

低温胁迫对西瓜幼苗生长及叶片膜脂过氧化和多胺代谢的影响

李晓慧, 王慧颖, 康利允, 高宁宁, 赵永, 李海伦, 成晶晶, 常高正, 赵卫星

(河南省农业科学院园艺研究所 郑州 450002)

摘要:为探讨西瓜幼苗叶片对低温胁迫的生理响应机制,以耐低温品种斯维特2号和低温敏感品种金冠为试材,以25℃为CK,分析了5℃低温胁迫下两者幼苗生长、膜脂过氧化和多胺代谢的变化。结果表明,在低温胁迫后,西瓜生物量积累受到了抑制,斯维特2号受抑制的程度显著小于金冠,地下部鲜质量、地下部干质量、地上部鲜质量等生物量下降均不显著;处理8d后,斯维特2号叶片丙二醛(MDA)和过氧化氢(H₂O₂)含量分别较对照增加了42.07%、58.86%,增加幅度低于金冠,其超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)活性分别较对照提高13.18%、29.51%、30.04%,氧化酶系统的激活程度高于金冠;在多胺代谢方面,耐低温品种斯维特2号幼苗叶片精胺(Spm)、亚精胺(Spd)、腐胺(Put)含量维持在较高水平,其中Spm、Spd含量较对照分别提高8.31%、25.84%。综上所述,西瓜幼苗可通过协同调控抗氧化酶活性、膜脂过氧化水平及多胺代谢来响应低温胁迫;与低温敏感品种相比,耐低温品种对低温胁迫的响应更灵敏,能通过显著提高保护酶活性、减轻膜脂过氧化损伤、提高多胺代谢水平,减轻低温对幼苗生长的抑制作用。

关键词:西瓜;低温胁迫;膜脂过氧化;多胺代谢

中图分类号:S651

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2026)07-135-06

Effects of low temperature stress on the growth, leaf membrane lipid peroxidation, and polyamine metabolism of watermelon seedlings

Li Xiaohui, Wang Huiying, Kang Liyun, Gao Ningning, Zhao Yong, Li Hailun, Cheng Jingjing, Chang Gaozheng, Zhao Weixing

(Horticulture Institute, Henan Academy of Agricultural Sciences, Zhengzhou 450002, Henan, China)

Abstract: To explore the physiological response mechanism of watermelon seedling leaves to low-temperature stress, this study used the low-temperature-tolerant cultivar Sweetener No. 2 and the low-temperature-sensitive cultivar Jinguan as experimental materials, and analyzed the changes in seedling growth, membrane lipid peroxidation, and polyamine metabolism under 5℃ low-temperature stress. The results showed that low-temperature stress inhibited the biomass accumulation of watermelon seedlings, but the inhibition degree of Sweetener No. 2 was significantly lower than that of Jinguan. The decreases in belowground fresh mass, belowground dry mass, and aboveground fresh mass in Sweetener No. 2 were not significant. After 8 days of treatment, the content of malondialdehyde (MDA) and hydrogen peroxide (H₂O₂) in the leaves of Sweetener No. 2 increased by 42.07% and 58.86%, respectively, compared with the control, with increases significantly lower than those in Jinguan. Meanwhile, the activity of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD) and catalase (CAT) in Sweetener No. 2 increased by 13.18%, 29.51%, and 30.04%, respectively, compared with the control, indicating a higher activation level of the antioxidant enzyme system than that in Jinguan. In terms of polyamine metabolism, the contents of spermine (Spm), spermidine (Spd) and putrescine (Put) in the seedling leaves of the low-temperature-tolerant cultivar Sweetener No. 2 remained at a high level, among which the content of Spm and Spd increased by 8.31% and 25.84%, respectively, compared with the control. In conclusion, watermelon seedlings respond to low-temperature stress through the synergistic regulation of antioxidant enzyme activities, membrane lipid peroxidation levels, and polyamine metabolism. Compared with low-temperature-sensitive cultivar, the low-temperature-tolerant cultivar exhibits a more sen-

收稿日期:2025-10-27;修回日期:2026-01-21

基金项目:国家西瓜产业技术体系建设项目(CARS-25-2026-Z23);河南省农业科学院基础科研项目(2026J15)

作者简介:李晓慧,女,副研究员,研究方向为西瓜、甜瓜遗传育种与栽培。E-mail:lixiaohui80@126.com

通信作者:赵卫星,男,研究员,研究方向为西瓜、甜瓜遗传育种与栽培。E-mail:Wxzhao2008@163.com

sitive response to low-temperature stress, effectively alleviating the inhibitory effect of low temperature on seedling growth by significantly increasing protective enzyme activity, reducing membrane lipid peroxidation damage, and enhancing polyamine metabolism levels.

