

杜峰,孙玉华,李锦虎,等.褪黑素浸种对低温胁迫下春玉米种子萌发、出苗及其生理代谢的影响[J].江苏农业科学,2024,52(23):65-71.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2024.23.009

# 褪黑素浸种对低温胁迫下春玉米种子萌发、出苗及其生理代谢的影响

杜峰<sup>1</sup>,孙玉华<sup>2</sup>,李锦虎<sup>3</sup>,蹇媛<sup>4</sup>,张玲<sup>5</sup>,杨明凤<sup>1</sup>

(1. 中国气象局乌鲁木齐农业气象试验站,新疆石河子 832000; 2. 新疆莎车县气象局,新疆莎车 844700; 3. 新疆喀什地区伽师县气象局,新疆喀什 844000; 4. 新疆石河子市气象局,新疆石河子 832000; 5. 新疆阿拉尔市气象局,新疆阿拉尔 843300)

**摘要:**在干旱滴灌区研究温度和浸种对春玉米种子萌发和出苗的影响,可为膜下滴灌实现一播全苗、培育壮苗提供理论依据。以新玉 100 玉米种子为试验材料,在室内人工气候培养箱内开展不同浓度褪黑素(melatonin, MT)浸种[0(C0)、50 μmol/L(C1)、100 μmol/L(C3)和 200 μmol/L(C4)]对 2 种温度下[适宜玉米播种的初始温度(12 °C, T1),玉米种子可萌动的最低温度(6 °C, T2)]玉米种子萌发、出苗及生理代谢响应的研究。结果表明,与 T1 处理相比,低温胁迫使相关抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性、渗透调节物质(可溶性糖、可溶性蛋白和脯氨酸)含量以及内源激素(生长素、赤霉素和脱落酸)含量分别降低 10.9%~23.4%、15.9%~36.3%以及 12.9%~21.0%,并使细胞液中的过氧化产物(过氧化氢、丙二醛和超氧阴离子)含量增加 15.6%~22.6%。这些变化导致种子的发芽率、出苗率以及幼苗高度分别显著降低 24.9%、13.2%以及 29.4%,并使出苗时间推迟约 5 d。MT 浸种处理显著改善低温胁迫对种子出苗造成的不利影响,尤其在 C3 处理下效果最优。在低温胁迫条件下,与 C0 处理相比,C3 处理通过提高抗氧化酶活性、增加渗透调节物质和激素含量促进种子吸水萌发和胚根生长,使低温胁迫下的发芽率、出苗率和幼苗高度分别提高 20.3%、12.1%、34.4%,并使出苗时间提前 5 d。因此,在玉米播种前,建议使用 100 μmol/L 的 MT 溶液进行浸种处理,该措施可显著提高种子对低温环境的耐受性,并增加出苗率。

**关键词:**玉米;低温胁迫;褪黑素;种子萌发;出苗;生理代谢

**中图分类号:**S513.01 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2024)23-0065-07

玉米是我国种植面积最大、产量最高的粮食作物,国家统计局的数据显示,我国在 2023 年的玉米种植面积为 0.44 亿 hm<sup>2</sup>,产量为 2.9 亿 t。玉米的高产稳产对我国粮食安全具有重要意义<sup>[1]</sup>。新疆

干旱半干旱地区是我国重要的玉米种植区之一,具有独特的气候条件,特别是春季的低温,对农业生产造成威胁<sup>[2]</sup>。玉米(*Zea mays* L.)作为新疆重要的粮食作物,其生长起始阶段的种子萌发和出苗对温度尤为敏感。在春季播种时,温度的变化直接影响玉米种子活力和幼苗成活率,最终影响产量和品质<sup>[3]</sup>。

种子萌发是植物生命周期中的一个关键阶段,低温可以显著延迟种子萌发过程。玉米种子在低温条件下,代谢活动降低,能量物质的积累和利用

收稿日期:2023-11-13

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金(编号:2021D01B13)。

作者简介:杜峰(1988—),男,新疆石河子人,主要从事农林气象灾害研究。E-mail:1445156819@qq.com。

通信作者:杨明凤,硕士,主要从事农林气象灾害研究。E-mail:490109498@qq.com。

[15]吴思,陶明德,周迎鑫,等.化控对夏玉米产量与茎秆抗倒伏性状的影响[J].江苏农业科学,2023,51(1):91-98.

[16]唐倩.不同密度下化控剂影响玉米抗倒性和产量的生理机制[D].保定:河北农业大学,2023.

[17]袁晓婷,罗凯,刘姗姗,等.化控对玉米带状间作大豆主茎分枝光合特性、物质积累及产量的影响[J].核农学报,2024,38(4):776-784.

[18]赵睿涵,钱建财,张莉,等.作物理想株型研究进展[J].江苏农业科学,2024,52(4):31-40.

[19]邢志鹏,吴培,朱明,等.机械化种植方式对不同品种水稻株型及抗倒伏能力的影响[J].农业工程学报,2017,33(1):52-62.

[20]梁建秋,于晓波,吴海英,等.密度及烯效唑喷施对套作大豆南夏豆 25 抗倒性及产量的影响[J].大豆科学,2017,36(1):33-40.

