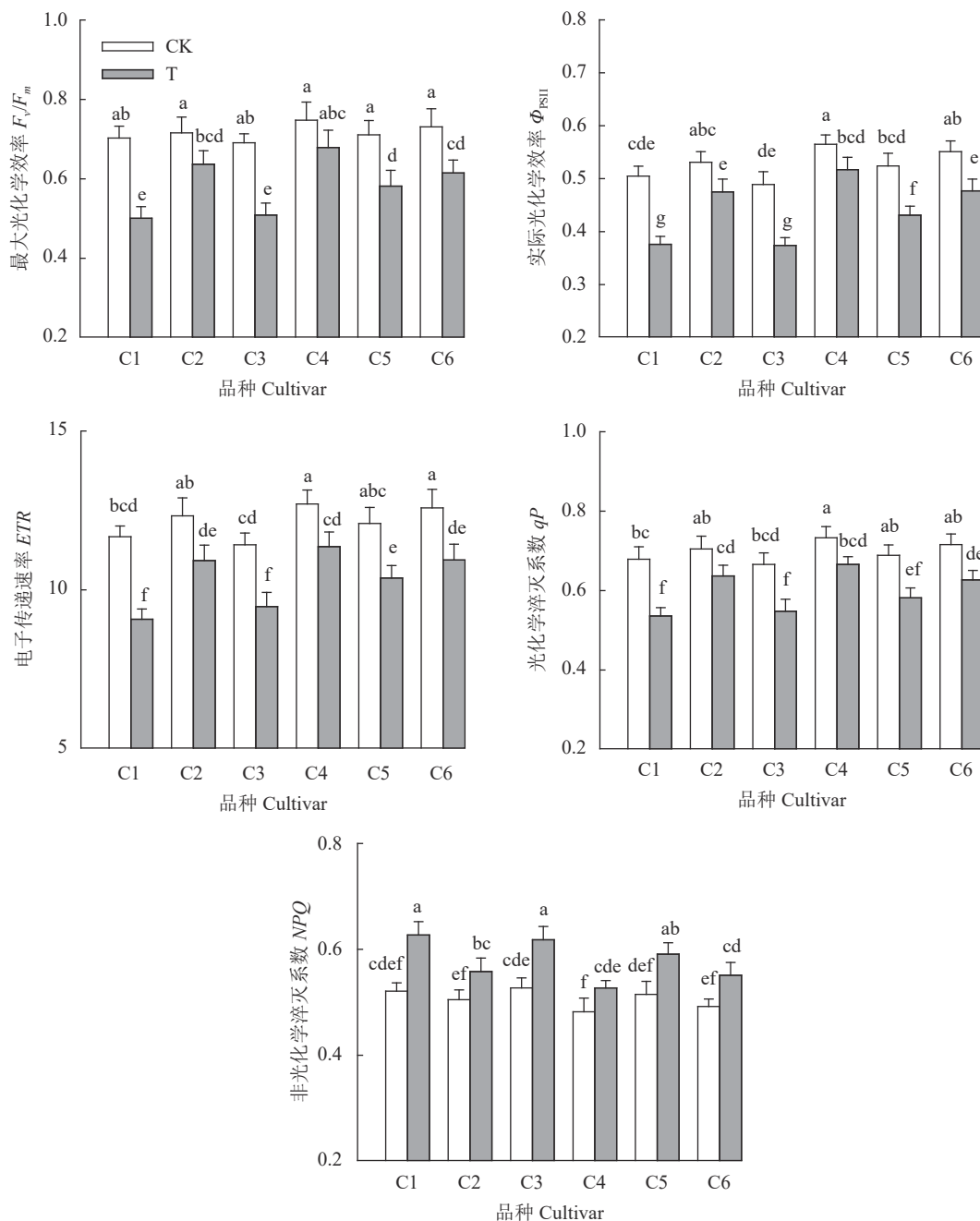


图 3 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig. 3 Effects of treatment on leaf chlorophyll fluorescence parameters of pepper seedlings