Key words: Watermelon; Low-temperature stress; Lipid peroxidation; Polyamine metabolism

我国是世界上西瓜第一生产大国,据FAO统计,2024年全国种植面积约145.20万 hm^2 ,产量6351.04万 $\text{t}^{[1]}$ 。西瓜因具有稳定的市场需求和较高的经济效益,逐渐成为部分地区支撑乡村振兴的重要经济作物。但在早春栽培时期,受大气环流异常影响,频繁出现以持续低温与急剧降温为主的灾害性天气,当持续出现低于 $10\text{ }^{\circ}\text{C}$ 的低温时会造成严重冷害,引起植株生长缓慢,产量和品质下降,严重制约我国北方早春设施西瓜产业的可持续发展。因此,系统揭示西瓜幼苗对低温胁迫的响应机制,对从生理及栽培管理环节提高其耐寒能力具有重要意义。

低温作为非生物胁迫因子,影响植物生长发育,并诱导生理生化及分子响应^[2]。西瓜作为一种喜暖不耐寒的作物,国内外学者对其耐寒性陆续开展了相关研究。倪栋等^[3]研究认为,低温会造成叶绿素降解,气孔导度、蒸腾速率等显著降低,从而抑制西瓜植株生长;贾蓝溪等^[4]研究表明,低温胁迫导致西瓜叶片卷曲、叶柄支撑能力减弱、根系活力和光合速率下降;Lü等^[5]和何洁等^[6]鉴定分析了参与西瓜低温响应的相关转录因子。多胺作为一种广泛分布于植物体内的生长调节物质,在植物对逆境胁迫的应激反应中发挥重要作用^[7],有关多胺代谢与耐低温关系的研究在菜用大豆^[7]、苹果砧木^[8]、建兰^[9]、玉米^[10]等作物上已有报道。目前,尽管国内外学者从形态结构、生理生化和分子水平等方面对西瓜耐低温性开展了较多研究,但有关西瓜内源多胺代谢在响应低温胁迫方面鲜有报道。

笔者选取了不同低温敏感性西瓜品种作为试材,比较分析其幼苗生长、叶片细胞膜脂过氧化程度和多胺代谢对低温胁迫响应的差异,以期探明低温胁迫对西瓜叶片的生理伤害机制及多胺在西瓜耐低温方面所起的作用,为西瓜耐低温品种培育及生产上合理防御低温提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

斯维特2号、金冠分别为耐低温和低温敏感的小果型西瓜品种,均由河南省农业科学院园艺研究所选育,供试材料经前期对现有搜集的西瓜品种

(系)进行耐低温性鉴定获得。

1.2 试验设计

试验于2022年3—6月在河南现代农业研究开发基地(原阳)连栋大棚内育苗。选取饱满度一致的种子,催芽后播于装有基质的营养钵(规格 $7\text{ cm}\times 7\text{ cm}$)中,基质配比为 $V_{\text{蛭石}}:V_{\text{珍珠岩}}=2:1$,营养液选用Hoagland标准配方,根据苗龄大小调整营养液浓度:初期使用 $1/4$ 浓度,随着植株生长逐渐过渡到 $1/2$ 浓度,最后施用完全浓度。待幼苗长至3叶1心时,选取生长势一致的幼苗转移到河南省农业科学院园艺研究所(郑州)人工培养箱中,光照强度 8000 lx ,光周期为 $12/12\text{ h}$,处理低温为 $(5\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$,以 $(25\pm 1)\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为对照,S-T、S-CK分别表示斯维特2号处理和对照;J-T、J-CK分别表示金冠处理和对照;每处理40株,随机区组排列,3次重复。