[21]汪宝卿,张礼凤,慈敦伟,等.黄淮海地区夏大豆农艺性状与产量的多元回归和通径分析[J].大豆科学,2010,29(2):255-259.

效率下降,导致种子萌发速率减缓<sup>[4]</sup>。有研究表明,种子内部激素如赤霉素(GA)和脱落酸(ABA)比例的失衡,是造成低温下萌发迟缓的生理原因之一<sup>[5]</sup>。出苗是种子萌发后的另一个关键阶段。低温不仅影响种子萌发,也会影响幼苗的正常生长。在新疆春季低温环境下,玉米幼苗表现为生长迟缓,生物量减少,叶片发育受阻<sup>[6-7]</sup>。此外,幼苗期根系发育不良将会影响植株对水分和养分的吸收,进一步降低植株的抗逆性。尽管低温对春玉米种子萌发和出苗有不利影响,但玉米会通过一系列生理和分子机制进行适应,包括累积可溶性糖和脯氨酸等渗透调节物质,以提高细胞渗透性;增加过氧化物酶和超氧化物歧化酶等抗氧化酶活性,以稳定细胞膜,保护细胞结构不受冻害。为减轻低温对春玉米种子萌发和出苗的影响,提高作物低温抗性的措施主要包括覆膜种植、种子引发处理以及播期调整等。综合考虑投入成本、操作难易程度等,种子引发处理被认为是一种省时省力、简单易行的抗低温措施<sup>[8-10]</sup>。褪黑素(MT)是一种重要的植物生长调节剂,广泛存在于植物体内,被认为是植物生长发育和繁殖过程中所必需的物质。MT作为一种抗氧化剂,能通过降低细胞膜脂过氧化程度和细胞内的丙二醛(MDA)积累量,降低活性氧对植株的氧化伤害,并增强植物的抗逆能力<sup>[11-13]</sup>。

关于MT提高植物抗逆性及其作用机制的研究在其他作物中较多,但关于其在玉米种子低温引发方面的研究较少,尤其是在低温胁迫下,MT对玉米种子萌发和出苗的影响鲜有报道。因此,本研究选取新疆北部地区广泛种植的玉米品种新玉100为试验材料,通过设置不同浓度的MT浸种处理,研究MT浸种对低温胁迫下春玉米种子萌发、出苗及其内部生理代谢的影响,旨在阐明MT对春玉米种子在低温下萌发和幼苗生长的调节机理,以期为春玉米大田生产中的抗低温措施选择提供参考。

## 1 材料与方 法

### 1.1 试验材料

试验于2021年在中国气象局乌兰乌苏绿洲农田生态与农业气象试验站内的人工气候培养箱内进行。供试玉米种子新玉100由新疆农垦科学院提供,为目前北疆地区广泛栽培使用的饲用玉米品种,具有叶鞘紫色、株型紧凑、叶色绿、节间长、通风透性好等特点。供试的褪黑素( $C_{13}H_{16}N_2O_2$ )试剂购

买自上海麦克林生化科技有限公司,纯度为98%。

### 1.2 试验设计

试验采用盆栽土培法在人工气候箱内进行。土壤为取自中国气象局乌兰乌苏绿洲农田生态与农业气象试验站内0~20 cm耕层的灰漠土,试验地土壤容重为 $1.35\text{ g/cm}^3$ ,0~80 cm土层的平均田间持水量为32%,0~40 cm耕作层的土壤有机质含量为 $18.6\text{ g/kg}$ ,碱解氮含量为 $95.0\text{ mg/kg}$ ,速效磷含量为 $107.5\text{ mg/kg}$ ,速效钾含量为 $298\text{ mg/kg}$ 。将试验用土壤自然晾晒风干后装入花盆中。本试验使用的花盆直径为15 cm,高度为30 cm。试验通过人工气候室设置2个温度水平,即适宜玉米播种的初始温度( $12\text{ }^\circ\text{C}$ ,T1)和玉米种子可萌动的温度( $6\text{ }^\circ\text{C}$ ,T2,在本研究中为低温胁迫处理)<sup>[1]</sup>。使用称重法控制盆内的土壤相对含水量保持在75%左右。在人工气候箱控制温度的基础上设置4个不同浓度MT浸种处理,MT浓度分别为0(C1)、50(C2)、100(C3)、200(C4) $\mu\text{mol/L}$ 。共计8个处理,各处理设置6个重复,其中3个重复用于调查出苗率,另外3个重复用于发芽后取样,测定萌发过程中的生理变化。将种子在不同浓度的MT中避光浸泡12 h后,捞出冲洗2~3遍,于 $25\text{ }^\circ\text{C}$ 的暗室中自然风干至原始含水量,然后播种在上述花盆中,每个花盆中种植10粒种子,喷洒等量的水后置于2个温度不同的人工气候培养箱内进行培养。2个人工气候培养箱除温度不一致外,光照周期(光—暗周期12 h—12 h)、光照度( $7\ 600\text{ lx}$ )和相对湿度(60%)均保持一致。

