张亚丽,张轶珺,裴红宾,等.15种化控物质浸种对苦荞缓解干旱胁迫的影响[J].山西农业大学学报(自然科学版),2024,44(4):10-23.
Zhang Y L, Zhang Y J, Pei H B, et al.Effects of soaking *Fagopyrum tataricum* seeds in fifteen chemical substances on alleviating drought stress[J].Journal of Shanxi Agricultural University(Natural Science Edition), 2024,44(4):10-23.
doi: 10.13842/j.cnki.issn1671-8151.202401065

15种化控物质浸种对苦荞缓解干旱胁迫的影响

张亚丽[1],张轶珺[2],裴红宾[2*],高振峰[3],杨倩[2]

(1.山西农业大学 资源环境学院,山西 晋中 030801;2.山西师范大学 生命科学学院,山西 太原 030006;
3.山西农业大学 农产品贮藏保鲜研究所,山西 太原 030031)

摘　要:[目的]干旱胁迫是苦荞高产稳产的主要限制因子,本文旨在从15种化控物质中筛选出能提高苦荞抗逆性的物质及浓度,为缓解苦荞干旱胁迫、提升其产量及品质提供理论依据。[方法]以苦荞(*Fagopyrum tataricum* L.)为试验材料,试验设水、化控物质二因素,采用三级嵌套设计水培试验,探究化控物质浸种对苦荞种子萌发的影响,利用主成分分析法鉴选出硫酸锌、甜菜碱进行盆栽试验,分析2种物质浓度浸种对提升苦荞产量的效果。[结果]与正常供水相比,干旱胁迫条件下,苦荞萌发过程中的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、根长、芽长、根鲜重均随着15种化控物质浸种浓度的升高,呈现先增大后减小的趋势,其中以0.8 g•L^{-1}硫酸锌处理下各指标达到最大值,缓解干旱效果最为明显,根冠比则呈现先减小后增大趋势,0.8 g•L^{-1}硫酸锌处理下为最小值。经PCA分析鉴选及计算综合得分对15种物质浸种后苦荞耐旱能力的提升效果进行排序,硫酸锌>甜菜碱>吲哚乙酸>多效唑>氯化钾>水杨酸>亚硒酸钠>氯化钙>葡萄糖>维生素C>聚丙烯酰胺>柠檬酸>赤霉素>过氧化氢>脱落酸,且盆栽模拟干旱试验显示与其它处理相比,0.8 g•L^{-1}硫酸锌可显著提高苦荞花序数、单株粒重、千粒重、产量及籽粒品质。[结论]15种化控物质中,以0.8 g•L^{-1}硫酸锌浸种提高苦荞抗旱能力效果为最佳,且在中度和重度胁迫下可使苦荞产量分别提升98.98%和75.20%,显著增加苦荞籽粒可溶性蛋白、黄酮含量。

关键词:苦荞; 干旱胁迫; 化控物质; 主成分分析
中图分类号:Q418　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1671-8151(2024)04-0010-14

在全球范围内,干旱是影响农作物正常生长发育和产量最为严重的非生物胁迫因素。据统计,我国1.279亿hm^{2}耕地面积中旱地面积约0.643亿hm^2,约占耕地面积的50.3%,因此,提高农作物抗旱能力对我国农业生产的发展和粮食安全至关重要[1-2]。

化学调控是通过喷施外源植物生长调节剂,从而控制植株体内的激素合成、运输及代谢,使作物生长发育得到定向控制的技术手段。因其具有见效快、费用低、操作简便和对环境友好等优点,目前已在农业生产中被广泛用于调节植物抗旱性、控制农艺性状、控倒伏、提升农作物增产和品质等方面[3-4]。另外,为充分发挥化学调控在农作物旱作栽培过程中的应用优势,研究者已从化控物质调控作物光合作用、抗氧化特性、水分蒸散、抗旱基因表达、激素合成及适宜施用方式等方面进行了大量研究[5-7],如:发现L-精氨酸可通过增加干旱条件下玉米植株的光合作用能力,改善植株水分代谢平衡,增强抗氧化系统,维持细胞膜的稳定性,从而增强玉米植株的抗旱性和提高产量[8];多效唑可通过抑制GA的合成和促进ABA的合成提高油菜幼苗抗旱性[9];茉莉酸甲酯可通过提高小麦*AOS*、*AOC*、*OPR1*等基因的表达来提高其抗旱能力[10];茉莉酸甲酯、壳聚糖与多效唑在适宜的配比下可提高香蕉幼苗的抗旱特性[11]。相关研究结果不仅提高了人们对化控物质调节作物抗

收稿日期:2024-01-27　　**修回日期**:2024-06-04
基金项目:山西省科技重大专项计划"揭榜挂帅"项目(202101140601027);山西省现代农业杂粮产业技术体系项目(2023CYJSTX03-16)
作者简介:张亚丽,实验师,研究方向:杂粮栽培,E-mail:862157168@qq.com
*通信作者:裴红宾(ORCID:0009-0001-0272-0760),副教授,研究方向:植物生理生态,E-mail:bbpei65110@163.com

