

低温胁迫下没食子酸丙酯对黄瓜幼苗生理生化特性的影响

高文红¹, 李鹏丽¹, 车寒梅², 赵敏³

(1. 邯郸科技职业学院 河北邯郸 056046; 2. 邯郸市蔬菜技术推广站 河北邯郸 056000;
3. 河北工程大学 河北邯郸 056038)

摘要:为探究没食子酸丙酯(PG)对低温胁迫下黄瓜幼苗抗冷性的影响,以黄瓜津优35为试材,在3叶1心时期,采用1.0、1.5、2.0、2.5 mmol·L⁻¹的PG溶液及去离子水(CK)叶面喷施后进行低温胁迫处理,测定黄瓜幼苗生理生化指标,利用平均隶属函数进行抗冷性强弱评价。结果表明,不同浓度外源PG处理均能提高黄瓜幼苗抗冷性,低温胁迫6 d后,2.0 mmol·L⁻¹ PG溶液预处理效果最佳,与CK相比,相对电导率和丙二醛含量分别显著降低43.81%和42.53%,可溶性糖和叶绿素含量分别显著提高40.76%和57.29%,株高显著增高0.58 cm,其平均隶属函数值为0.93。说明2.0 mmol·L⁻¹的PG预处理对缓解黄瓜幼苗冷害最有效。

关键词:黄瓜;没食子酸丙酯;低温胁迫;生理生化特性

中图分类号:S642.2 文献标志码:A 文章编号:1673-2871(2022)08-070-05

Propyl gallate affects physiological and biochemical characteristics of cucumber seedlings under low temperature stress

GAO Wenhong¹, LI Pengli¹, CHE Hanmei², ZHAO Min³

(1. Handan Vocational College of Science and Technology, Handan 056046, Hebei, China; 2. Handan Vegetable Technology Promotion Station, Handan 056000, Hebei, China; 3. Hebei University of Engineering, Handan 056038, Hebei, China)

Abstract: To explore the effect of propyl gallate (PG) on the chilling tolerance of cucumber seedling under low temperature stress Jinyou 35 was used as test material. Seedlings with three leaves treated with 1.0, 1.5, 2.0, 2.5 mmol·L⁻¹ PG solution and deionized water (CK) on the leaf surface were used for low temperature stress treatment. The physiological and biochemical indexes of cucumber seedling were determined. Chilling tolerance was evaluated by using the average membership function. The results showed that different concentrations of exogenous PG improved chilling tolerance of cucumber seedlings. After 6 days of low temperature stress, the pretreatment effect of 2.0 mmol·L⁻¹ PG solution was the best. Compared with the control, the relative electrical conductivity and malondialdehyde content decreased by 43.81% and 42.53% respectively, the soluble sugar and chlorophyll content increased by 40.76% and 57.29% respectively, and the plant height increased by 0.58 cm, with an average membership function value of 0.93. The 2.0 mmol·L⁻¹ PG pretreatment was most effective to alleviate the chilling injury of cucumber seedlings.

Key words: Cucumber; Propyl gallate; Low temperature stress; Physiological and biochemical characteristics

黄瓜是北方设施栽培主要蔬菜,属冷敏感植物,冬季低温寡照和大幅降温天气给黄瓜生产带来的危害尤为突出。苗期低温使叶片逐渐呈现萎蔫、黄化、干枯等症状,开花期低温则出现植株生长迟滞、花打顶、幼果脱落等现象,不能正常开花结实,导致瓜条不能正常膨大(畸形),黄瓜产量和品质受到严重影响。低温胁迫使植物体内活性氧代谢失

衡,由于活性氧大量产生使膜蛋白和脂类降解,产生有毒物质,膜透性加大,且胁迫程度越严重,细胞O₂⁻产生速率、过氧化氢(H₂O₂)含量、叶片相对电导率和丙二醛(MDA)含量越高^[1],叶绿体解体,细胞超微结构被破坏^[2]。可见,活性氧的清除能力与植物的抗逆性有密切关系。如何克服设施黄瓜低温冷害、保障黄瓜品质是设施栽培黄瓜中亟待解决的问题。