3 讨论与结论

本研究结果表明,与正常温光相比较,低温弱光显著降低了不同品种辣椒幼苗株高、茎粗、叶面积和植株干重等生长指标,从而抑制了辣椒幼苗的生长,这与前人在辣椒^[17]、番茄^[18,19]和黄瓜^[20]上的研究结果相类似。同时,各品种生长指标的降低幅度表现不同,表现为: C4<C2<C6<C5<C3<C1,这与冷害指数的表现相一致,说明扬椒 5 号在低温弱光条件下受到的伤害较轻并能维持幼苗良好的生长状况。

叶片的光合作用是维持植物生长发育的基础,因

此低温弱光下其光合能力的大小能够反映辣椒幼苗耐性的强弱^[21,22]。本研究结果表明,与正常温光相比较,低温弱光显著降低了不同品种辣椒幼苗叶片 P_n 、 G_s 和 T_r ,从而降低了叶片的光合能力。同时,低温弱光显著提高了叶片 C_i ,说明光合作用的抑制是非气孔因素造成的^[23]。不同品种的降低幅度存在显著差异,表现为: C4<C2<C6<C5<C3<C1,说明扬椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较强的光合能力。植物叶片对光能的利用效率通常情况下可以用叶绿素荧光参数的变化来表示^[24]。本研究结果表明,与正常温光相比较,低温弱光显著降低了不同