1.3 测定项目与方法

低温处理后第8天,取幼苗地上部和地下部,称鲜质量;将幼苗地上部和地下部放入 $105\text{ }^{\circ}\text{C}$ 烘箱杀青 15 min 后,再放于 $80\text{ }^{\circ}\text{C}$ 下烘干至恒质量,用分析天平称干质量,每个处理随机选择5株,3次重复。

取自生长点向下数第2片真叶进行多胺类物质含量和膜脂过氧化相关指标的测定,植株处理(0 d)前取样1次,以后每2 d取样1次,共取样5次,每处理3次重复。

采用液相色谱法测定精胺(Spm)、亚精胺(Spd)、腐胺(Put)含量^[11];采用氮蓝四唑光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,采用愈创木酚比色法测定过氧化物酶(POD)活性,采用钼酸铵比色法测定过氧化氢酶(CAT)活性,采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛(MDA)含量^[12];采用分光光度法测定过氧化氢(H_2O_2)含量^[13],在分光光度计下比色。

1.4 数据分析

数据采用Excel 2010处理,采用DPS 7.05进行单因素ANOVA分析,采用Duncan's多重比较法验证组间差异显著性。

2 结果与分析

2.1 低温胁迫对西瓜幼苗生物量的影响

由表1可知,与对照相比,S-T地下部鲜质量、

表1 低温胁迫对西瓜幼苗生物量的影响
Table 1 Effects of low-temperature stress on biomass production in watermelon seedlings

处理 Treat- ment	地下部鲜质量 Underground fresh mass/g	地下部干质量 Underground dry mass/g	地上部鲜质量 Aboveground fresh mass/g	地上部干质量 Aboveground dry mass/g
S-T	0.48 a	0.025 0 a	2.24 a	0.65 b
S-CK	0.53 a	0.029 3 a	2.45 a	0.79 a
J-T	0.47 b	0.019 3 b	2.12 a	0.60 b
J-CK	0.52 a	0.025 0 a	2.34 a	0.77 a

注: 同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

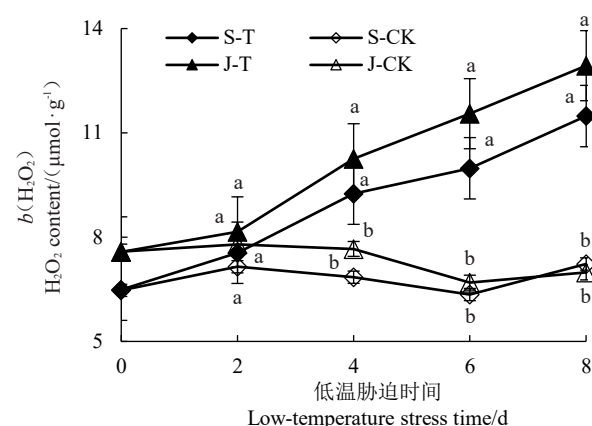
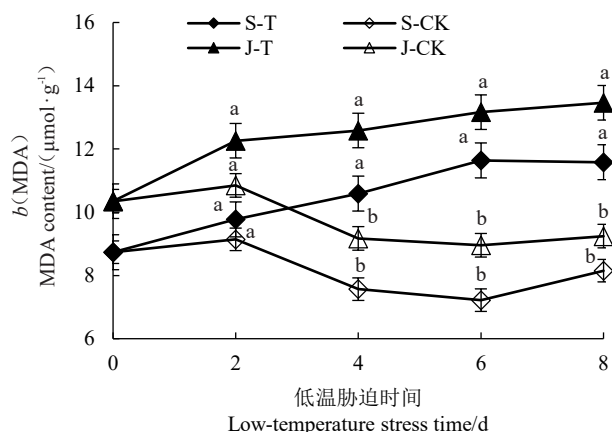
Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

地下部干质量、地上部鲜质量有不同程度下降,与对照差异未达显著水平;地上部干质量下降 17.72%,与 S-CK 差异显著。与对照相比,J-T 地下部鲜质量、干质量和地上部干质量分别下降了 9.62%、22.80%、22.08%,且与 J-CK 差异显著;地上

部鲜质量与对照处理差异未达显著水平。结果表明,低温胁迫下,不同耐受性西瓜生物量均有不同程度降低,耐低温品种生长受抑制的程度较轻,其对低温逆境的适应性强于低温敏感品种。