### 1.3 测定项目及方法

1.3.1 发芽率、发芽势、出苗率及幼苗高度 播种后每天观察玉米出苗情况,记录出苗时间。玉米发芽标准:胚体膨大生出胚根“露白”为萌动,胚根长度与种子相等为发芽。出苗标准:初生根长出3条以上次生根,中胚轴伸长,胚芽鞘顶出地面,第1张真叶长出芽鞘,真叶长2 cm以上<sup>[1]</sup>。根据下列公式分别计算发芽率和出苗率。在每个处理出苗后,使用直尺量取幼苗高度,即幼苗出土面至自然状态下叶片顶端的高度。

发芽率 = (试验时间内发芽种子数/供试种子数) × 100% ;

出苗率 = 试验时间内出苗数量/供试种子数 × 100% 。

1.3.2 抗氧化酶活性测定 待各处理发芽后(当

50%的种子出现胚根长度与种子相等时),对其中3个重复进行破坏性取样,使用蒸馏水将种子表面的泥土洗净并低温(-80℃)保存。使用购买自南京建成生物工程研究所有限公司的植物过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)、超氧化物歧化酶(SOD)试剂盒,按照试剂盒提供的说明书测定抗氧化酶活性。对同一样品使用魏茜雅等的方法<sup>[14]</sup>测定过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子自由基含量。

1.3.3 渗透调节物质含量测定 选择“1.3.2”节中的同一样品,使用考马斯亮蓝法测定可溶性蛋白含量,使用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量,使用蒽酮比色法测定可溶性糖含量<sup>[15]</sup>。

1.3.4 激素含量测定 生长素(IAA)和赤霉素(GA)在种子萌发和出苗时发挥着重要的作用。使用购买自上海酶联生物科技有限公司的植物赤霉素(GA)ELISA试剂盒和植物生长素(IAA)试剂盒,按照试剂盒提供的说明书对测量过抗氧化酶活性和渗透调节物质含量样品的赤霉素含量和生长素含量进行测定。

#### 1.4 统计分析

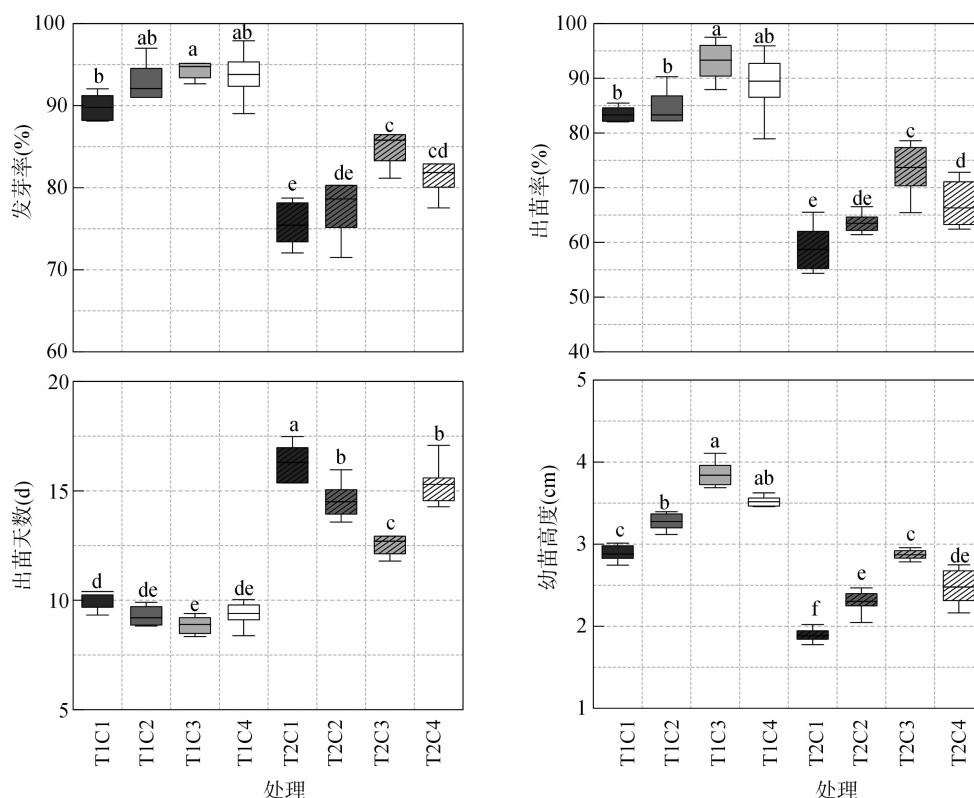
采用 Excel 2016 进行数据整理,SPSS 25.0 对数

据进行 LSD 法差异显著性分析( $\alpha = 0.05$ ),用 Origin 2018 对统计数据绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子萌发和出苗的影响