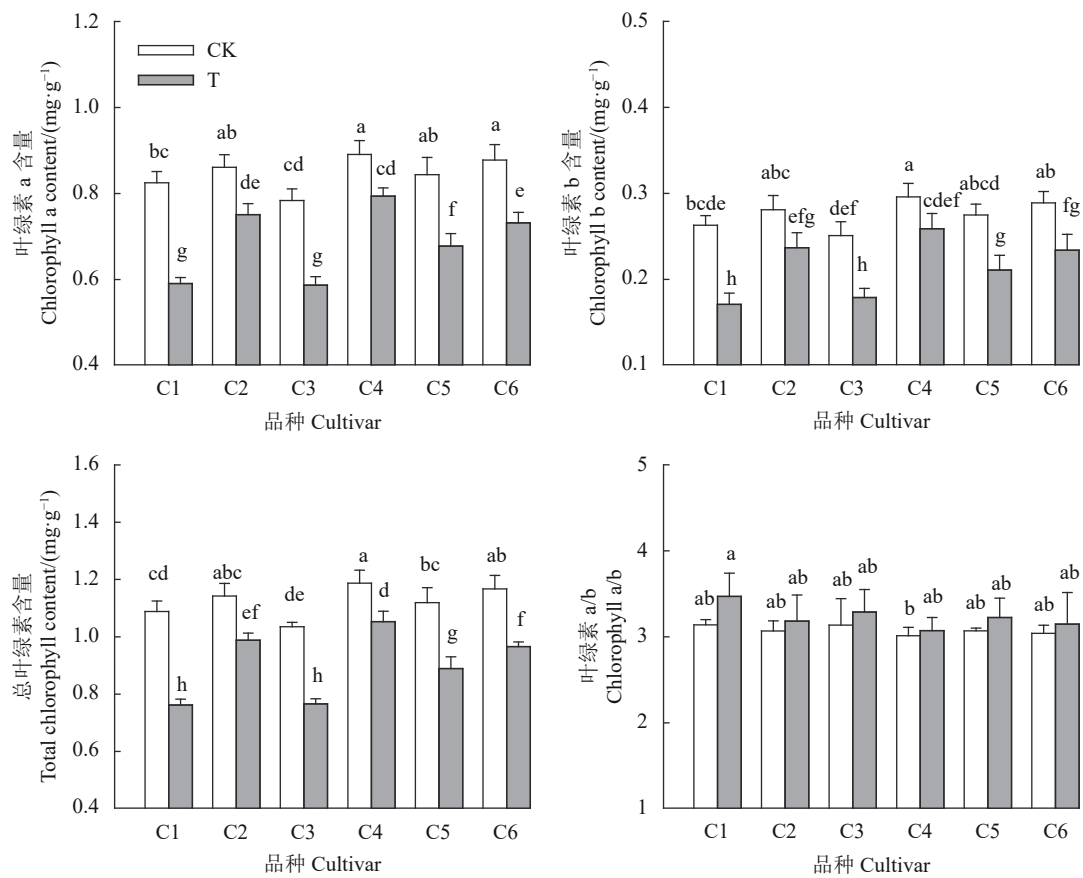


图 4 低温弱光对不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素含量的影响

Fig. 4 Effect of treatment on chlorophyll content in leaves of pepper seedlings

表 3 低温弱光下冷害指数和生长指标与光合参数和叶绿素荧光参数的相关性分析

Table 3 Correlations among cold injury, plant growth, photosynthesis, and chlorophyll fluorescence of pepper seedlings under treatment

指标 Index	净光合速率 P_n	气孔导度 G_s	蒸腾速率 T_r	胞间二氧化碳浓度 C_i	最大光化学效率 F_v/F_m	实际光化学效率 Φ_{PSII}	电子传递速率 ETR	光化学淬灭系数 qP	非光化学淬灭系数 NPQ
冷害指数 Chilling injury index	-0.791**	-0.801**	-0.745**	-0.039	-0.667**	-0.754**	-0.693**	-0.658**	0.580**
株高 Plant height	0.303*	0.329*	0.309*	-0.276*	0.190*	0.298*	0.386**	0.244*	-0.256*
茎粗 Stem diameter	0.558**	0.570**	0.548**	-0.547**	0.477**	0.567**	0.618**	0.455**	-0.475**
叶面积 Leaf area	0.323*	0.312*	0.301*	-0.182	0.164	0.257*	0.300*	0.153	-0.157
植株干重 Plant dry weight	0.401**	0.427**	0.396**	-0.393**	0.282*	0.394**	0.481**	0.356**	-0.345*

*和**分别表示在 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 水平上显著, $n=18$ 。
* and ** indicate significant at $P<0.05$ and $P<0.01$, respectively; $n=18$.

品种辣椒幼苗叶片 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP , 且不同品种的降低幅度存在显著差异, 表现为: $C4<C2<C6<C5<C3<C1$, 说明扬椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较强的光能利用率。PSII 所吸收的光能中热耗散的部分通常用 NPQ 来表示, 而低温弱光下扬椒 5 号的 NPQ 要小于其他品种, 从而进一步说明了扬

椒 5 号在低温弱光下能维持叶片较强的光能利用率。叶绿素是植物吸收利用光能、进行光合作用的重要基础^[25]。本研究结果表明, 与正常温光相比较, 低温弱光显著降低了不同品种辣椒幼苗叶片叶绿素含量, 且不同品种的降低幅度存在显著差异, 表现为: $C4<C2<C6<C5<C3<C1$, 说明扬椒 5 号在低

温弱光下能维持叶片较高的叶绿素含量,有利于维持叶片较强的光合特性。此外,相关分析表明,低温弱光下 P_n 、 G_s 、 T_r 、 F_v/F_m 、 Φ_{PSII} 、 ETR 和 qP 与冷害指数呈显著负相关,与植株干重呈显著正相关,说明叶片维持较强的光合特性能缓解幼苗受低温弱光的伤害程度,有利于维持幼苗良好的生长状况。