2.2 低温胁迫对西瓜幼苗叶片 MDA 和 H_2O_2 含量的影响

由图 1 可知,在低温胁迫 2~8 d, S-T 和 J-T 叶片 MDA 和 H_2O_2 含量均高于相应对照。其中, S-T、J-T 叶片 MDA 和 H_2O_2 含量均从第 4 天开始与对照差异达显著水平。从 2 个品种叶片 MDA 和 H_2O_2 含量对低温胁迫响应的差异来看,从胁迫后第 2 天开始, S-T 叶片 MDA 和 H_2O_2 含量变化幅度整体上低于 J-T,在处理第 8 天时, S-T 叶片 MDA 和 H_2O_2 含量分别比对照增加 42.07%、58.86%, J-T 叶片 MDA 和 H_2O_2 含量分别比对照增加 45.62%、85.21%。结果表明,低温胁迫对西瓜幼苗叶片造成显著伤害,MDA 和 H_2O_2 含量显著增加,耐低温品种



注: 不同小写字母表示同一品种不同处理之间在同一时间在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different treatments of the same variety at 0.05 level at the same time. The same below.

图1 低温胁迫对西瓜幼苗叶片 MDA 和 H_2O_2 含量的影响
Fig. 1 Effects of low-temperature stress on MDA and H_2O_2 contents in leaves of watermelon seedlings

增加幅度低于低温敏感品种。

2.3 低温胁迫对西瓜幼苗叶片抗氧化酶活性的影响

由图 2 可知,在低温胁迫 2~8 d, 叶片 SOD、POD、CAT 酶活性均高于对照,其中, SOD 酶活性从第 6 天开始与对照差异达显著水平, POD、CAT 活性从第 4 天开始与对照差异达显著水平;从 2 个品种抗氧化酶活性对低温胁迫响应的差异来看,从胁迫后第 2 天开始, S-T 叶片的 SOD、POD、CAT 酶活性变化幅度整体高于 J-T,在处理第 8 天时, S-T 叶片的 SOD、POD、CAT 酶活性分别比对照提高

13.18%、29.51%、30.04%, J-T 叶片的 SOD、POD、CAT 酶活性分别比对照提高 9.94%、25.29%、25.31%。结果表明,西瓜幼苗受到低温胁迫后,叶片内 SOD、POD、CAT 酶活性会显著增强,耐低温品种抗氧化酶系统对低温反应较为敏感,其提升幅度较大。

2.4 低温胁迫对西瓜叶片多胺代谢的影响

由图 3 可知,低温胁迫 2~8 d, S-T 和 J-T 叶片 Spm、Spd 含量均高于对照,在处理第 8 天, S-T 叶片 Spm、Spd 含量分别比对照提高 8.31%、25.84%; S-T 叶片 Put 含量显著高于对照, J-T 叶片 Put 含量显著