由图1可知,低温显著降低玉米种子的发芽率、出苗率和幼苗高度,并显著延长出苗天数。与T1处理各温度下的平均值相比,T2处理的发芽率、出苗率和幼苗高度分别平均降低24.9%、13.2%、29.4%,出苗时间提前约5d。不同浓度的MT浸种均可提高发芽率、出苗率和幼苗高度,并缩短出苗时间,其中在C3浓度下效果最明显。在T1处理下,C3处理的发芽率、出苗率和幼苗高度比其他处理分别提高4.0%~12.0%、3.8%~6.9%、8.1%~25.0%。在T2处理下,C3处理的发芽率、出苗率和幼苗高度比其他处理分别提高10.0%~20.3%、6.7%~12.1%、13.7%~34.4%。结果表明,低温会减缓种子出苗、降低出苗率,但MT浸种不仅可以改善低温胁迫对玉米种子萌发和出苗的影响,还缩短出苗时间并提高苗势。



柱上不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。T1表示玉米最适播种温度(12℃);T2表示低温胁迫(6℃);C1表示0 μmol/L褪黑素浸种;C2表示50 μmol/L褪黑素浸种;C3表示100 μmol/L褪黑素浸种;C4表示200 μmol/L褪黑素浸种。下图同

图1 不同浓度MT浸种处理对低温胁迫下玉米种子萌发和出苗的影响

### 2.2 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子膜脂过氧化产物积累的影响

由图 2 可知,低温胁迫增加玉米种子萌发过程中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子含量。与 T1 处理各温度下的平均值相比,T2 处理各温度下种子萌发过程中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子平均含量分别增加 15.6%、22.6%、20.1%。不同浓度的 MT 浸种均可降低种子萌发过程中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子含量,其中在 C3 浓度下效果最明显。在 T1 处理下,C3 处理种子萌发过程中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子含量分别比其他处理降低 5.1%~16.3%、5.6%~15.1%、8.4%~21.7%。在 T2 处理下,C3 处理种子萌发过程中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子含量分别比其他处理降低 4.5%~13.9%、4.4%~16.6%、4.7%~20.0%。结果表明,低温胁迫可增加种子萌发过程中的过氧化产物积累量,导致膜脂过氧化损伤,但通过 MT 浸种可以减轻低温胁迫造成的膜脂过氧化损伤,降低过氧化产物积累量。

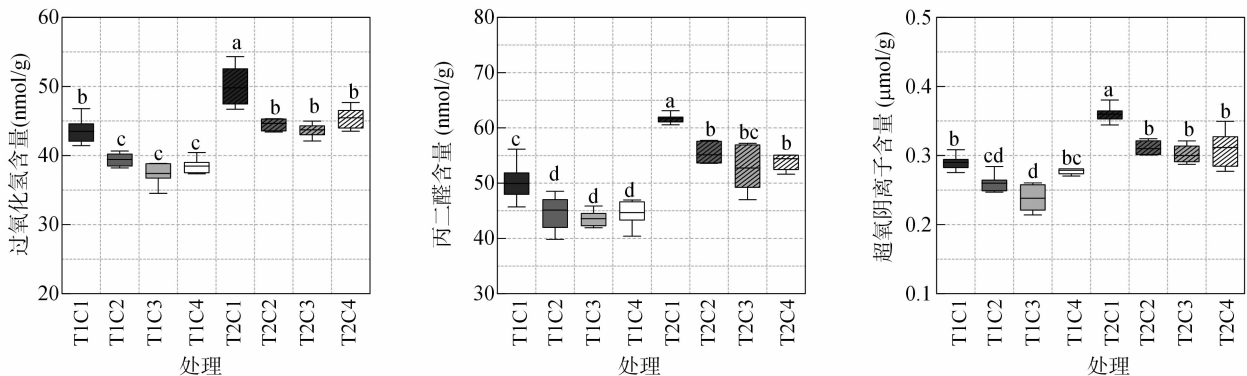


图2 不同浓度MT浸种处理对低温胁迫下玉米种子膜脂过氧化产物含量的影响

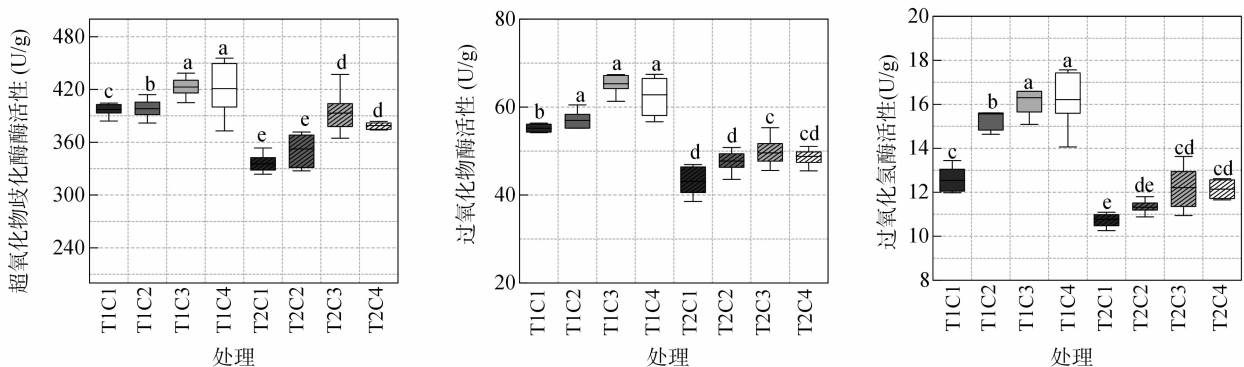


图3 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子抗氧化酶活性的影响

### 2.4 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子渗透调节物质含量的影响

由图 4 可知,低温胁迫降低玉米种子萌发过程中的可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量。与 T1 处

