

6-BA 对弱光环境下 2 个黄瓜品种 幼苗生长及光合特性的影响

荀天卓¹, 胡皓翔¹, 陶哲¹, 兰鑫¹, 李雯雯¹,
许红军¹, 孙艳茹², 张卫华², 贾凯¹

(1. 新疆农业大学园艺学院 乌鲁木齐 830052; 2. 新疆东鲁水控农业发展有限公司 新疆疏勒 844200)

摘要:为缓解在春季生产中蔬菜育苗的弱光胁迫问题,以筛选出的黄瓜弱光敏感品种瑞祥密刺和耐弱光品种津顺 A4 为试验材料,在光照培养箱设置光合有效辐射 $500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 作为正常光对照 CK1,新疆农业大学日光温室的弱光环境 ($80 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 作为弱光对照 CK2。待苗龄 7 d 子叶展开后,对叶面喷施不同浓度 (ρ , 后同) 的 6-BA 溶液 ($40, 60, 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$), 分析在弱光环境下不同浓度处理对黄瓜幼苗生长指标、壮苗指数及光合指标的影响。结果表明,2 个品种的黄瓜在生长指标与光合特性方面基本表现一致。与弱光对照相比,喷施不同浓度 6-BA 可抑制株高增加,对茎粗、根长、地上部干鲜质量、根部鲜质量、壮苗指数均有提升,喷施 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 6-BA 处理均可以增高 2 个品种黄瓜幼苗的叶绿素相对含量、光合气体交换参数以及叶绿素荧光参数,瑞祥密刺和津顺 A4 幼苗的壮苗指数分别显著提高 13.79% 和 80.77%,净光合速率分别显著提高 65.92% 和 19.65%。经过隶属函数综合分析, $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗徒长的缓解效果最佳。

关键词: 黄瓜; 6-BA; 弱光环境; 生长指标; 光合特性

中图分类号: S642.2

文献标志码: A

文章编号: 1673-2871(2025)06-130-08

Effects of 6-BA on the growth and photosynthetic characteristics of two cultivars of cucumber seedlings under low light environment

XUN Tianzhuo¹, HU Haoxiang¹, TAO Zhe¹, LAN Xin¹, LI Wenwen¹, XU Hongjun¹, SUN Yanru², ZHANG Weihua², JIA Kai¹

(1. College of Horticulture, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, Xinjiang, China; 2. Xinjiang Donglu Water Control Agricultural Development Company Limited, Shule 844200, Xinjiang, China)

Abstract: To mitigate the effects of low-light stress on vegetable seedlings in spring production, the cucumber light-sensitive variety Ruixiangmici and the low-light-tolerant variety Jinshun A4 were used as test materials, and set up normal light ($500 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in the light incubator as the normal light control CK1, and the low light environment ($80 \sim 100 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) in the daylight chamber of Xinjiang Agricultural University as the low light control CK2. After the cotyledons unfolded at 7 d of seedling age, different concentrations of 6-BA solution ($40, 60, 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) were sprayed on the foliage to analyze the effects of different treatments on cucumber seedling growth, seedling growth index, and photosynthesis indexes under low-light environment. The results showed that the two varieties of cucumber showed the same performance in growth indexes and photosynthetic characteristics. Compared with the low-light control, spraying different concentrations of 6-BA inhibited plant height elongation, increased stem thickness, maximum leaf area, root length, aboveground dry and fresh mass, root dry and fresh mass, and seedling index, and increased the relative content of chlorophyll, photosynthetic gas exchange parameters, and chlorophyll fluorescence parameters, among which, Ruixiangmici and Jinshun A4 treated with $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA were more effective in the growth indexes. Ruixiangmici and Jinshun A4 seedlings sprayed with $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 6-BA increased significantly the strong seedling index by 13.79% and 80.77%, and the net photosynthetic rate by 65.92% and 19.65%, respectively. After the comprehensive analysis of the affiliation function, the concentration of $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ of 6-BA had the best effect on the mitigation of cucumber seedling growth under low light environment.

Key words: Cucumber; 6-BA; Low light environment; Growth index; Photosynthetic characteristics

收稿日期: 2024-10-31; 修回日期: 2024-12-25

基金项目: 新疆维吾尔自治区重点研发计划(2023B02024-3, 2022B02032-2); 新疆维吾尔自治区农业农村厅“新疆蔬菜产业技术体系昌吉综合试验站”(XJARS-07); 新疆维吾尔自治区党委组织部“2021 年天池博士计划项目”; 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2022D01B24)