收稿日期:2021-11-28;修回日期:2022-06-15

基金项目:邯郸市科学技术研究与发展计划项目(20312904012);河北省现代农业产业技术体系(HBCT2018030408)

作者简介:高文红,女,副教授,主要从事植物综合利用、植物抗逆生理研究。E-mail:983365153@qq.com

通信作者:赵敏,女,教授,主要从事植物抗逆生理等方面的教学与科研工作。E-mail:917264235@qq.com

研究表明,植物生长调节物质在植物生长发育过程中发挥重要作用,调控植物器官发育和形态建成等多个过程^[1],经过不同程度低温诱导或外源调控物质调控,能够提高植物对低温的适应能力,提高其耐寒性^[2-4]。没食子酸丙酯(propyl gallate, PG)是天然产物没食子酸(3,4,5-三羟基苯甲酸)的重要衍生物,为植物天然多酚化合物,具较高抗氧化活性,可消除自由基,是欧盟认可的食品添加剂^[5],广泛应用于食品和化妆品生产中,是无毒、安全性较高的脱水食品和油脂类抗氧化剂(酚类)^[6],也是经过联合国粮食及农业组织(FAO)和世界贸易组织(WTO)批准使用的优良油脂抗氧化剂^[7]。PG主要应用于油脂的保鲜和抗氧化,显著降低油脂氧化程度。李汉良等^[8]研究表明,没食子酸丙酯具有抑制多酚氧化酶(PPO)活性、延缓梨果实软化、保持果实品质的作用。但关于PG提高黄瓜幼苗抗冷机制的研究鲜见有报道。笔者以津优35黄瓜品种为试验材料,研究低温胁迫下不同浓度PG对黄瓜幼苗生理特性的影响,旨在为筛选提高植物抗冷性的外源物质(无毒副作用)提供新思路,为其在蔬菜栽培生产中应用提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 材 料

试验材料为津优35黄瓜,由天津科润农业股份有限公司黄瓜研究所培育,该品种为早熟、丰产、优质、适应性强的类型。

1.2 方 法

试验于2021年9月15日至10月25日在河北工程大学植物工场进行,选用标准72孔黄瓜育苗穴盘进行黄瓜常规育苗,自然光照,待子叶展平后用酸碱度(pH值)为 6.5 ± 0.1 、可溶性盐浓度(EC值)为 $2.2\sim 2.5\text{ mS}\cdot\text{cm}^{-1}$ 的1/2倍Hoagland营养液浇灌。待幼苗长至3叶1心时,选取生长健壮且长势一致的幼苗移栽于 $10\text{ cm}\times 10\text{ cm}\times 8\text{ cm}$ 的营养钵中,基质为 $V_{\text{果蔬营养土}}:V_{\text{砂壤土}}=1:1$ 。每个营养钵移栽1株苗,转入RTOP-268Y型人工气候箱内培养,光照度为 $300\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,昼/夜为12 h/12 h,昼夜温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}/18\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。培养箱内适应3 d后,分别用浓度为 1.0 、 1.5 、 2.0 、 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的PG均匀喷洒叶片,以药液附于叶面不滴落为宜,每个处理100株,以喷去离子水为对照(CK)。隔2 d再喷1次。诱导处理结束后4 d进行抗冷鉴定,先在 $15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{ }^{\circ}\text{C}$ (昼/夜)预处理2 d,再置于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}/5\text{ }^{\circ}\text{C}$ 低温胁迫6 d。

设5个处理:(1)低温+喷去离子水(CK);(2)低温+喷施 $1.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PG(T1);(3)低温+喷施 $1.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PG(T2);(4)低温+喷施 $2.0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PG(T3);(5)低温+喷施 $2.5\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ PG(T4)。

于低温胁迫后0、2、4、6 d时,随机取样,取幼苗生长点下第3片展开真叶测定生理指标,6 d时测定植株形态指标,每次选10株,3次重复。

1.3 测定方法

参照崔庆等^[9]的方法测定植物形态指标;参照赵世杰等^[10]的方法测定相对电导率,相对电导率/ $\%=(\text{初电导率}-\text{空白电导率})/(\text{终电导率}-\text{空白电导率})\times 100$;采用ABT比色法测定MDA含量;采用蒽酮比色法测定可溶性糖含量;采用比色法($V_{\text{乙醇}}:V_{\text{丙酮}}=1:1$)测定叶绿素(a+b)含量^[11]。