### 2.3 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子抗氧化酶活性的影响

由图 3 可知,低温胁迫降低玉米种子萌发过程中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性。与 T1 处理各温度下的平均值相比,T2 处理下种子中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性分别平均降低 10.9%、21.2%、23.4%。不同浓度的 MT 浸种增加 2 种温度条件下种子中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性,尤其在 C3 浓度下作用最明显。在 T1 处理下,C3 处理种子中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性分别比其他处理增加 1.4%~6.2%、3.9%~15.5%、1.4%~23.1%。在 T2 处理下,C3 处理种子中的超氧化物歧化酶、过氧化物酶、过氧化氢酶活性分别比其他处理增加 3.6%~14.7%、3.9%~13.0%、1.4%~12.0%。结果表明,低温胁迫通过降低抗氧化酶活性,导致膜脂过氧化损伤,而 MT 浸种可以提高抗氧化酶活性,缓解低温胁迫导致的膜脂过氧化损伤。

理各温度下的平均值相比,T2 处理下种子中的可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量分别平均降低 22.5%、15.9%、36.3%。不同浓度的 MT 浸种均可增加 2 种温度条件下种子中的可溶性糖、脯氨酸和

可溶性蛋白含量,总体上在 C3 浓度下效果最明显。在 T1 处理下,C3 处理种子中的可溶性糖、脯氨酸、可溶性蛋白含量分别比其他处理增加了 5.1% ~ 11.7%、1.7% ~ 5.8%、6.0% ~ 16.7%。在 T2 处理下,C3 处理的可溶性糖和可溶性蛋白含量分别比其他处理增加了 9.6% ~ 20.7% 和 8.8% ~ 27.9%,但脯氨酸含量在 C4 处理下最高,比其他处理增加了 2.1% ~ 13.3%。结果表明,低温胁迫可导致种子萌发过程中的渗透调节物质含量降低,增加细胞液外渗的风险,而 MT 浸种可以提高细胞液中的渗透调节物质含量,通过降低渗透势防止细胞液外渗。

## 2.5 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子内源激素含量的影响

由图 5 可知,低温胁迫降低玉米种子萌发过程

中的生长素、赤霉素、脱落酸含量。与 T1 处理各温度下的平均值相比,T2 处理下种子中的生长素、赤霉素和脱落酸含量分别平均降低 17.7%、21.0%、12.9%。在不同浓度的 MT 浸种后,2 种温度条件下种子中的生长素、赤霉素、脱落酸含量均增加,尤其在 C3 浓度下效果最明显。在 T1 处理下,C3 处理种子中的生长素、赤霉素、脱落酸含量分别比其他处理增加 3.1% ~ 7.1%、2.3% ~ 13.5%、1.5% ~ 6.7%。在 T2 处理下,C3 处理种子中的生长素、赤霉素、脱落酸含量分别比其他处理增加 2.1% ~ 18.3%、1.5% ~ 7.0%、2.4% ~ 19.9%。结果表明,低温胁迫可导致种子萌发过程中内源激素含量的降低,减缓种子萌发,而 MT 浸种可以提高种子萌发过程中的激素含量,促进种子萌发和出苗。