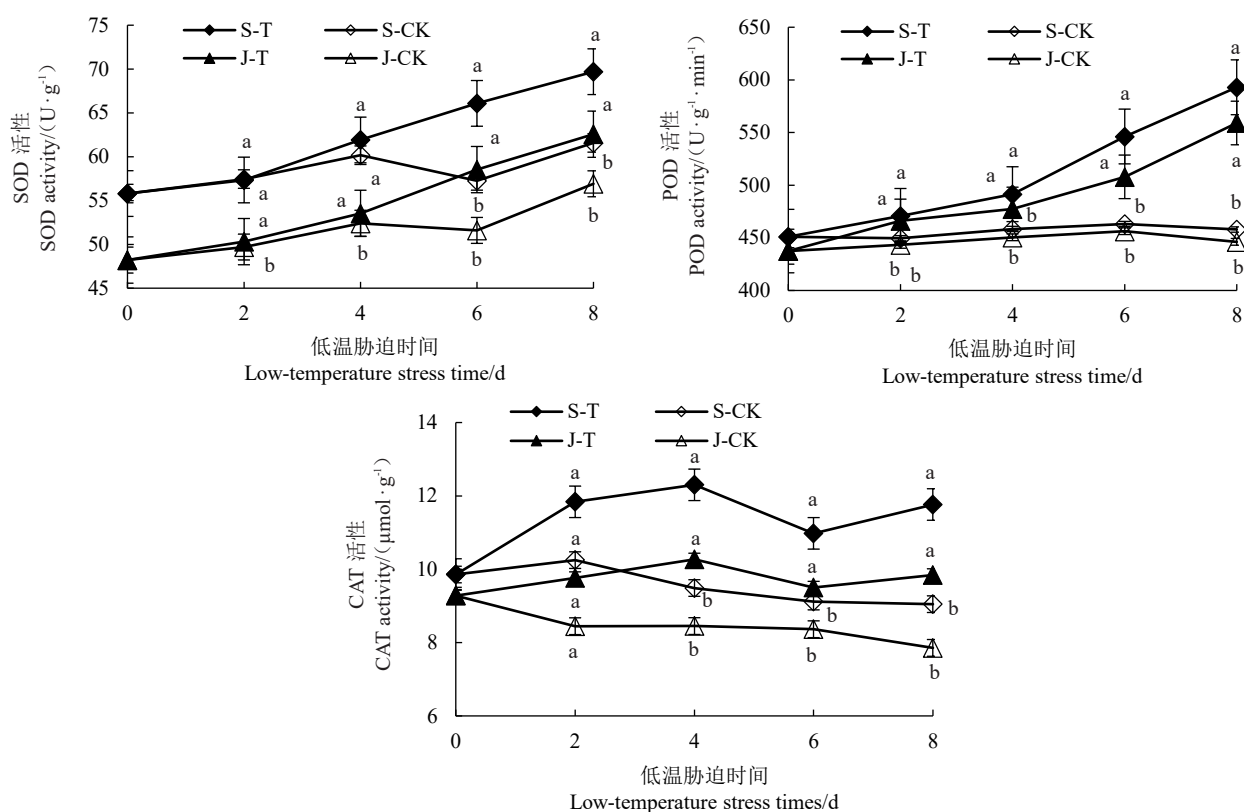


图2 低温胁迫对西瓜幼苗叶片 SOD、POD 和 CAT 活性的影响
Fig. 2 Effects of low-temperature stress on SOD, POD and CAT activities in leaves of watermelon seedlings