1.4 数据统计与分析

利用SPSS Statistic 19.0软件对数据进行统计分析,采用Duncan's检验进行方差分析,采用Excel 2019作图。

1.5 抗冷性指标综合分析

应用模糊数学隶属函数值法对黄瓜幼苗抗冷性指标的综合分析^[12]。隶属函数值计算方法如下:

指标与抗逆呈正相关: $U(X_a)=(X_a-X_{\min})/(X_{\max}-X_{\min})$;

指标与抗逆呈负相关: $U(X_a)=(X_{\max}-X_a)/(X_{\max}-X_{\min})$;

$U(X_a)$ 为各处理各指标的具体隶属值; X_a 为各处理某指标测定值; X_{\max} 为所有处理某一指标测定值中的最大值; X_{\min} 为所有处理中某一指标测定值中的最小值;根据各处理隶属函数平均值大小确定其抗冷性强弱,隶属函数平均值越大抗冷性越强,反之则抗冷性越弱。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫下PG处理对黄瓜幼苗形态指标及生物量的影响

由表1可知,低温胁迫6 d后,在各处理中,T3处理各形态指标及生物量均为最大,T3处理幼苗株高显著高于其他处理;T3处理茎粗、地上鲜质量、地下干质量均与T2、T4处理无显著差异,均显著高于CK、T1处理;T3处理地上干质量与T4处理无显著差异,但与其他处理差异显著。T1、T2、T4各处理间株高、茎粗、地上鲜质量、地上干质量、地下干质量均无显著差异;5个处理间地下鲜质量均无显著差异。表明在低温胁迫下,适宜浓度的PG处理在

表1 PG处理6d对黄瓜幼苗形态指标及生物量的影响

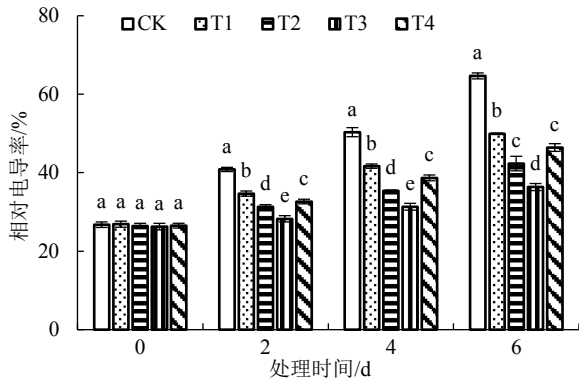
处理	株高/cm	茎粗/mm	地上鲜质量/(g·株 ⁻¹)	地下鲜质量/(g·株 ⁻¹)	地上干质量/(g·株 ⁻¹)	地下干质量/(g·株 ⁻¹)
CK	9.95±0.10 c	2.64±0.06 c	2.28±0.04 b	0.28±0.02 a	0.24±0.004 c	0.02±0.002 c
T1	10.14±0.16 bc	2.72±0.03 b	2.29±0.02 b	0.28±0.02 a	0.25±0.005 bc	0.02±0.003 bc
T2	10.24±0.06 b	2.75±0.03 ab	2.32±0.03 ab	0.29±0.01 a	0.25±0.004 bc	0.03±0.002 abc
T3	10.53±0.08 a	2.80±0.03 a	2.37±0.01 a	0.32±0.02 a	0.26±0.004 a	0.03±0.003 a
T4	10.25±0.06 b	2.77±0.03 ab	2.31±0.04 ab	0.31±0.01 a	0.25±0.005 ab	0.03±0.001 ab