研究表明,不同品种辣椒在苗期和成株期对低温弱光的耐性表现较为一致^[12,13]。此外,前人在黄爪^[26]和甜瓜^[27]上也取得了类似的结果。因此,开展不同品种辣椒幼苗对低温弱光耐性的鉴定是选育耐低温弱光辣椒品种的一个重要途径。本研究结果表明,对低温弱光耐性较强的辣椒品种具有更好的幼苗生长状况以及较强的叶片光合性能,因此可用这些指标来进行鉴定筛选。本研究结果能为选育耐低温弱光的辣椒品种提供理论依据。

综上所述,低温弱光抑制了不同品种辣椒幼苗生长和光合特性,而扬椒 5 号能通过维持叶片较强的光合特性来缓解低温弱光对其生长的抑制,因此具有较强的耐性,可作为耐低温弱光品种进行推广。

参考文献:

- [1] 胡晨曦,肖洒,陈刚,等. 枯草芽孢杆菌悬浮种衣剂对辣椒幼苗生长和生理特性的影响[J]. 福建农业学报, 2021, 36 (9): 1017-1024.
HU C X, XIAO S, CHEN G, et al. Effects of seed-coating *Bacillus subtilis* suspension on growth and physiology of chili pepper seedlings [J]. *Fujian Journal of Agricultural Sciences*, 2021, 36 (9): 1017-1024. (in Chinese)
- [2] 王春萍,张世才,杨小苗,等. 辣椒苗期耐低温弱光鉴定指标研究[J]. 核农学报, 2021, 35 (4): 989-996.
WANG C P, ZHANG S C, YANG X M, et al. Research on screening index of chilling and weak light tolerance in pepper seedlings [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2021, 35 (4): 989-996. (in Chinese)
- [3] 睦晓蕾,毛胜利,王立浩,等. 弱光条件下辣椒幼苗叶片的气体交换和叶绿素荧光特性[J]. 园艺学报, 2007, 34 (3): 615-622.
SUI X L, MAO S L, WANG L H, et al. Effects of low light intensity on gas exchange and chlorophyll fluorescence characteristics of *Capsicum* seedlings [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2007, 34 (3): 615-622. (in Chinese)
- [4] 苟秉调,段盼盼,杨楠,等. 低温弱光胁迫下辣椒苗期光合相关指标的杂种优势[J]. 浙江农业学报, 2021, 33 (3): 429-436.
GOU B D, DUAN P P, YANG N, et al. Heterosis analysis of photosynthetic parameters of pepper seedling responding to low temperature and low light stress [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2021, 33 (3): 429-436. (in Chinese)
- [5] 孙明明. 2009年春季长江中下游地区连阴雨过程分析[J]. 科技导报, 2010, 28 (16): 77-82.
SUN M M. Analysis of persistent rainy process in the middle and lower region of the Yangtze River in the spring of 2009 [J]. *Science & Technology Review*, 2010, 28 (16): 77-82. (in Chinese)
- [6] 高晶霞,颜秀娟,李宁,等. 低温弱光对不同辣椒品系生长发育及光合特性的影响[J]. 北方园艺, 2016 (1): 6-9.
GAO J X, YAN X J, LI N, et al. Effect of low temperature and weak light on growth and photosynthetic characters of different pepper strains [J]. *Northern Horticulture*, 2016 (1): 6-9. (in Chinese)
- [7] 李小平,姜宏立,郑传举,等. 低温弱光对典型大棚作物生长影响的试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2019, 38 (S2): 48-51.