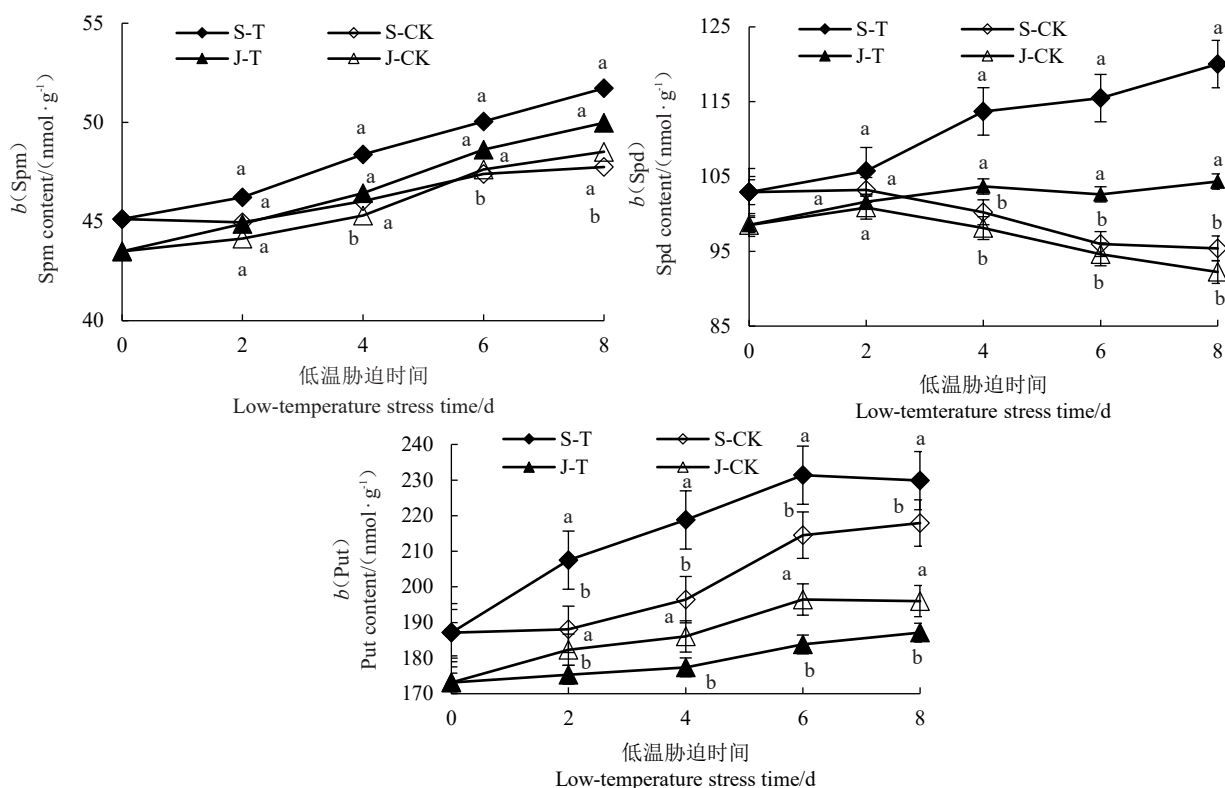


图3 低温胁迫对西瓜幼苗叶片 Spm、Spd 和 Put 含量的影响
Fig. 3 Effects of low-temperature stress on Spm, Spd and Put contents in leaves of watermelon seedlings

降低,在处理第8天,两者变化幅度分别为5.46%、4.52%。结果表明,不同耐受性西瓜通过改变叶片Spm、Spd和Put含量来响应低温胁迫,耐低温品种幼苗叶片多胺代谢对低温反应较为敏感,在低温处理后保持较高的含量。

3 讨论与结论

植物对低温胁迫响应的表型直观体现在生长发育受阻、生物量积累下降。本研究结果表明,在低温胁迫下,2个类型西瓜品种的生物量有不同程度的下降,其中耐低温品种斯维特2号降幅低于低温敏感品种金冠。这与胡俊杰等^[7]对大豆的研究结果一致,可能是低温胁迫干扰了西瓜幼苗的生理代谢功能,从而影响其正常生长发育,耐低温品种对低温胁迫表现出一定耐受性,生物量积累的变化相对较小。

在逆境胁迫条件下,植物体内的自由基代谢失衡,导致膜脂过氧化程度加剧,产生过多的丙二醛(MDA)和过氧化氢(H_2O_2),对细胞膜造成严重损伤^[13]。本研究结果表明,低温逆境胁迫使不同耐低温性品种幼苗叶片丙二醛(MDA)和过氧化氢(H_2O_2)含量增加,但耐低温品种增幅小于低温敏感品种。这与赵杨等^[14]和向丹^[15]对低温逆境胁迫水稻的研究结果一致,这可能与低温敏感品种细胞质膜受低温胁迫损伤较大有关。抗氧化酶是植物体内抵御自由基和氧化应激的核心防御系统,在保护细胞膜伤害方面发挥着重要作用^[16]。低温胁迫后大量活性氧的积累会激发植物自身保护机制,通过提高抗氧化酶活性减缓细胞膜脂过氧化^[17]。在本研究中,低温胁迫后,不同耐受性西瓜叶片SOD、POD、CAT酶活性明显提高,耐低温品种抗氧化酶活性提高幅度较大。这与王小丽等^[18]、刘思彤等^[19]和Amin等^[20]对玉米、甘薯、黄瓜幼苗耐低温的研究结果基本一致,可能是低温胁迫下西瓜植株抗氧化酶基因被诱导激活,促使抗氧化酶系统活性增强,提高了自身的耐低温能力,低温耐受性与抗氧化酶活性呈正相关,这在毛桃桃等^[21]对低温胁迫玉米幼苗的研究中得到了证实;胡俊杰等^[7]对大豆耐低温的研究则认为,低温胁迫降低了叶片CAT酶活性,造成与本研究结果不一致的原因可能与其设置的胁迫温度过低导致细胞损伤有关,而罗军武等^[22]对茶树的研究则认为逆境胁迫引起某些代谢过程加强时,可能会抑制另外的一些代谢途径。植物体内抗氧化酶系统代谢是一个复杂的生理生化过程,与不同植物对逆境环境的