注:同列数字后不同小写字母表示在0.05水平差异显著。下同。

一定程度上缓解了低温对黄瓜幼苗生长的伤害。

2.2 低温胁迫下PG处理对黄瓜叶片相对电导率的影响

由图1可知,随着胁迫时间的延长(0~6 d),各处理叶片相对电导率均呈逐渐上升的趋势。CK叶片生物膜受伤害严重,相对电导率始终处于高位,胁迫6 d后,CK电导率比胁迫前提高141.76%,但PG各处理电导率比胁迫前增加缓慢,分别提高了85.79%、60.22%、38.39%、75.10%。胁迫2 d后,PG不同浓度处理电导率均显著低于CK, T3处理相对电导率均显著低于PG其他浓度处理。胁迫6 d后,与CK相比,PG不同浓度处理电导率分别降低22.78%、34.50%、43.81%、28.22%,表明适宜浓度的PG处理能缓解低温对幼苗的伤害。



注:不同小写字母表示同一处理时间下不同处理在0.05水平差异显著。下同。

图1 低温胁迫下PG对黄瓜叶片相对电导率的影响

2.3 低温胁迫下PG处理对黄瓜叶片MDA含量的影响

由图2可知,随着低温胁迫时间的延长,各处理MDA含量均呈上升趋势,与相对电导率变化趋势一致。低温胁迫6 d后,经PG各浓度处理后,叶片MDA含量增加缓慢,均显著低于CK处理,比CK分别降低了14.14%、31.45%、42.53%、20.14%,且T3处理叶片MDA含量显著低于其他处理。表明适宜

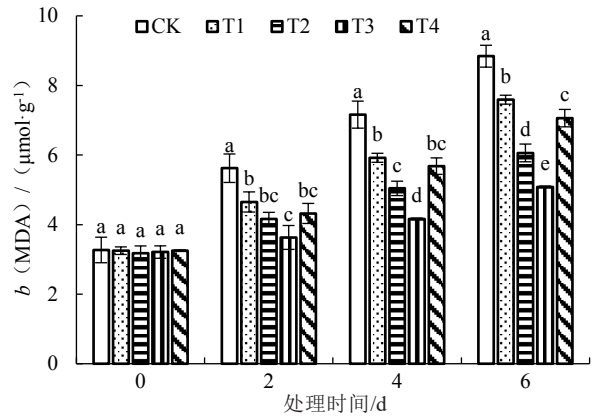


图2 低温胁迫下PG对黄瓜叶片MDA含量的影响

浓度PG诱导,能缓解低温胁迫下膜脂过氧化。

2.4 低温胁迫下PG处理对黄瓜幼苗可溶性糖含量的影响

由图3可知,胁迫后2 d,CK、T1、T2、T3、T4各处理均对低温产生应激反应,细胞可溶性糖含量均有不同程度增加,各处理分别比胁迫前提高19.19%、23.08%、33.74%、37.87%、24.93%。胁迫6 d后,PG各浓度诱导叶片可溶性糖含量比CK提高9.98%、26.65%、40.76%、16.56%,均显著高于CK。其中,T3处理叶片可溶性糖含量显著高于其他浓度PG处理,T4和T1处理之间无显著差异,T2处理显著高于T4和T1处理。可见,适宜浓度的PG处理

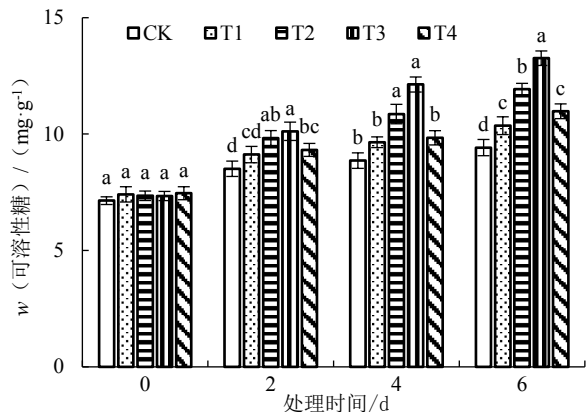


图3 低温胁迫下PG对黄瓜幼苗叶片可溶性糖含量的影响

能够提高细胞的渗透调节能力。

2.5 低温胁迫下 PG 处理对黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

由图 4 可知,低温胁迫期间,CK 和 PG 各处理幼苗叶片叶绿素含量均呈降低趋势,但各处理降低幅度不同。胁迫 2 d 时,T3 处理叶绿素含量显著高于 CK,其他 PG 处理与 CK 差异不显著。CK 叶绿素含量于胁迫 2 d 后呈快速下降趋势。胁迫 6 d 后,PG 各浓度处理叶绿素含量均显著高于 CK,其中,T2 和 T3 处理间差异不显著,但均显著高于其他处理,T3 处理叶绿素含量最高,比 CK 高 57.29%。可见,不同浓度 PG 处理均能延缓叶绿素降解,T3 处理效果最佳,叶绿素含量始终保持较高水平。