LI X P, JIANG H L, ZHENG C J, et al. Experimental study on response of greenhouse crops under low irradiance and temperature [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38 (S2): 48-51. (in Chinese)
- [8] 王春萍,黄启中,雷开荣,等. 低温弱光下辣椒幼苗叶绿素荧光特性及其与品种耐性的关系[J]. 园艺学报, 2015, 42 (9): 1798-1806.
WANG C P, HUANG Q Z, LEI K R, et al. Chlorophyll fluorescence characteristics of pepper seedlings under low temperature and weak light and their relationship to varieties tolerance [J]. *Acta Horticulturae Sinica*, 2015, 42 (9): 1798-1806. (in Chinese)
- [9] 何勇,符庆功,朱祝军. 低温弱光对辣椒叶片光合作用、叶绿素荧光猝灭及光能分配的影响[J]. 核农学报, 2013, 27 (4): 479-486.
HE Y, FU Q G, ZHU Z J. Effects of chilling under low irradiance on photosynthesis, chlorophyll fluorescence quenching and light allocation in pepper leaves [J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2013, 27 (4): 479-486. (in Chinese)
- [10] 马存金,陈剑秋,李曰鹏,等. 水溶肥中镁不同添加量对辣椒光合特性、干物质积累与分配的影响[J]. 北方园艺, 2018 (10): 9-14.
MA C J, CHEN J Q, LI Y P, et al. Effects of the addition of magnesium on photosynthetic characteristics, dry matter accumulation and distribution of pepper [J]. *Northern Horticulture*, 2018 (10): 9-14. (in Chinese)
- [11] 吕晓茵,柴伟国. 低温弱光下不同起源地辣椒幼苗光合特性的比较研究[J]. 浙江农业学报, 2014, 26 (1): 48-53.
LYU X H, CHAI W G. Comparison of photosynthetic characteristics of different origin pepper seedlings under low temperature and poor light [J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26 (1): 48-53. (in Chinese)
- [12] 丁梦佳,潘宝贵,王述彬,等. 辣椒苗期与成株期耐冷性的鉴定评价[J]. 江苏农业科学, 2019, 47 (2): 118-120.
DING M J, PAN B G, WANG S B, et al. Identification and evaluation of cold tolerance of pepper at seedling stage and adult stage [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2019, 47 (2): 118-120. (in Chinese)
- [13] 卢起建,龚繁荣,李俊. 甜椒耐低温弱光材料筛选方法的研究[J]. 上海农业学报, 2007, 23 (4): 67-71.
LU Q J, GONG F R, LI J. Screening of sweet pepper materials tolerant to low temperature and light [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2007, 23 (4): 67-71. (in Chinese)
- [14] 董乔,宋阳,孙潜,等. 不同光强和CO₂浓度对温室嫁接黄瓜光合作用及叶绿素荧光参数的影响[J]. 北方园艺, 2015 (22): 1-6.
DONG Q, SONG Y, SUN Q, et al. Effect of different light intensity and CO₂ concentration on photosynthesis and chlorophyll fluorescence parameters of grafting cucumber leaves in greenhouse [J]. *Northern Horticulture*, 2015 (22): 1-6. (in Chinese)
- [15] 王振华,朱延凯,张金珠,等. 水氮调控对轻度盐化土滴灌棉花生理