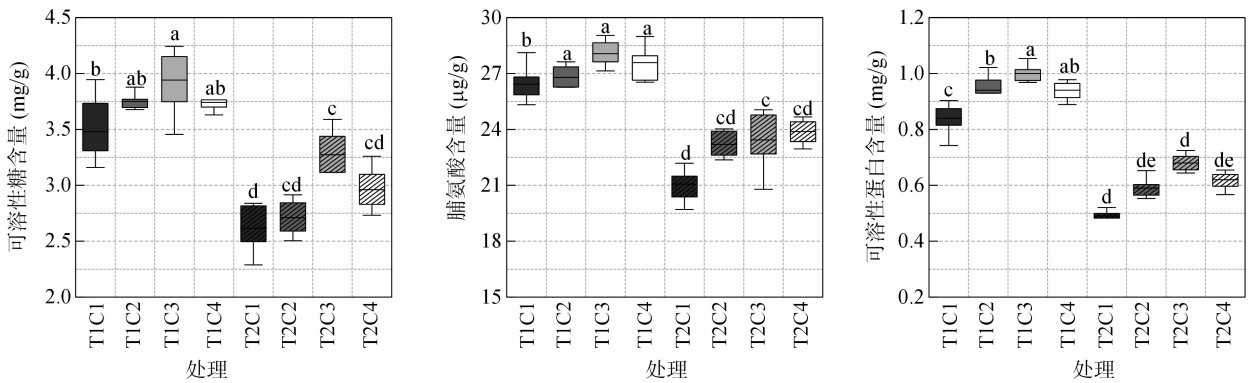


图4 不同浓度MT浸种处理对低温胁迫下玉米种子渗透调节物质含量的影响

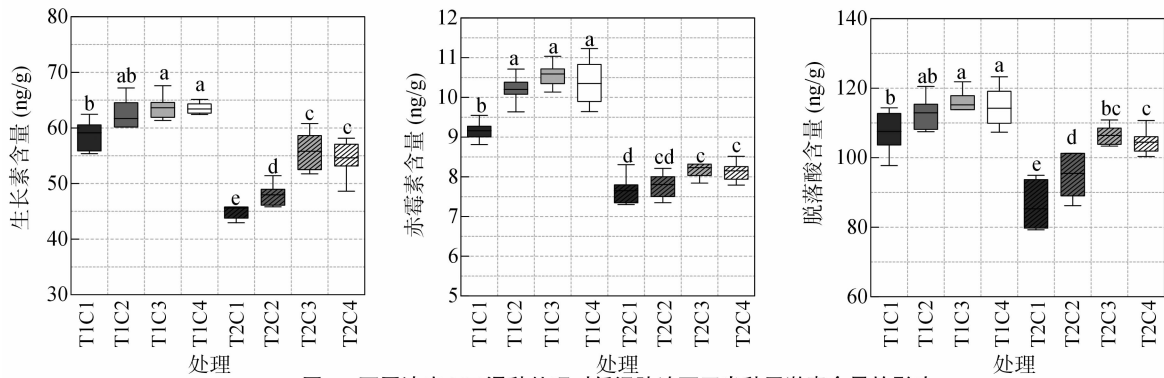


图5 不同浓度 MT 浸种处理对低温胁迫下玉米种子激素含量的影响

## 2.6 指标间的相关性分析

通过探究种子萌发和出苗与自身生理代谢的相关性发现,发芽率、出苗率、幼苗高度、出苗天数与膜脂过氧化产物、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量以及激素含量存在显著相关性(图 6)。其中,发芽率、出苗率、幼苗高度与膜脂过氧化产物呈显著负相关,与抗氧化酶活性、渗透调节物质含量以及激素含量存在显著正相关。但出苗天数与膜脂过氧化产物呈显著正相关,与抗氧化酶活性、渗透