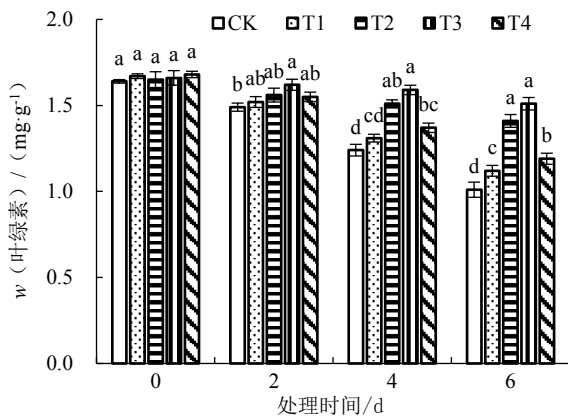


图 4 低温胁迫下 PG 对黄瓜幼苗叶绿素含量的影响

2.6 低温胁迫下 PG 处理对黄瓜幼苗抗冷性指标影响的综合分析

通过隶属函数数值法对低温下不同浓度 PG 处理津优 35 号幼苗的 MDA 含量、电解质渗透率、叶绿素含量、可溶性糖含量进行综合分析,对 4 项指标隶属函数平均值进行比较,隶属函数平均值高表示抗冷性强。由表 2 可知,处理 T3、T2 的 MDA 含量、相对电导率、叶绿素含量、可溶性糖含量隶属函数值均明显高于 CK、T1、T4,处理 T3 的隶属函数平均值明显高于 CK 与其他处理,不同浓度 PG 处理抗冷效果从大到小依次为 T3>T2>T4>T1>CK。

表 2 黄瓜相关指标的隶属函数值

处理	MDA 含量	相对电导率	叶绿素含量	可溶性糖含量	隶属函数平均值
CK	0.00	0.05	0.00	0.00	0.01
T1	0.36	0.37	0.35	0.42	0.36
T2	0.80	0.77	0.59	0.61	0.69
T3	0.92	1.00	0.88	0.91	0.93
T4	0.46	0.63	0.55	0.55	0.56

3 讨论与结论

低温对植物生长发育不利,低温下植物生长受到抑制,正常生长比较困难,地上地下生长缓慢^[13-16];而喷施外源物质后,株高、茎粗、植株鲜质量和干质量均有提高^[15-16]。本试验结果表明,低温胁迫 6 d 后,2.0 mmol·L⁻¹ PG 处理的株高显著高于 CK 和其他 PG 处理,表明在低温胁迫下,适宜浓度的 PG 处理在一定程度上缓解了低温对黄瓜幼苗生长的伤害,有利于黄瓜幼苗生长,与高青海等^[15]、鲍智娟^[16]的研究结果一致;但与曲树栋等^[13]的研究结果不一致,可能是由于低温胁迫后没有经过缓苗阶段,随时间延长,黄瓜幼苗抗冷性会在形态指标及生物量上表现更明显。

在低温胁迫下,酶保护系统活性受到影响,活性氧代谢失衡,膜脂类物质过氧化程度加剧,质膜透性增大^[17],细胞内物质外渗,生物膜相对电导率增加,因此,膜透性的升高是植物低温伤害的重要标志之一^[18]。MDA 是膜脂类物质过氧化终产物,而 MDA 毒害作用又加剧了膜损伤,使蛋白质、核酸等大分子物质交联、聚合,导致酶失活^[19-20],MDA 含量是生物膜脂类物质过氧化程度和植物抗性的重要标志,其含量与低温胁迫程度呈正相关^[21-22]。本试验结果表明,低温胁迫下,与 CK 相比,黄瓜叶片喷施不同浓度 PG 叶片 MDA 含量和相对电导率显著降低,表明 PG 能降低黄瓜叶片膜质过氧化程度,提高植株对低温的耐受能力,与张永吉等^[23]、王国莉等^[24]、姜秀梅等^[25]的研究结果一致,其中以 2.0 mmol·L⁻¹ PG 处理效果最佳。