作者简介: 荀天卓, 男, 在读硕士研究生, 研究方向为蔬菜生理与栽培。E-mail: xtz989@163.com

通信作者: 贾凯, 男, 讲师, 主要从事蔬菜栽培与育种研究。E-mail: xjau_jk@163.com

我国南疆地区分布于塔里木盆地四周,近年来逐渐形成规模化的设施蔬菜种植产业带。春季时常发生的沙尘天气将大量沙尘卷入空中,园艺设施塑料薄膜上附着的尘土难以清洗,设施内光照强度明显减弱,在春季生产中蔬菜育苗的弱光胁迫影响严重^[1]。黄瓜(*Cucumis sativus* L.)是葫芦科黄瓜属一年生蔓生或攀缘草本植物,是新疆地区设施栽培的重要作物^[2]。弱光环境会造成植株徒长,节间距增大,茎粗变细,叶色变浅,植株的干物质累积减少^[3]。弱光环境会导致瓜类蔬菜全株干物质含量及根冠比降低,幼龄植株叶片的叶绿素含量及光合速率等也会下降^[4-5]。6-苄基氨基嘌呤(6-benzylamino-purine, 6-BA),也称为苄腺嘌呤或BAP,是第一代人工合成的促进细胞分裂类物质,低浓度下可以促进植物细胞分裂、生长发育和提高植物抗逆性,通过刺激细胞分裂来提高开花比例和结果率^[6]。适宜浓度的6-BA对植物抗逆生理过程有明显的调控作用。李刘龙等^[7]研究表明,喷施 $0.01\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的6-BA能够延缓遮光处理下小麦旗叶的衰老进程,提高开花期遮光处理植株在成熟期的干物质积累量。张国斌等^[8]研究表明, $0.08\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的6-BA处理可以增强辣椒幼苗在弱光环境下光合酶的活性,提高净光合速率,也可以促进光合作用过程中的光反应和碳反应,促进光合产物的合成和积累,从而改善幼苗的能量供应。丁小涛等^[9]研究表明,对初花期的黄瓜植株喷施 $0.01\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的6-BA可以提升弱光胁迫下的光合指标。6-BA在缓解黄瓜苗期受弱光影响徒长的作用效果未知,因此,笔者以弱光敏感品种瑞祥密刺和耐弱光品种津顺A4黄瓜为研究对象,通过叶面喷施不同浓度6-BA,测定黄瓜幼苗的生长指标、光合指标及叶绿素荧光参数,通过隶属函数综合分析不同浓度6-BA处理对弱光条件下黄瓜幼苗生长的影响,以期筛选出最适宜的6-BA浓度,为弱光环境下黄瓜优质高效生产提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 材料

新疆农业大学园艺学院设施课题组前期通过对瑞祥密刺(乌鲁木齐瑞祥农业科技有限公司)、津顺A4(天津德惠农种业科技发展有限公司)、中农18号(中国农业科学院蔬菜花卉研究所)、津优35号(天津科润农业股份有限公司)、新泰密刺(新疆联创种子有限责任公司)5个华北型黄瓜进行光敏

感品种筛选,筛选出弱光敏感品种瑞祥密刺和耐弱光品种津顺A4作为本研究试验材料。

六苄氨基嘌呤溶液(浙江大鹏药业股份有限公司),有效成分2%;肥料为霍格兰营养液(湖南霍格兰生物工程有限公司)。

1.2 试验设计

试验于2023年3—4月在光照培养箱和新疆农业大学日光温室进行,光照培养箱模拟正常光对照(CK1),光合有效辐射设置 $500\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,日间光照时长14 h,温度 $25\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度50%;夜间光照设置0,温度 $15\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度15%。日光温室光照作为弱光环境(CK2)^[10],光合有效辐射峰值为 $80\sim 100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,日间温度 $25\sim 28\text{ }^{\circ}\text{C}$,夜间温度 $15\sim 18\text{ }^{\circ}\text{C}$,全天湿度40%~60%,光照时长14 h。采用长540 mm、宽280 mm的50孔塑料穴盘育苗,从荷兰进口基质,草炭、蛭石、珍珠岩体积比为3:1:1,于3月16日以1穴1粒的种植方式播种瑞祥密刺(R)和津顺A4(J),每个处理种植3个穴盘。3月20日出苗,3月27日(苗龄7 d)幼苗两片子叶完全展开后,叶面喷施蒸馏水,正常光对照为RCK1、JCK1;弱光对照为RCK2、JCK2;在弱光环境下喷施3种不同浓度(40、60和 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的6-BA,不同浓度处理瑞祥密刺编号分别为R6-1、R6-2、R6-3,不同浓度处理津顺A4编号分别为J6-1、J6-2、J6-3;喷施6-BA后,采用一清一浊的施肥方式,每4 d浇灌1次 $1/4$ 浓度霍格兰营养液^[11]。黄瓜幼苗喷施蒸馏水和不同浓度6-BA溶液后,每隔7 d测定一次生长指标,苗龄35 d时测定一次黄瓜植株的根、地上部鲜质量和光合指标^[12]。

1.3 指标测定

1.3.1 生长指标 使用完全随机的方法,于4月3日起,每隔7 d每处理选取9株长势一致的样本作为生物学重复,测定株高、茎粗、最大叶面积以及叶绿素相对含量,共测定4次。使用游标卡尺(精度 0.02 mm)测量幼苗株高(自基部至生长最高点)、茎粗(基部以上2 cm的下胚轴直径);采用YMJ-C叶面积测量仪(浙江托普仪器有限公司制造)测取最大叶面积;在4月24日,苗龄35 d,用卷尺(0.1 cm)测量最长根长;使用电子天平(0.001 g)测定植株的根鲜质量和地上部鲜质量;将幼苗植株放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱杀青30 min,转 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量,分别称量地上部干质量和根干质量。计算壮苗指数,公式如下:

壮苗指数=(茎粗/株高+根干质量/地上部干质

量)×全株干质量^[13]。

1.3.2 光合特性指标 使用完全随机的方法,于 4 月 3 日起,每隔 7 d 每处理选取 9 株长势一致的样本作为生物学重复,使用手持式叶绿素仪 SPAD-502 plus(日本柯尼卡美能达集团制造)测定 1 次叶绿素相对含量(从上往下数第 2 片真叶,SPAD 值),共测定 4 次。黄瓜幼苗苗龄 35 d 时,在黄瓜最新功能叶处,使用 LI-6400 便携式光合仪(美国 LI-COR 公司制造),选择晴朗无云的天气,于 10:00 测定净光合速率(P_n)、胞间二氧化碳浓度(C_i)、气孔导度(G_s)、蒸腾速率(T_r)等参数。使用 LI-600 荧光-气孔测量仪(美国 LI-COR 公司制造)测量叶绿素荧光参数,选择晴朗无云的天气,于 10:00 测定光反应参数:光下最大荧光(F_m')、稳态荧光产量(F_s)和光化学量子效率($\Phi PSII$),在黑暗环境下暗处理 0.5 h 后测定暗反应参数^[14]:初始荧光(F_o)、最大荧光产量(F_m)和 PSII 最大光化学量子产量(F_v/F_m)。

1.4 隶属函数分析

对黄瓜幼苗 35 d 的生长指标、干物质累积指

标、光合作用参数以及叶绿素荧光参数采用隶属函数法进行综合分析。隶属函数公式如下^[15]:

隶属函数值: $R(X)=(X-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;

综合隶属值: $R=R(X1)+R(X2)+...R(Xi)$ 。

式中, X_i 代表第 i 个综合指标; $X_{\min}$ 代表第 i 个综合指标的最小值; $X_{\max}$ 代表第 i 个综合指标的最大值。

1.5 数据分析

采用 Excel 2016 软件进行数据分析,采用 SPSS 23.0 软件进行方差分析,利用 Duncan 法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 6-BA 处理对弱光环境下黄瓜幼苗生长指标的影响

由表 1 可知,在瑞祥密刺品种中,黄瓜苗龄 14 d 时,RCK2 相较 RCK1 株高显著增加,茎粗显著降低,6-BA 处理较 RCK2 茎粗显著增加。黄瓜苗龄 21 d 时,RCK2 相较 RCK1 株高显著增加,R6-3 处理较 RCK2 株高降低最多,达到 18.61%,呈显著差

表 1 6-BA 对弱光环境下瑞祥密刺黄瓜幼苗生长指标的影响
Table 1 Effects of 6-BA on the growth indexes of Ruixiangmici seedlings under low light environment

苗龄 Seeding age/d	处理 Treatment	株高 Plant height/mm	茎粗 Stem diameter/mm	最大叶面积 Maximum leaf area/cm ²	SPAD 值 SPAD value	根长 Root length/cm
14	RCK1	27.11±1.26 b	3.43±0.06 b	9.26±0.93 d	31.47±1.08 ab	
	RCK2	40.90±1.04 a	3.01±0.15 c	26.80±1.41 ab	27.89±1.27 b	
	R6-1	42.44±1.22 a	3.78±0.15 a	22.89±0.66 c	32.74±1.84 a	
	R6-2	42.01±0.77 a	3.87±0.09 a	24.95±1.13 bc	32.28±0.96 a	
	R6-3	41.81±2.08 a	3.87±0.08 a	28.80±1.27 a	31.81±2.08 ab	
21	RCK1	52.78±0.33 d	3.62±0.04 b	11.58±0.58 d	31.97±2.52 ab	
	RCK2	72.00±2.05 a	3.27±0.12 c	29.02±0.96 a	26.59±1.94 b	
	R6-1	64.50±2.20 b	3.87±0.11 ab	22.58±0.87 c	28.04±1.74 ab	
	R6-2	61.54±1.43 bc	3.97±0.04 a	23.17±1.38 bc	30.69±2.51 ab	
	R6-3	58.60±1.69 c	4.05±0.13 a	26.15±1.28 ab	32.47±1.35 a	
28	RCK1	74.93±1.22 bc	3.65±0.09 b	12.23±0.82 c	35.50±2.58 a	
	RCK2	95.28±2.13 a	3.34±0.04 c	23.51±1.57 ab	25.54±1.6 b	
	R6-1	76.06±4.01 b	3.90±0.16 ab	24.30±0.91 a	29.34±1.66 b	
	R6-2	68.47±2.89 bc	4.07±0.07 a	20.31±1.14 b	36.29±1.48 a	
	R6-3	67.01±2.69 c	4.08±0.08 a	20.72±0.75 b	38.53±1.23 a	
35	RCK1	85.79±0.98 b	3.79±0.03 b	20.51±0.15 c	38.47±0.41 a	15.37±0.34 a
	RCK2	108.61±3.74 a	3.40±0.07 c	30.84±1.27 a	24.23±0.73 c	11.74±1.01 b
	R6-1	83.94±3.23 b	4.03±0.08 a	26.98±1.43 b	23.99±0.61 c	12.20±1.22 ab
	R6-2	80.12±3.30 bc	4.08±0.06 a	25.76±0.92 b	22.88±1.08 c	12.64±0.55 ab
	R6-3	73.78±1.89 c	4.14±0.03 a	24.33±1.01 b	27.78±0.98 b	14.10±0.94 a

注:不同小写字母表示同一时期的不同处理组之间差异显著($p<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference($p<0.05$) between different treatment groups of the same time. The same below.

异;RCK2 相较 RCK1 茎粗显著降低,R6-3 处理较 RCK2 茎粗增加最多,达到 23.85%,呈显著差异。黄瓜苗龄 28 d 时,RCK2 相较 RCK1 株高显著增加,R6-3 处理较 RCK2 株高降低最多,达 29.67%,其中 R6-1 相较 R6-3 处理差异显著;RCK2 相较 RCK1 茎粗显著降低,R6-3 处理较 RCK2 增加最多,达到 22.16%,且呈显著差异。黄瓜苗龄 35 d 时,RCK2 相较 RCK1 株高显著增加,R6-3 处理较 RCK2 株高降低最多,达到 32.07%,且呈显著差异;RCK2 相较 RCK1 茎粗显著降低,R6-3 处理较 RCK2 茎粗增加最多,达到 21.76%,且呈显著差异;RCK2 相较 RCK1 根长显著下降,R6-3 处理相较 RCK2 根长增加最多,达到 20.10%,且呈显著差异;RCK2 相较 RCK1 最大叶面积显著增加,R6-3 处理较 RCK2 最大叶面积下降最多,达到 21.11%,且呈显著差异;RCK2 相较 RCK1 叶绿素相对含量 (SPAD 值)显著下降,R6-3 处理相较 RCK2 增加最多,达到 14.65%,且呈显著差异。

由表 2 可知,在津顺 A4 品种中,黄瓜苗龄 14 d 时,JCK2 相较 JCK1 株高显著增加,J6-3 处理较 JCK2 株高降低最多,达到 19.60%,呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 茎粗显著降低,J6-3 处理较 JCK2