- 特性与产量的影响[J]. 农业机械学报, 2018, 49 (6): 296–308.
- WANG Z H, ZHU Y K, ZHANG J Z, et al. Effects of water and nitrogen fertilization on physiological characteristics and yield of cotton under drip irrigation in mildly salinized soil [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2018, 49 (6): 296–308. (in Chinese)
- [16] 巩雪峰, 李红, 宋占锋, 等. 外施 γ -聚谷氨酸对辣椒生长及其镉胁迫下生理特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2021, 49 (2): 97–104.
- GONG X F, LI H, SONG Z F, et al. Effects of γ -poly glutamic acid on growth and physiological characteristics of pepper under cadmium stress [J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2021, 49 (2): 97–104. (in Chinese)
- [17] 刘凯歌, 龚繁荣, 宋云鹏, 等. 低温弱光对甜椒幼苗生长和生理生化指标的影响及其与品种耐性的关系[J]. 北方园艺, 2020 (3): 8–14.
- LIU K G, GONG F R, SONG Y P, et al. Effects of low temperature and weak light on the growth and physiological and biochemical indexes of sweet pepper seedlings and their relationship to varieties tolerance [J]. *Northern Horticulture*, 2020 (3): 8–14. (in Chinese)
- [18] 杨再强, 袁昌洪, 丁宇晖, 等. 低温弱光对设施番茄苗期营养物质和干物质分配的影响[J]. 南京信息工程大学学报(自然科学版), 2020, 12 (1): 108–117.
- YANG Z Q, YUAN C H, DING Y H, et al. Effects of low temperature and low light intensity on nutrient and dry matter distribution in greenhouse tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seedlings [J]. *Journal of Nanjing University of Information Science & Technology (Natural Science Edition)*, 2020, 12 (1): 108–117. (in Chinese)
- [19] YANG Y B, DONG L D, SHI L Q, et al. Effects of low temperature and low light on physiology of tomato seedlings [J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2020, 11 (2): 162–179.
- [20] 李福德, 付鑫, 毕焕改, 等. 不同黄瓜砧木对低温弱光胁迫的响应及与ABA含量的关系[J]. 中国蔬菜, 2019 (5): 30–37.
- LI F D, FU X, BI H G, et al. Response to low temperature and weak light of different cucumber rootstocks and its relationship with ABA content [J]. *China Vegetables*, 2019 (5): 30–37. (in Chinese)
- [21] 杨万基, 蒋欣梅, 高欢, 等. 28-高芸苔素内酯对低温弱光胁迫辣椒幼苗光合和荧光特性的影响[J]. 南方农业学报, 2018, 49 (4): 741–747.
- YANG W J, JIANG X M, GAO H, et al. Effects of 28-homobrassinolide on photosynthetic and fluorescence characteristics of pepper seedlings under low temperature with dim light [J]. *Journal of Southern Agriculture*, 2018, 49 (4): 741–747. (in Chinese)
- [22] ERWIN J, HUSSEIN T, BAUMLER D J. Pepper photosynthesis, stomatal conductance, transpiration, and water use efficiency differ with variety, indigenous habitat, and species of origin [J]. *HortScience*, 2019, 54 (10): 1662–1666.
- [23] 付秋实, 李红岭, 崔健, 等. 水分胁迫对辣椒光合作用及相关生理特性的影响[J]. 中国农业科学, 2009, 42 (5): 1859–1866.
- FU Q S, LI H L, CUI J, et al. Effects of water stress on photosynthesis and associated physiological characters of *Capsicum annuum* L [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2009, 42 (5): 1859–1866. (in Chinese)
- [24] LIN H H, LIN K H, JIANG J Y, et al. Comparisons between yellow and green leaves of sweet potato cultivars in chlorophyll fluorescence during various temperature regimes under high light intensities [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110335.
- [25] 宋云鹏, 龚繁荣, 张丽丽, 等. 硅对 NO_3^- 胁迫下辣椒幼苗生长及氮代谢的影响[J]. 上海农业学报, 2020, 36 (5): 50–55.
- SONG Y P, GONG F R, ZHANG L L, et al. Effects of Si on plant growth and nitrogen metabolism of pepper seedlings under NO_3^- stress [J]. *Acta Agriculturae Shanghai*, 2020, 36 (5): 50–55. (in Chinese)
- [26] 王海涛, 秦智伟, 李丹丹, 等. 黄瓜耐弱光性鉴定指标研究及其苗期与成株期的相关分析[J]. 中国蔬菜, 2016 (8): 35–39.
- WANG H T, QIN Z W, LI D D, et al. Studies on cucumber identification index of low light tolerance and correlation analysis between its seedling and adult plants [J]. *China Vegetables*, 2016 (8): 35–39. (in Chinese)
- [27] 陈静, 柯思佳, 任琴琴, 等. 甜瓜野生资源PI420145耐冷性的自然低温鉴定[J]. 江苏农业科学, 2020, 48 (8): 135–138.
- CHEN J, KE S J, REN Q Q, et al. Identification of natural low temperature tolerance of wild melon resource PI420145 [J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2020, 48 (8): 135–138. (in Chinese)

(责任编辑: 于洪杰)