叶绿素是叶绿体的类囊体膜上重要的光合色素,其含量多少往往决定着光合作用的强弱。而叶绿素对温度反应敏感,不适宜的低温和高温均可导致叶绿素降解^[26],其含量下降越快,冷害症状呈现越早^[27]。前人研究表明,低温可导致叶绿素含量显著下降,叶片失绿,严重时变白,因此,叶绿素含量的变化能反映低温对植物的伤害程度^[28]。本试验结果表明,2.0 mmol·L⁻¹ PG 处理的叶绿素含量在低温胁迫 6 d 后与 1.5 mmol·L⁻¹ PG 处理差异不显著,但均显著高于 CK 及其他处理,与张永吉等^[23]研究结果一致。这表明,低温环境中 PG 处理能延缓叶片叶绿素降解。

可溶性糖具高溶解性,可快速降低细胞水势,有良好的渗透调节物质和防脱水剂,能有效提高细胞的渗透调节能力,增强细胞保水能力,降低冰点,

以提高植物对低温的耐受性^[27],在植物遭受逆境胁迫时发挥重要作用,且含量与多数植物的抗逆性呈正相关^[29]。本试验结果表明,低温胁迫期间,各浓度PG处理后可溶性糖含量均高于对照,与张永吉等^[23]的研究结果一致;低温胁迫后6 d,2.0 mmol·L⁻¹ PG处理的可溶性糖含量比CK显著提高40.76%,表明适宜浓度的PG处理可增加叶片可溶性糖含量,降低细胞渗透势,维持蛋白质结构的完整性和功能,从而增强黄瓜抗冷性。

隶属函数法是在测定多个指标情况下对植物抗性评价的有效方法,能消除个别指标的片面性,且隶属函数值在0~1,指标评价简单,常用于植物抗性评价^[12,30-31]。通过隶属函数法进行综合评价可知,黄瓜幼苗喷施浓度2.0 mmol·L⁻¹PG处理的效果最好。

综上所述,2.0 mmol·L⁻¹PG处理黄瓜幼苗可以缓解低温对黄瓜幼苗的伤害。本试验结果可能与PG本身为多酚化合物且具有显著的抗自由基能力有关,PG进入植物体内参与清除植物体内自由基的过程,延缓了膜脂过氧化。PG其他生理活性及抗冷性机制有待于进一步研究。