茎粗增加最多,达到 17.34%,呈显著差异。黄瓜苗龄 21 d 时,JCK2 相较 JCK1 株高显著增加,J6-3 处理相较 JCK2 株高降低最多,达到 13.12%,呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 茎粗显著降低,J6-3 处理较 JCK2 茎粗增加最多,达到 17.12%,呈显著差异。黄瓜苗龄 28 d 时,JCK2 相较 JCK1 株高显著增加,J6-3 处理较 JCK2 株高降低最多,达到 17.28%,呈显著差异,其中 J6-1 和 J6-3 处理间呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 茎粗显著降低,J6-3 处理较 JCK2 茎粗增加最多,达到 38.78%,呈显著差异,其中 J6-1 处理相较 J6-2 和 J6-3 处理呈显著差异。黄瓜苗龄 35 d 时,JCK2 相较 JCK1 株高显著增加,J6-3 处理较 JCK2 株高下降最多,达到 17.30%,呈显著差异,其中 J6-1、J6-2、J6-3 处理间均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 的茎粗显著降低,J6-3 处理相较 JCK2 茎粗增加最多,达到 15.67%,呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 根长显著下降,J6-3 处理相较 JCK2 根长增加最多,达到 44.94%,其中 J6-1、J6-2、J6-3 处理之间均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 最大叶面积显著增大,J6-3 处理相较 JCK2 增加最多,达到 40.11%,其中 J6-1、J6-2 和 J6-3 处理间均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 叶绿素相对含量 (SPAD 值)显著下降,J6-3

表 2 6-BA 对弱光条件下津顺 A4 黄瓜幼苗生长指标的影响

Table 2 Effects of 6-BA on the growth indexes of Jinshun A4 seedlings under low light environment

苗龄 Seeding age/d	处理 Treatment	株高 Plant height/mm	茎粗 Stem diameter/mm	最大叶面积 Maximum leaf area/cm ²	SPAD 值 SPAD value	根长 Root length/cm
14	JCK1	41.28±0.56 d	3.01±0.05 a	5.76±0.29 b	42.17±0.51 a	
	JCK2	58.20±0.61 a	2.48±0.08 c	8.16±0.15 a	39.33±0.41 b	
	J6-1	57.22±0.63 a	2.81±0.03 b	8.04±0.49 a	34.90±0.73 c	
	J6-2	51.89±0.18 b	2.86±0.04 ab	8.76±0.45 a	33.04±0.68 c	
	J6-3	46.79±0.46 c	2.91±0.07 ab	8.84±0.28 a	35.27±1.38 c	
21	JCK1	50.25±0.99 d	3.41±0.14 a	6.56±0.09 d	43.23±0.82 a	
	JCK2	72.49±0.63 a	2.57±0.07 c	11.22±0.44 c	30.19±1.35 d	
	J6-1	68.60±0.60 b	2.77±0.08 bc	12.32±0.75 bc	34.82±0.79 c	
	J6-2	67.13±0.76 b	2.83±0.03 bc	13.51±0.33 b	35.69±0.47 c	
	J6-3	62.98±0.69 c	3.01±0.08 b	16.63±0.57 a	38.14±0.38 b	
28	JCK1	72.52±0.99 e	3.66±0.11 a	8.18±0.28 d	41.30±0.70 a	
	JCK2	96.03±0.74 a	2.63±0.09 c	13.82±0.52 c	29.95±2.63 b	
	J6-1	91.51±1.41 b	3.19±0.09 b	13.92±0.71 c	29.76±1.69 b	
	J6-2	85.30±0.34 c	3.47±0.09 a	15.53±0.38 b	30.77±0.85 b	
	J6-3	79.44±0.65 d	3.65±0.04 a	19.17±0.75 a	32.02±1.63 b	
35	JCK1	85.14±0.39 e	3.87±0.08 a	14.42±0.32 e	41.43±0.99 a	20.31±0.53 b
	JCK2	110.77±1.40 a	2.68±0.05 c	18.50±0.32 d	30.40±0.94 c	15.80±0.31 d
	J6-1	101.97±0.29 b	2.99±0.05 b	21.72±0.39 c	33.51±1.15 b	17.38±0.42 c
	J6-2	95.68±0.80 c	3.09±0.05 b	24.03±0.40 b	34.73±0.80 b	20.06±0.75 b
	J6-3	91.61±1.00 d	3.10±0.10 b	25.92±0.78 a	38.81±0.68 a	22.90±0.62 a

处理相较 JCK2 增加最多,达到 27.66%,且呈显著差异,其中 J6-1、J6-2 处理均与 J6-3 处理呈显著差异。

2.2 6-BA 对弱光条件下黄瓜幼苗干物质累积的影响

由表 3 可知,黄瓜苗龄 35 d 时,在瑞祥密刺品种中,RCK2 相较 RCK1 地上部干鲜质量均降低,R6-1 处理相较 RCK2 地上部鲜质量增加最多,达到

22.51%,呈显著差异;R6-2 处理相较 RCK2 地上部干质量增加最多,达到 18.49%,呈显著差异,与 RCK1 差异不显著;RCK2 相较 RCK1 根系干鲜质量均下降,R6-3 处理相较 RCK2 根鲜质量增加最多,达到 40.00%,呈显著差异;RCK2 相较 RCK1 壮苗指数显著下降,R6-3 处理相较 RCK2 增加最多,达到 13.79%,呈显著差异。

在津顺 A4 品种中,JCK2 相较 JCK1 地上部干

表 3 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗苗龄 35 d 干物质累积的影响
Table 3 Effects of 6-BA on dry matter accumulation in cucumber seedlings at 35 d of seedling age under low light environment