调节物质含量以及激素含量存在显著负相关。结果说明,调控种子萌发和出苗过程中的抗氧化酶活性、渗透调节物质含量以及激素含量对提高发芽率、出苗率以及苗势具有重要作用。

## 3 讨论

发芽率和出苗率是衡量种子出苗情况的重要指标,苗期低温胁迫影响种子正常发芽、出苗率和出苗质量<sup>[16]</sup>。郭宗凯等通过研究不同温度条件下

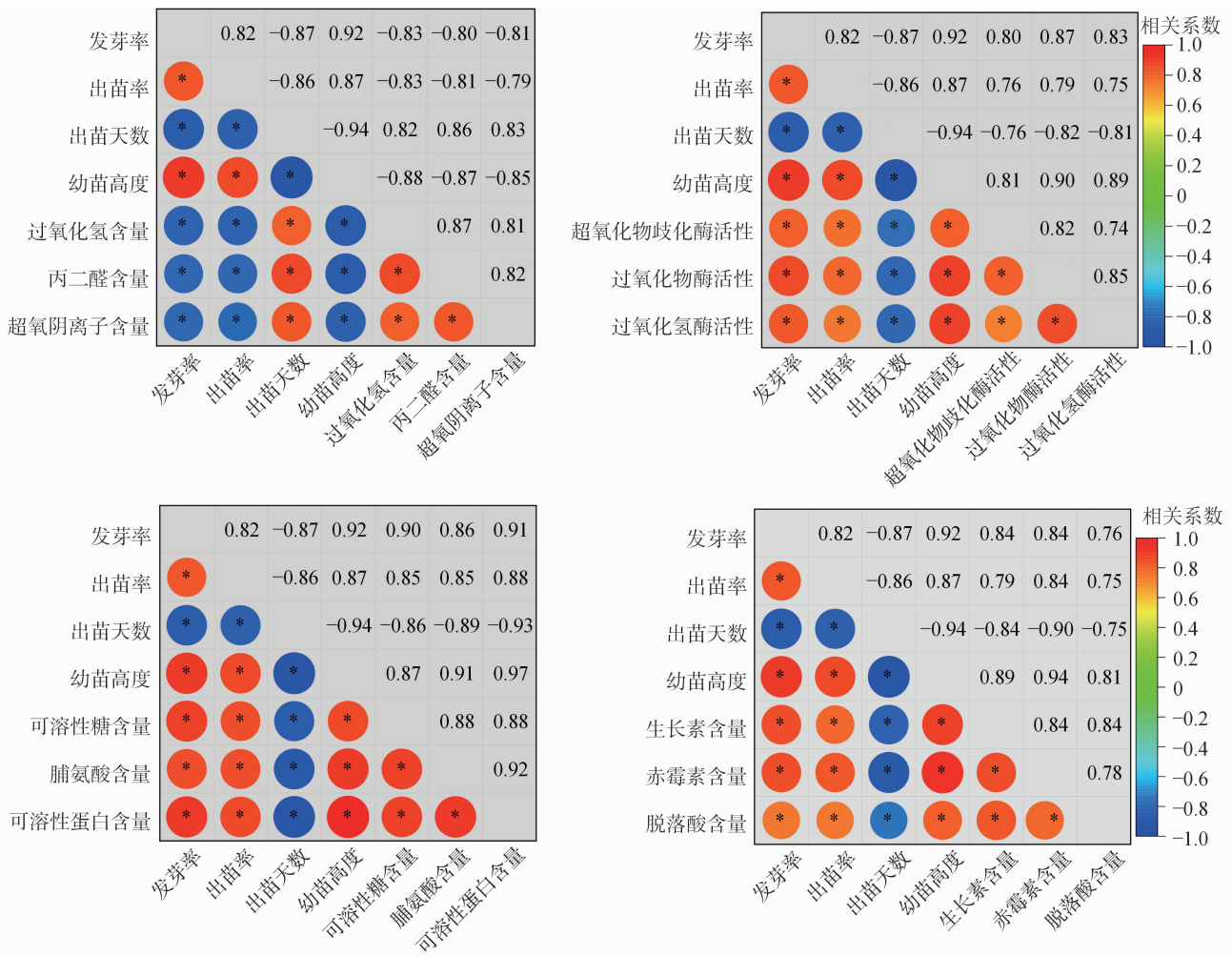


图6 膜脂氧化产物、抗氧化酶活性、渗透调节物质和激素含量与种子萌发和出苗的相关性分析

玉米种子的发芽情况发现,发芽率、出苗率随温度的升高而增加,播种温度越低,出苗率越低<sup>[1]</sup>。梁曦彤等的研究也表明,播种温度低于5℃时,春玉米不能出苗,而播种温度为7~9℃时可以保证89%以上的出苗率<sup>[2]</sup>。本研究发现,在6℃处理下,未经MT处理的(T2C1处理)玉米种子的发芽率和出苗率较T1C1处理(正常温度下未经MT处理)显著降低,说明低温胁迫降低种子的发芽率和出苗率,这与前人的研究结果基本一致。虽然低温胁迫能使75.4%的种子出苗,但会导致出苗后的苗势更弱(幼苗高度显著低于12℃处理)。本研究还发现,MT浸种可提高2种温度条件下玉米种子的发芽率和出苗率,尤其在100 μmol/L的浓度处理下作用更明显,说明MT浸种可降低低温胁迫对种子萌发和出苗的负面影响,这可能是由于MT浸种后可通过调控种子内部的生理代谢,提高种子在萌发和出苗过程中对低温伤害的耐受性<sup>[12,14]</sup>。

前人的研究表明,低温胁迫导致超氧阴离子含

量增加,加速膜脂氧化,使过氧化产物在细胞液中积累,进一步对细胞的正常生理代谢造成不利影响<sup>[6,17-19]</sup>。本研究发现,在6℃的低温胁迫下,未经MT处理的玉米种子萌发过程中的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性均降低,减缓了这些酶对过氧化产物的清除过程,导致细胞液中的过氧化氢、丙二醛、超氧阴离子大量积累。相关性分析结果也表明,在低温胁迫下这些物质的大量积累可能对种子发芽率和出苗率以及幼苗高度造成不利的影响。但MT浸种通过增加种子萌发过程中细胞液中的超氧化物歧化酶、过氧化氢酶、过氧化物酶活性,有效地清除了过氧化产物,使细胞液中的过氧化产物含量明显降低,这与马旭辉等的研究结果<sup>[20]</sup>一致。相关性分析结果也表明,增加抗氧化酶活性对提高发芽率和出苗率具有显著的正向影响。本研究还发现,低温胁迫不仅降低细胞液中的渗透调节物质含量,还降低生长素和赤霉素等内源生长激素含量。渗透调节物质含量的降低造成细胞内

的渗透压升高,不仅增加了种子萌发过程中细胞液外渗的风险,还降低种子的吸水能力。同时,内源激素含量的降低进一步延缓了种子萌发过程中胚根的发育和延伸,不利于种子从土壤中吸收足够的水分进行出苗<sup>[14,21]</sup>。然而,对种子进行MT浸种后,种子萌发过程中的渗透调节物质含量和内源激素含量显著提高,而这些物质含量的增加对发芽率和出苗率具有显著正向促进作用。这表明MT浸种可能通过激发种子萌发过程中的渗透调节和激素调节响应低温胁迫,一方面MT浸种可能通过提高细胞液中的渗透调节物质含量降低渗透势,增加种子的吸收和保水能力,另一方面通过提高种子中的激素含量促进胚根突破种皮向下伸展,形成主根和侧根<sup>[12,14,22]</sup>。这些过程协同改善低温胁迫下玉米种子的发芽和出苗。

综上所述,播期温度过低对玉米出苗率和出苗天数影响较大。因此,在玉米栽培中可通过适当调整播种期来协调温度变化,获得最佳出苗天数,以达到提高玉米出苗率、产量的要求。尽管本研究探讨了播期低温胁迫对玉米种子萌发、出苗以及生理代谢的影响,但随着新品种的选育和引进,最佳的播种温度还需要有更多的品种来综合确定,进而制定北疆不同气候环境地区最适品种种植规划,获得玉米的最佳出苗温度,为玉米最佳播种温度及生产提供可靠的理论依据。