参考文献

- [1] 张子幸,常静静,王春霞,等.不同浓度JA处理对西瓜幼苗低温抗性的影响[J].中国瓜菜,2021,34(4):31-35.
- [2] 徐小军,刘海英,梁长志,等.不同类型甜瓜种质SSR遗传多样性及耐冷性评价[J].植物遗传资源学报,2020,21(3):568-578.
- [3] 徐呈祥.提高植物抗寒性的机理研究进展[J].生态学报,2012,32(24):7966-7980.
- [4] 邓江明,简令成.植物抗冻机理研究新进展:抗冻基因表达及其功能[J].植物学通报,2001,18(5):521-530.
- [5] 许晗,罗志军,胡鹏刚,等.五倍子制备没食子酸丙酯的抗氧化活性研究[J].中国酿造,2017,36(5):166-169.
- [6] BEENA P S, BASHEER S M, BHAT S G, et al. Propyl gallate synthesis using acidophilic tannase and simultaneous production of tannase and gallic acid by marine *Aspergillus awamori* BTM-FW032[J]. Applied Biochemistry and Biotechnology, 2011, 164(5):612-628.
- [7] GEORGIEVA R, M OMCHILOVA A, PETKOVA D, et al. Effect of *N*-propyl gallate on lipid peroxidation in heterogenous model membranes[J]. Biotechnology & Biotechnological Equipment, 2013, 27(5):4145-4149.
- [8] 李汉良.没食子酸丙酯对新高梨软化和褐变的影响[J].农产品加工,2011,9:51-53.
- [9] 崔庆,吴春燕,宋述尧,等.外源NO缓解黄瓜幼苗低温伤害的效果[J].江苏农业科学,2022,50(6):116-119.
- [10] 赵世杰,史国安,董新纯.植物生理学实验指导[M].北京:中国农业科学技术出版社,2002.
- [11] 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,2000:164-261.
- [12] 李禄军,蒋志荣,李正平,等.3种抗旱性的综合评价及其抗旱指标的选取[J].水土保持研究,2006,13(6):253-254.
- [13] 曲树栋,冷伟锋,尹武传,等.不同植物生长调节剂对番茄幼苗低温抗冷能力的影响[J].黑龙江农业科学,2019(6):72-75.
- [14] 张凤银,陈禅友,雷刚,等.水杨酸对藜豆幼苗抗冷性生理指标的影响[J].安徽农业科学,2012,40(36):17448-17449.
- [15] 高青海,王亚坤,陆晓民,等.低温弱光下外源褪黑素对黄瓜幼苗生长及抗氧化系统的影响[J].西北植物学报,2014,34(8):1608-1613.
- [16] 鲍智娟.脱落酸和水杨酸处理大豆对其幼苗抗冷性影响的研究[J].白城师范学院学报,2015,29(11):37-42.
- [17] 王以柔.在黑暗和光照条件下低温对水稻幼苗光合器官膜质过氧化作用的影响[J].植物生理学报,1986,12(3):244-251.
- [18] 薛国希,高辉远,李鹏民,等.低温下壳聚糖处理对黄瓜幼苗生理生化特性的影响[J].植物生理与分子生物学报,2004,30(4):441-448.
- [19] 孙巧峰,于贤昌,高俊杰,等.羧甲基壳聚糖对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J].中国农业科学,2004,37(11):1660-1665.
- [20] RIHAN H Z, AL-ISSAWI M, FULLER M P. Advances in physiological and molecular aspects of plant cold tolerance[J]. Journal of Plant Interactions, 2017, 12(1):143-157.
- [21] 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,1991,18(2):141-147.
- [22] 李彩霞,董邵云,薄凯亮,等.黄瓜响应低温胁迫的生理及分子机制研究进展[J].中国蔬菜,2019(5):17-24.
- [23] 张永吉,李爱民,徐中友,等.不同浓度水杨酸对西瓜幼苗抗冷性的诱导效应[J].江苏农业科学,2016,44(3):183-185.
- [24] 王国莉,陈兆贵,张银枚,等.三种植物生长物质对马铃薯低温抗冷性的影响[J].惠州学院学报(自然科学版),2018,38(6):21-28.
- [25] 姜秀梅,秦勇,郭光照,等.外源物质处理对辣椒幼苗抗冷性的影响[J].中国农学通报,2013,29(25):87-92.
- [26] 冯改利.硅和砷木影响嫁接黄瓜抗冷性的生理机制[D].山东泰安:山东农业大学,2020.
- [27] 尹璐璐,于贤昌,王英华,等.5-氨基乙酰丙酸对黄瓜幼苗抗冷性的影响[J].西北农业学报,2007,16(4):166-169.
- [28] KRATSCH H A, WISE R R. The ultrastructure of chilling stress[J]. Plant, Cell & Environment, 2000, 23(4):337-350.
- [29] MORSY M R, JOUVE L, HAUSMAN J F, et al. Alteration of oxidative and carbohydrate metabolism under abiotic stress in two rice (*Oryza sativa* L.) genotypes contrasting in chilling tolerance[J]. Journal of Plant Physiology, 2007, 164(2):157-167.
- [30] 廖博通,陈琳,唐可兰,等.PEG模拟干旱胁迫下辣椒种子萌发特性及抗旱性评价[J].中国瓜菜,2022,35(3):64-69.
- [31] 任小燕,段运平,刘守渠,等.不同玉米品种萌发期和苗期抗旱性鉴定与评价[J].种子,2020(11):75-80.