处理 Treatment	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g	地上部干质量 Aboveground dry mass/g	根鲜质量 Fresh root mass/g	根干质量 Dry root mass/g	壮苗指数 Strong seedling index
RCK1	2.53±0.04 ab	0.134±0.003 ab	0.44±0.024 ab	0.019±0.000 8 a	0.053±0.001 6 a
RCK2	2.31±0.13 b	0.119±0.010 c	0.35±0.029 b	0.015±0.001 0 ab	0.029±0.001 1 c
R6-1	2.83±0.07 a	0.139±0.004 a	0.39±0.040 ab	0.015±0.000 7 ab	0.032±0.002 7 b
R6-2	2.62±0.20 ab	0.141±0.014 a	0.40±0.044 ab	0.014±0.002 4 b	0.031±0.003 9 b
R6-3	2.58±0.12 ab	0.131±0.006 b	0.49±0.072 a	0.014±0.001 8 b	0.033±0.002 1 b
JCK1	1.76±0.030 b	0.073±0.002 9 b	0.54±0.027 a	0.023±0.000 9 b	0.040±0.002 4 b
JCK2	1.57±0.031 c	0.059±0.002 0 c	0.38±0.010 d	0.016±0.000 9 c	0.026±0.001 6 e
J6-1	1.61±0.035 c	0.063±0.002 1 c	0.43±0.010 c	0.018±0.000 6 c	0.028±0.003 7 d
J6-2	1.79±0.045 b	0.071±0.003 9 b	0.49±0.005 b	0.023±0.000 7 b	0.037±0.004 4 c
J6-3	1.93±0.035 a	0.082±0.002 6 a	0.55±0.009 a	0.029±0.000 7 a	0.047±0.003 9 a

鲜质量均显著下降,J6-3 处理相较 JCK2 的地上部干鲜质量增加最多,分别显著增加 38.98%和 22.93%,其中 J6-1、J6-2、J6-3 处理之间均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 根系干鲜质量均显著下降,J6-3 处理相较 JCK2 的根系干鲜质量增加最多,分别显著增加 81.25%和 44.74%,J6-1、J6-2、J6-3 处理之间均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 壮苗指数显著

下降,J6-3 处理相较 JCK2 显著提高 80.77%,J6-1、J6-2、J6-3 处理间均呈显著差异。

2.3 6-BA 对弱光条件下黄瓜幼苗光合参数的影响

2.3.1 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗光合参数的影响 由表 4 可知,在瑞祥密刺品种中,RCK2 相较 RCK1 的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 值均显著下降,R6-3 处理相较 RCK2 提高效果最明显,分别显著提高 65.92%、

表 4 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗苗龄 35 d 光合参数的影响
Table 4 Effects of 6-BA on photosynthetic parameters of cucumber seedlings at 35 d of seedling age under low light environment

处理 Treatment	净光合速率 Net photosynthetic rate/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	蒸腾速率 Transpiration rate/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	气孔导度 Stomatal conductivity/ ($\text{mmol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)	胞间 CO_2 浓度 Intercellular CO_2 concentration/ ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
RCK1	4.80±0.08 a	2.20±0.03 a	98.52±1.46 a	464.82±0.24 a
RCK2	2.67±0.06 c	2.03±0.02 b	82.99±0.58 b	447.72±0.26 b
R6-1	3.35±0.03 bc	2.02±0.03 b	86.93±0.72 b	445.32±0.26 b
R6-2	3.55±0.19 b	2.07±0.02 ab	94.64±1.15 a	449.81±0.17 b
R6-3	4.43±0.09 a	2.26±0.02 a	100.95±0.28 a	460.88±0.72 a
JCK1	5.68±0.13 a	2.44±0.05 a	113.42±2.66 a	499.77±1.56 a
JCK2	3.97±0.07 c	1.50±0.03 d	54.37±1.26 e	481.35±0.32 b
J6-1	4.01±0.04 c	1.69±0.04 c	62.75±1.47 d	483.62±1.72 b
J6-2	4.06±0.06 c	2.19±0.03 b	98.67±1.54 c	485.92±0.74 b
J6-3	4.75±0.09 b	2.34±0.04 a	107.92±1.52 b	488.17±1.24 ab

21.64%、11.33%和 2.94%,均与 RCK1 差异不显著。

在津顺 A4 品种中,JCK2 相较 JCK1 的 P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均显著下降,各浓度 6-BA 处理相较 JCK2, P_n 、 T_r 、 G_s 、 C_i 均不同程度地提高,其中 J6-3 处理相较 RCK2 提高最多, P_n 、 T_r 、 G_s 分别显著提高 19.64%、98.49%和 56.00%, C_i 均略有提高,但差异不显著。

2.3.2 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗叶绿素荧光参数的影响 由表 5 可知,在瑞祥密刺品种中,RCK2 相较于 RCK1 的 F_m 、 F_o 、 F_m' 、 F_s 、 $\Phi PSII$ 均显著降低,

R6-3 处理相较 RCK2 的 F_m 值增加最多,达到 3.23%,但差异不显著;RCK1、RCK2 的 F_v/F_m 值和不同浓度的 6-BA 处理均无显著差异;R6-3 处理相较 RCK2 的 F_m 值增加最多,达到 27.58%,呈显著差异;R6-3 处理相较 RCK2 的 F_s 值增加最多,达到 13.23%,呈显著差异,其中 R6-1 相较 R6-2 和 R6-3 处理均呈显著差异;R6-3 处理相较 RCK2 的 $\Phi PSII$ 值增加最多,达到 5.26%,呈显著差异。

在津顺 A4 品种中,JCK2 相较于 JCK1 的 F_m 、

表 5 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗 35 d 苗龄叶绿素荧光参数的影响

Table 5 Effects of 6-BA on chlorophyll fluorescence parameters of cucumber seedlings at 35 d of seedling age under low light environment