适应性、自身渗透调节、蛋白质合成等密切相关,其具体响应低温胁迫的机制还有待于进一步试验验证。

多胺是一类广泛存在于植物体内、具有强烈生理活性的物质,其积累量与植物抗逆能力有密切关系^[23]。但不同植物Spd、Spm和Put对低温逆境胁迫的响应规律不尽相同^[24]。本研究结果显示,在低温胁迫条件下,不同耐受性西瓜叶片Spm、Spd和Put含量均发生了明显变化,耐低温品种幼苗叶片多胺代谢对低温反应较为敏感,保持较高的多胺含量。这与宋永骏^[25]对多胺调控番茄幼苗耐低温胁迫的研究结果相似,可能与低温胁迫促进在多胺合成过程中起关键作用的精氨酸脱羧酶(ADC)、鸟氨酸脱羧酶(ODC)和S-腺苷蛋氨酸脱羧酶(AMDC)活性有关,这在Kusano等^[26]的研究中得到了证实。相关研究表明,植物在逆境胁迫时通过增加自身多胺含量启动抗氧化系统,从而减少自由基对细胞膜造成的损伤^[27],与本研究低温胁迫下抗氧化酶活性的变化相吻合。本研究结果还表明,斯维特2号叶片Put和Spd含量分别在低温胁迫2、4d时开始显著增加。这与Shen^[28]等和Renaut等^[29]对低温胁迫黄瓜、杨树幼苗多胺的变化规律不尽相同,可能是不同植物自身多胺代谢平衡感受低温胁迫存在差异,也可能与不同植物多胺合成酶对低温响应不同有关。植物在低温驯化过程中除相关多胺合成酶受到影响外,其相关的ZeADC、ZeODC等转录因子的水平会被部分上调^[30]。因此,还需通过转录组和代谢组分析推测多类化合物合成相关基因表达响应低温胁迫的分子机制。

综上所述,在低温胁迫下,供试品种西瓜生物量积累均受到抑制,耐低温品种受抑制程度低,斯维特2号幼苗地下部鲜质量、地下部干质量、地上部鲜质量等生物量下降均不显著,金冠幼苗地下部鲜质量、地下部干质量、地上部干质量分别显著下降9.62%、22.80%、22.08%;西瓜幼苗通过氧化酶活性和膜脂过氧化水平变化、多胺代谢等不同生理调节机制的协同作用提高自身的耐低温能力,处理8d后,斯维特2号叶片MDA和 H_2O_2 含量分别比对照增加了42.07%、58.86%,增加幅度低于金冠,叶片SOD、POD、CAT酶活性分别比对照提高13.18%、29.51%、30.04%,耐低温品种抗氧化酶系统对低温反应较为敏感,酶活性提高幅度较大;耐低温品种幼苗叶片多胺代谢对低温反应较为敏感,处理8d后,斯维特2号叶片Spm、Spd含量分别比