#### 4 结论

低温胁迫加剧玉米种子萌发和出苗过程中的细胞膜脂过氧化程度,并降低细胞液中相关抗氧化酶活性,导致细胞中的过氧化产物积累,对细胞造成毒害作用。另外,低温胁迫还降低细胞液中的渗透调节物质和激素含量,一方面导致种子萌发出苗过程中细胞液渗透压升高,降低种子吸水能力和保水能力;另一方面减缓胚根伸长及主根、侧根分化。褪黑素浸种处理可显著改善低温胁迫对种子造成的不利影响,尤其在浓度为100  $\mu\text{mol/L}$ 的浸种处理下,种子通过提高抗氧化酶活性加速清除过氧化产物,并通过增加渗透调节物质和激素含量促进种子吸水萌发和胚根生长,提高低温胁迫下的发芽率、出苗率和幼苗高度,并缩短出苗时间。因此,在玉米播种前,建议使用100  $\mu\text{mol/L}$ 的褪黑素溶液进行浸种处理,该措施可显著提高种子对低温环境的耐受性,并提高出苗率。

#### 参考文献:

- [1]郭宗凯,林中冠,孙艳云,等. 温度胁迫对玉米种子萌发出苗的影响[J]. 中国农业资源与区划,2020,41(2):147-152.
- [2]梁曦彤,王宏斌,陆至远,等. 低温播种对春玉米出苗及苗期生理参数的影响[J]. 玉米科学,2017,25(2):100-105.
- [3]侯雯,杜卓,张风云,等. 种子处理技术对早播玉米出苗及生理特性的影响[J]. 中国农学通报,2021,37(14):15-20.
- [4]崔正果,曹庆军,胡博,等. 不同引发处理对低温下糯玉米种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 河南农业科学,2022,51(3):47-54.
- [5]左师宇. 脯氨酸提高玉米耐低温胁迫的生理机理研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2022.
- [6]王艳,张瑜,闫晓迪,等. 不同温度处理对卷丹百合芽生理生化指标的影响[J]. 安徽农业科学,2023,51(20):54-56,62.
- [7]徐婷,王俊强,马宝新,等. 不同种衣剂处理对玉米幼苗生长及抗氧化酶活性的影响[J]. 安徽农学通报,2023,29(2):90-93,99.
- [8]杨慧莹,刘玉涛,王宇先,等. 不同包衣制剂对低温胁迫下不同熟期春玉米发芽和出苗的影响[J]. 黑龙江农业科学,2018(12):1-7.
- [9]营立群,张翼飞,杨克军,等. 播种至苗期不同阶段低温对玉米幼苗生长及生理抗性的影响[J]. 作物杂志,2020(6):61-68.
- [10]王洪刚,李丹,李杨. 温度对玉米种子发芽及苗期生长的影响[J]. 黑龙江农业科学,2008(1):37-39.
- [11]左月桃,王子沐,焦健,等. GA<sub>3</sub>浸种对低温下玉米种胚抗氧化酶及内源激素的影响[J]. 生态学杂志,2021,40(5):1340-1346.
- [12]杨然,兴旺,刘大丽,等. 不同浓度褪黑素对甜菜种子的引发影响[J]. 中国农学通报,2022,38(27):19-25.
- [13]洪栋. 褪黑素浸种配施腐秆剂对水稻秸秆还田下油菜生长发育及产量的影响[D]. 合肥:安徽农业大学,2022.
- [14]魏茜雅,秦中维,梁腊梅,等. 褪黑素种子引发处理提高朝天椒耐盐性的作用机制[J]. 生物技术通报,2023,39(7):160-172.
- [15]耿艳秋,李大勇,吴莹,等. 低温胁迫对玉米萌发出苗期生理生化指标的影响[J]. 东北农业科学,2016,41(6):11-15.
- [16]王琪,马树庆,郭建平,等. 温度对玉米生长和产量的影响[J]. 生态学杂志,2009,28(2):255-260.
- [17]张崎峰. 不同浸种剂对玉米抗低温出苗及生长的影响[J]. 黑龙江农业科学,2019(9):64-67.
- [18]李颖超,张翼飞,杨克军,等. 播种至苗期不同阶段冻害与持续时间对玉米幼苗建成及抗性生理的影响[J]. 玉米科学,2022,30(4):73-82.
- [19]吴宇欣,蔡昌杨,唐诗蓓,等. 植物响应低温的生长发育及分子机制研究进展[J]. 江苏农业科学,2023,51(19):1-9.
- [20]马旭辉,陈茹梅,柳小庆,等. 褪黑素对玉米幼苗根系发育和抗旱性的影响[J]. 生物技术通报,2021,37(2):1-14.
- [21]赵光武,孙群,王建华. 药沙引发对超甜玉米种子活力及其生理变化的影响[J]. 作物学报,2006,32(1):147-151.
- [22]许高平,刘秀峰,袁文娅,等. 赤霉素浸种对玉米低温出苗率的影响[J]. 华北农学报,2018,33(4):147-152.