处理 Treatment	最大荧光产量 F_m	初始荧光 F_o	PSII 最大光化学 量子产量 F_v/F_m	光下最大荧光 F_m'	稳态荧光产量 F_s	光化学量子效率 $\Phi PSII$
RCK1	563.83±0.80 a	119.10±1.23 a	0.81±0.002 9 a	525.19±1.59 a	121.50±1.13 a	0.81±0.003 5 a
RCK2	506.96±1.44 b	96.87±2.44 b	0.80±0.003 7 a	414.83±4.55 b	95.21±0.71 c	0.76±0.007 6 c
R6-1	510.92±1.60 b	104.18±0.75 b	0.80±0.002 1 a	524.05±2.85 a	98.61±1.22 c	0.78±0.001 7 b
R6-2	500.51±3.87 b	103.51±1.05 b	0.80±0.001 4 a	525.06±3.93 a	105.06±1.89 b	0.79±0.005 6 b
R6-3	523.34±3.05 b	104.77±1.21 b	0.80±0.001 3 a	529.24±8.65 a	107.81±0.90 b	0.80±0.005 1 ab
JCK1	521.32±2.00 a	105.49±0.57 a	0.80±0.004 4 b	526.70±7.98 a	131.67±7.47 ab	0.76±0.004 5 a
JCK2	414.96±4.57 c	92.16±0.34 b	0.77±0.002 8 c	381.04±10.45 c	93.51±2.32 c	0.75±0.008 8 a
J6-1	487.12±2.59 b	95.08±0.69 b	0.80±0.002 4 b	497.75±5.40 b	122.77±1.68 b	0.74±0.011 8 a
J6-2	506.70±7.08 a	109.07±4.64 a	0.81±0.002 3 b	510.47±6.90 ab	127.02±2.61 b	0.75±0.006 6 a
J6-3	517.88±6.11 a	106.62±1.92 a	0.82±0.011 8 a	522.72±4.36 a	139.17±2.02 a	0.75±0.007 5 a

F_o 、 F_v/F_m 、 F_m' 、 F_s 值均显著降低,J6-3 处理相较 JCK2 的 F_m 值增加最多,达到 24.80%,呈显著差异,J6-1 处理与 J6-2、J6-3 处理均呈显著差异;JCK2 相较 JCK1 的 F_o 值显著下降 12.64%,J6-2 处理相较 JCK2 的 F_o 值增加最多,达到 18.35%,呈显著差异,J6-2、J6-3 处理均与 JCK2 呈显著差异;J6-3 处理相较 JCK2 的 F_v/F_m 值增加最多,达到 6.49%,J6-1、J6-2 处理均与 J6-3 处理呈显著差异;J6-3 处理相较 JCK2 的 F_m' 值增加最多,达到 37.18%,J6-1 与 J6-3 处理呈显著差异;J6-3 处理相较 JCK2 的 F_s 值增加最多,达到 48.83%,J6-1、J6-2 处理均与 J6-3 处理呈显著差异;JCK1、JCK2 的 $\Phi PSII$ 值和不同浓度的 6-BA 处理均无显著差异。

2.4 6-BA 对弱光环境下黄瓜幼苗生长影响的综合评价

采用隶属函数法,对在正常光环境和弱光环境下黄瓜幼苗喷施 6-BA 的各个指标进行综合评价。由表 6、表 7 可知,不同品种的黄瓜对弱光下喷施不同浓度 6-BA 处理的响应相同。在瑞祥密刺品种中,综合隶属函数度排名由高到低为 RCK1、R6-3、

R6-2、R6-1、RCK2;在津顺 A4 品种中,综合隶属函数度排名与瑞祥密刺品种相同,由高到低依次为 JCK1、J6-3、J6-2、J6-1、JCK2。

3 讨论与结论

近年来,随着新疆蔬菜产业的发展,现代化育苗工厂对育苗效率的要求逐年提高,轻简化和集约化成为未来发展的趋势^[16],然而由于南疆地处塔克拉玛干沙漠周围,春季常伴随沙尘天气使园艺设施光照减弱,直接影响植株的光合作用。在弱光环境下,黄瓜幼苗的光合产物会优先分配叶片,增加叶面积、叶片变薄,同时茎秆变细,株高、茎节间长、叶面积等均显著增加,分枝数、叶鲜质量、植株干质量、坐果率和单果质量等显著降低,减少了黄瓜叶片中的光合产物输出,果实中光合产物的分配比例降低,花芽数减少,果实中可溶性固形物含量和果实硬度均下降,成熟期推迟^[17-18]。王兴松等^[19]研究表明,喷施 6-BA 800 倍液可以提升烤烟旺长期 9.0%的茎粗,在成熟期增加 11.8%的茎粗。杨德光等^[20]研究表明,15 mg·L⁻¹ 的 6-BA 对低温胁迫下玉米幼

表6 6-BA对弱光条件下瑞祥密刺黄瓜幼苗生长影响的综合评价
Table 6 Comprehensive evaluation of 6-BA on the growth of Ruixiangmici seedlings under low light environment

处理 Treat- ment	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	最大叶面积 Maximum leaf area	根长 Root length	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass	地上部干质量 Aboveground dry mass	根干质量 Dry root mass	根鲜质量 Fresh root mass	SPAD 值 SPAD value	壮苗指数 Strong seedling index	P_n	T_r	C_i	G_s	F_m	F_o	F_v/F_m	F_v/F_m'	F_s	$\Phi PSII$	综合隶属度 Membership sum value	排名 Rank
RCK1	1.00	0.53	1.00	1.00	0.43	0.68	1.00	0.66	1.00	1.00	1.00	0.92	1.00	0.91	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	18.12	1
R6-3	1.00	1.00	0.00	0.22	0.52	0.53	0.00	1.00	0.31	0.08	0.89	1.00	0.19	1.00	0.04	0.08	0.38	0.78	0.39	0.84	10.26	2
R6-2	0.95	0.92	0.51	0.00	0.60	1.00	0.08	0.35	0.00	0.08	0.47	0.33	0.04	0.66	0.24	0.25	0.14	0.90	0.36	0.61	8.50	3
R6-1	0.71	0.85	0.37	0.08	1.00	0.92	0.30	0.25	0.07	0.13	0.34	0.00	0.00	0.24	0.00	0.13	0.00	0.79	0.08	0.63	6.87	4
RCK2	0.00	0.00	1.00	0.46	0.00	0.00	0.30	0.00	0.09	0.00	0.00	0.00	0.03	0.00	0.09	0.00	0.18	0.00	0.00	0.00	2.15	5