照提高 8.31%、25.84%，保持较高的含量，减轻了低温胁迫对幼苗生长的影响。

参考文献

- [1] 联合国粮食及农业组织. FAOSTAT 数据库 2023[DB/OL]. (2023-12-11)[2026-01-20]. <https://www.fao.org>.
- [2] Vij S, Tyagi A K. Emerging trends in the functional genomics of the abiotic stress response in crop plants[J]. Plant Biotechnology Journal, 2007, 5(3): 361-380.
- [3] 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.
- [4] 贾蓝溪, 郭延亮, 宋希梅, 等. 不同浓度海藻糖处理对西瓜幼苗低温抗性的影响[J]. 中国瓜菜, 2023, 36(8): 27-32.
- [5] Lü X L, Lan S R, Guy K M, et al. Global expressions landscape of NAC transcription factor family and their responses to abiotic stresses in *Citrullus lanatus*[J]. Scientific Reports, 2016 (6): 1-14.
- [6] 何洁, 顾秀容, 魏春华, 等. 西瓜 bHLH 转录因子家族基因的鉴定及其在非生物胁迫下的表达分析[J]. 园艺学报, 2016, 43(2): 281-294.
- [7] 胡俊杰, 张古文, 胡齐赞, 等. 低温胁迫对菜用大豆生长、叶片活性氧及多胺代谢的影响[J]. 浙江农业学报, 2011, 23(6): 113-118.
- [8] 赵玲玲, 宋来庆, 刘志, 等. 低温胁迫下 4 种苹果砧木叶片多胺的变化[J]. 果树学报, 2008, 25(2): 151-156.
- [9] 陈淳, 陈丽璇, 柯合作, 等. 低温胁迫对建兰叶片内源多胺含量的影响[J]. 亚热带植物科学, 2010, 39(2): 1-4.
- [10] 高灿红. 不同耐寒型玉米种子多胺代谢的调控及对抗寒性的效应[D]. 杭州: 浙江大学, 2006.
- [11] 刘俊, 吉晓佳, 刘友良. 检测植物组织中多胺含量的高效液相色谱法[J]. 植物生理学通讯, 2002, 38(6): 596-598.
- [12] 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.
- [13] 钱永强, 孙振元, 韩蕾, 等. 野牛草叶片活性氧及其清除系统对水分胁迫的响应[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1920-1926.
- [14] 赵杨, 魏颖娟, 邹应斌. 低温胁迫下早稻幼苗叶片和根系的生理指标变化及其品种间差异[J]. 核农学报, 2015, 29(4): 792-798.
- [15] 向丹. 水稻苗期低温耐性差异及其调控研究[D]. 北京: 中国农业科学院, 2013.
- [16] 丁能飞, 傅庆林, 刘琛, 等. 盐胁迫对两个大白菜品种抗氧化酶活性及离子吸收的影响[J]. 浙江农业学报, 2008, 20(5): 322-327.
- [17] Yoshiaki U, Naoko U, Haruto S, et al. Impacts of acute ozone stress on superoxide dismutase (SOD) expression and reactive oxygen species (ROS) formation in rice leaves[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2013(70): 396-402.
- [18] 王小丽, 裴玉贺, 郭新梅, 等. 低温胁迫下玉米幼苗的几种生理生化指标的变化[J]. 植物生理学通讯, 2009, 45(5): 487-490.
- [19] 刘思彤, 侯宇, 潘家荃, 等. 甘薯对低温胁迫的生理响应及耐寒性评价[J]. 浙江农业学报, 2025, 37(4): 767-778.
- [20] Amin B, Atif M J, Kandegama W M W W, et al. Low temperature and high humidity affect dynamics of chlorophyll biosynthesis and secondary metabolites in cucumber[J]. BMC Plant Biology, 2024, 24(1): 903.
- [21] 毛桃桃, 赵小强, 柏小栋, 等. 低温胁迫对玉米幼苗光合性能、抗氧化酶系统及相关基因表达的影响[J]. 中国农业科技导报(中英文), 2025, 27(5): 49-60.
- [22] 罗军武, 唐和平, 黄意欢, 等. 茶树不同抗寒性品种间保护酶类活性的差异[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2001, 27(2): 94-96.
- [23] 张润花. 外源多胺对黄瓜幼苗盐胁迫生理响应的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2009.
- [24] 宋永骏, 刁倩楠, 齐红岩. 多胺代谢与植物抗逆性研究进展[J]. 中国蔬菜, 2012(18): 36-42.
- [25] 宋永骏. 多胺在番茄幼苗耐低温胁迫中的调控作用[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2014.
- [26] Kusano T, Yamaguchi K, Berberich T, et al. Advances in polyamine research in 2007[J]. Journal of Plant Research, 2007, 120(3): 345-350.
- [27] Tang W, Newtopn R J. Polyamines reduce salt-induced oxidative damage by increasing the activities of antioxidant enzymes and decreasing lipid peroxidation in Virginia pine[J]. Plant Growth Regulation, 2005, 46(1): 31-43.
- [28] Shen W Y, Nada K, Tacwban S. Involvement of polyamines in the chilling tolerance of cucumber cultivars[J]. Plant Physiology, 2000, 124(1): 431-440.
- [29] Renaut J, Hofmann L, Hausman J H. Biochemical and physiological mechanisms related cold acclimation and enhanced freezing tolerance in poplar plantlets[J]. Physiologia Plantarum, 2005, 125(1): 82-94.
- [30] Zhang X H, Shen L, Li F J, et al. Hot air treatment-induced arginine catabolism is associated with elevated polyamines and proline levels and alleviates chilling injury in postharvest tomato fruit[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2013, 93(13): 3245-3251.