表7 6-BA对弱光条件下津顺A4黄瓜幼苗生长影响的综合评价
Table 7 Comprehensive evaluation of 6-BA on the growth of Jinshun A4 seedlings under low light environment

处理 Treat- ment	株高 Plant height	茎粗 Stem diameter	最大叶面积 Maximum leaf area	根长 Root length	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass	地上部干质量 Aboveground dry mass	根干质量 Dry root mass	根鲜质量 Fresh root mass	SPAD 值 SPAD value	壮苗指数 Strong seedling index	P_n	T_r	C_i	G_s	F_m	F_o	F_v/F_m	F_v/F_m'	F_s	$\Phi PSII$	综合隶属度 Membership sum value	排名 Rank
JCK1	1.00	1.00	1.00	0.64	0.53	0.61	0.54	0.94	1.00	0.67	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.79	0.51	1.00	0.84	1.00	17.05	1
J6-3	0.65	0.35	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	0.76	1.00	0.46	0.89	0.37	0.91	0.97	0.85	1.00	0.97	1.00	0.89	16.08	2
J6-2	0.48	0.34	0.84	0.60	0.61	0.52	0.54	0.65	0.39	0.52	0.05	0.74	0.25	0.75	0.86	1.00	0.74	0.89	0.73	0.63	12.15	3
J6-1	0.18	0.26	0.63	0.22	0.11	0.17	0.15	0.29	0.28	0.10	0.02	0.21	0.12	0.14	0.68	0.17	0.53	0.80	0.64	0.00	5.72	4
JCK2	0.00	0.00	0.35	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.79	1.14	5

苗的根长、叶面积以及干鲜质量均有显著提升。郭丽华^[21]研究表明,喷洒 2%的 6-BA333 倍液可以提高小白菜 7.26%的单株质量。前人研究表明,喷施 6-BA 可以增加植株茎粗、根长、叶面积^[22],本研究与前人的研究结果基本一致,对弱光环境下 2 个品种的黄瓜幼苗进行叶面喷施 6-BA 溶液,2 个品种的黄瓜表现趋势一致,相较于弱光对照,均能够有效降低植株株高,增大茎粗,同时减小了弱光敏感品种瑞祥密刺黄瓜幼苗的最大叶面积,可能由于有机物分配侧重于地上部的干物质累积,增加了耐弱光品种津顺 A4 黄瓜幼苗的最大叶面积,获取更多的光照面积。2 个品种的黄瓜幼苗地上部的干鲜质量均高于弱光对照,增加地上部的干物质积累,均增加了根部鲜质量,对瑞祥密刺根部干质量作用并不明显,说明提高了瑞祥密刺黄瓜幼苗弱光环境下的根系含水量,而津顺 A4 黄瓜幼苗的根部干质量高于弱光对照,增加了根部的干物质积累。壮苗的主要特征是株高适中、茎秆粗壮、叶色深绿、根系发达^[23]。本研究表明,与弱光对照相比,喷施 6-BA 溶液均可以显著提升黄瓜幼苗的壮苗指数,浓度越高效果越显著,在浓度为 80 mg·L⁻¹时效果最明显。

弱光胁迫会降低黄瓜 Rubisco 酶、FBP 磷酸酯酶、SBP 磷酸酯酶活性,阻碍 CO₂ 电子传递,从而抑制黄瓜对光能的吸收^[24]。弱光胁迫下植株叶片细胞膜的完整性会遭到破坏,细胞渗透性增大,导致细胞内电解质外渗,叶绿素含量下降^[25-26]。在非胁迫环境条件下,植物叶片叶绿素荧光参数 F_v/F_m 趋于稳定,而在胁迫条件下该参数明显下降^[27-28]。周庆峰等^[29]研究表明,在弱光环境下,马铃薯苗期净光合速率降低 56.8%。钟梦江等^[30]研究表明,弱光处理显著降低紫叶生菜的气孔导度、净光合速率以及蒸腾速率,表明弱光可以降低植株的光合作用强度。刘强等^[31]研究表明,喷施 6-BA 可以提升在盐胁迫下黑果枸杞叶的净光合速率。刘凯歌等^[32]研究表明,喷施 6-BA 可以缓解甜椒幼苗受到高温胁迫的影响,提升叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性。杨晓春等^[33]研究表明,外源 6-BA 可以降低镉胁迫对茄子幼苗生长的影响,显著提升茄子幼苗的 P_n ,表明 6-BA 可以增强植株的抗逆性,促进光合作用。本研究与前人的研究结果基本一致,与弱光对照相比,2 个品种的黄瓜表现总体趋势一致,喷施 6-BA 一段时间后,均可提升叶绿素相对含量、 P_n 、 G_s 与 T_r ,在叶绿素荧光参数中,津顺 A4 的 F_m 、 F_o 、 F_v/F_m 、 F_m' 和 F_s 均有所提升,而瑞祥密刺则是在 F_m' 、 F_s 和 $\Phi PSII$ 中提升幅度较

大,表明喷施 6-BA 可以增强弱光环境下黄瓜的光合作用,对 2 个品种具有普适性。

综上所述,在弱光环境下对 2 个黄瓜品种幼苗喷施 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6-BA,在黄瓜幼苗苗龄 35 d 时相较弱光对照均可以显著降低幼苗的株高,增加茎粗、根长、地上部干鲜质量,提高叶绿素相对含量、光合参数以及叶绿素荧光参数。经过隶属函数综合分析,叶面喷施 $80\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 6-BA 溶液缓解弱光条件的效果最佳。

参考文献

- [1] 李亚云,成巍,王宁,等.塔克拉玛干沙漠和戈壁沙漠春季沙尘暴特征及其气象影响因素对比[J].中国沙漠,2023,43(4):1-9.
- [2] 王耐红,刘皓玥,左成,等.黄瓜新品种唐秋杂 8 号的选育[J].中国瓜菜,2024,37(8):171-174.
- [3] SHAO S, TAN S L. Colonization with bacterial fertilizer improves resistance to low light intensity in cucumber seedlings[J]. Journal of Plant Nutrition, 2012, 35(14):2107-2117.
- [4] 蒋晓婷,林碧英,林义章.弱光胁迫对丝瓜幼苗生长及生理生化特性的影响[J].北方园艺,2015(9):14-18.
- [5] 熊宇,杨再强,薛晓萍,等.遮光处理对温室黄瓜幼龄植株叶片光合参数的影响[J].中国农业气象,2016,37(2):222-230.
- [6] 葛礼姣,程玉静,王小秋,等.GA₃和 6-BA 对高温胁迫下芥菜种子萌发的影响[J].中国瓜菜,2023,36(9):108-115.
- [7] 李刘龙,卫茗梅,李秀,等.外源 6-BA 对不同时期遮光下江汉平原稻茬小麦产量的影响[J].应用生态学报,2019,30(11):3753-3761.
- [8] 张国斌,杨芳芳,郁继华.6-BA 预处理对低温弱光胁迫下辣椒幼苗光合特性和内源激素含量的影响[J].草业学报,2013,22(3):177-183.
- [9] 丁小涛,金海军,张红梅,等.6-BA 缓解黄瓜弱光胁迫的浓度研究[J].浙江农业学报,2010,22(6):769-773.
- [10] 刘柯宁,张力允,刘博文,等.多效唑对高羊茅弱光下生长及其碳氮代谢的调控作用[J].草地学报,2023,31(1):105-111.
- [11] 赵虎.外源物质对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[D].乌鲁木齐:新疆农业大学,2019.
- [12] 王康,闫洪朗,王曼曼,等.低温弱光对甜瓜种子萌发和幼苗生长的影响[J].安徽农业科学,2022,50(7):46-47.
- [13] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000.
- [14] 许亚良,刘新颖,崔寿广,等.UV-A 对黄瓜嫁接苗质量及生理特性的影响[J].植物生理学报,2023,59(7):1370-1382.
- [15] 摆福红,王晓敏,胡新华,等.基于主成分和隶属函数分析的露地大果番茄杂交组合综合评价[J].中国瓜菜,2024,37(12):88-95.
- [16] DU X W, GAO K H, SI L Q. Design and experiments of a vision-guided integrated cavity tray seedling culling and replanting system[J]. IEEE Access, 2023, 11:144545-144559.
- [17] 李若婵,高瑀杰,寇龙龙,等.补光光强和补光时间对黄瓜植株生长和果实品质的影响[J].山东农业科学,2024,56(3):43-47.
- [18] ZHONG Y F, XIA T Q, PENG S H, et al. Effect of selenium on the growth and cadmium accumulation of tomato seedlings in low temperature and low light[C]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2021, 687:012079.
- [19] 王兴松,黄跃,陈兴鹏,等.喷施不同浓度 6-BA 对烤烟光合特性及质量的影响[J].江苏农业科学,2024,52(5):113-118.
- [20] 杨德光,宫磊,王迎博,等.外源 6-苄氨基嘌呤(6-BA)对玉米幼苗抗冷性影响研究[J].玉米科学,2023,31(5):74-82.
- [21] 郭丽华.2%苄氨基嘌呤可溶液剂对小白菜生长影响试验[J].上海蔬菜,2019(1):42.
- [22] 李舜伟,王世琛,王龙,等.不同浓度营养液对黄瓜壮苗效果的影响[J].浙江农业科学,2023,64(10):2403-2408.
- [23] 朱程红,付稳,张正,等.外源生长调节物质对低温弱光胁迫下辣椒幼苗生长的影响[J].中国蔬菜,2024(3):40-50.
- [24] 艾希珍,马兴庄,于立明,等.弱光下长期亚适温和短期低温对黄瓜生长及光合作用的影响[J].应用生态学报,2004,15(11):2091-2094.
- [25] 倪栋,杨洁,朱素英,等.低温弱光对西瓜光合生理特性的影响[J].中国瓜菜,2024,37(10):63-69.
- [26] 谢雨霏,曾维英,雷怡,等.荫蔽对大豆叶片角度及光合特性的影响[J].四川农业大学学报,2024,42(4):744-751.
- [27] TIAN Y L, SACHARZ J, WARE M A, et al. Effects of periodic photoinhibitory light exposure on physiology and productivity of *Arabidopsis* plants grown under low light[J]. Journal of Experimental Botany, 2017, 68(15):4249-4262.
- [28] 韦存瑞,杨梅,李婷,等.外源 6-BA 对低温弱光下观光木幼苗抗氧化酶活性和叶绿素荧光的影响[J].农业科技通讯,2023(1):78-81.
- [29] 周庆峰,郭学良,陈庆彬,等.弱光胁迫对马铃薯苗期根系生长及光合特性的影响[C]//中国作物学会马铃薯专业委员会,第二十五届中国马铃薯大会论文集,2024:411-412.
- [30] 钟梦江,代绿叶,韩莹琰.弱光对不同紫叶生菜生物量及光合特性的影响[J].北京农学院学报,2023,38(3):59-64.
- [31] 刘强,杨添博,刘剑锋,等.叶面喷施 6-BA 对盐胁迫下不同种源黑果枸杞幼苗生理指标和光合特性的影响[J].东北林业大学学报,2024,52(9):30-35.
- [32] 刘凯歌,龚繁荣,宋云鹏,等.外源 6-BA 对高温胁迫下甜椒幼苗叶绿素荧光参数和抗氧化酶活性的影响[J].上海农业学报,2020,36(2):19-25.
- [33] 杨晓春,朱宗文,张爱冬,等.外源 6-BA 对镉胁迫下茄子幼苗生长、光合特性和内源激素含量的影响[J].上海农业学报,2017,33(5):17-24.