旱性的认识,而且筛选出了甜菜碱、水杨酸、硫酸锌等对多种作物抗旱性提升效果明显的化控物质[12-14],为化学调控在农作物旱作栽培中的应用奠定了坚实基础。

苦荞(*Fagopyrum tataricum* L.)是山西重要的特色杂粮作物,常年种植面积约1.33万hm^2,主要种植于山西北部冷凉气候区,但种植地常为干旱地块或在种植期时常遭遇干旱。出苗率低、出苗整齐度低,很大程度上限制了苦荞的生长发育和产量[15-16],因此,如何提高山西苦荞旱地栽培区出苗率和抗旱性成为促进山西冷凉地区苦荞产量提升的重要途径之一。近年来,为提高山西苦荞旱作产区的播期出苗率、抗旱性和产量,研究者已从鉴选优质抗旱苦荞种质资源、苦荞抗旱基因挖掘、苦荞适宜栽培模式、施用肥料最佳类别及用量等方面进行了大量研究[17-19],并鉴选出了迪庆苦荞、西农9909、奇台农家种、宁夏常规栽培苦荞(宁荞2号)、云南常规栽培苦荞(云荞2号)、山西常规栽培苦荞(R105)、四川常规栽培苦荞(川荞1号-1)、西藏野生苦荞(R217)等抗旱品种,发现*FtRMA1*、*FtPIP13*、*FtDREB6*、*FtERF68*、*FtERF99*、*Ft2OGDD1*和*FtAAD1*等苦荞抗旱相关基因,构建了适宜于半干旱区苦荞增产增效的全膜覆土种植+低量施肥(N 40 kg·hm^{-2}+P_2O_5 30 kg·hm^{-2}+K_2O 20 kg·hm^{-2})的旱作栽培模式,但这些技术的操作方便性和应用成本均明显高于化学调控技术。另外,为提高苦荞抗旱性,国内外研究者还从干旱胁迫下外源物质增强苦荞抗氧化酶系统活性、减少光合作用损伤等方面进行了大量研究[20-22],但可以提高旱作区苦荞种子萌发和产量品质的优选浸种化控物质目前还不明确。

基于上述研究背景,本研究选择了15种在提高不同作物抗旱性方面具有明显效果的化控物质,针对山西苦荞产区因播期降雨量低,干旱时常发生引起的出苗率低的问题,一方面通过种子萌发试验探究其对干旱胁迫下苦荞种子萌发和萌发阶段表型变化的影响,并在此基础上通过主成分分析分析对优选化控物质及使用浓度进行鉴选;另一方面,为进一步验证鉴选结果的可靠性,还通过盆栽模拟干旱试验对优选控制物质及使用浓度下的苦荞种子萌发及成熟期产量品质进行分析,旨在为化控物质在苦荞旱作栽培中的科学使用提供参考依据。

1　材料与方法

1.1　试验材料

供试苦荞品种:'黑丰1号',由山西农业大学作物研究所提供。

供试化控物质:选择目前已在其它作物上报道但尚不明确其对苦荞干旱胁迫缓解特性的8大类15种化控物质为供试药剂,供试化控物质分类、名称、使用浓度、厂家及分类依据详见表1。

1.2　试验方法

1.2.1　15种化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

采用嵌套设计试验,定义1级为15种化控物质,2级为15种化控物质的5个浓度梯度,3级为正常供水及PEG模拟干旱胁迫。以正常供水(田间持水量为65%~75%)为对照1记作CK1,干旱胁迫(渗透势梯度为-0.4 Mpa,持水量为45%~55%的PEG溶液)为对照2记作CK2,每个处理重复3次,共152个处理。

(1)　种子表面消毒、浸种及干旱胁迫处理

选取成熟饱满,大小均一且无病害的种子,用3%过氧化氢消毒10 min,再用蒸馏水冲洗3次,最后用吸水纸吸干附着水分备用,采用直径7 cm的培养皿进行水培试验。在避光条件下,将处理好的种子在各物质浓度、蒸馏水中浸种24 h,取出时表面水分用吸水纸吸干。培养皿中铺上滤纸后需经过高压蒸汽灭菌锅消毒,每个培养皿中均匀放置100粒种子,加入模拟干旱胁迫的渗透势梯度处理液5.5 mL后,放入光照培养箱中。每24 h加3 mL蒸馏水,3 d换1次滤纸,观察7 d并记录指标数据。第8 d开始每3 d补充1/2 Hoagland营养液,直至试验完成。

(2)　不同处理苦荞发芽特性差异调查

参照《国际种子检验规程》[34],每隔1 d统计种子萌发数,于种子发芽第3 d计算发芽势;第7 d计算发芽率、发芽指数、活力指数,第8 d测量胚根、胚芽长度、胚根鲜重、胚芽鲜重,同时计算根冠比。

1.2.2　基于主成分分析的苦荞抗旱化控物质鉴选

通过SPSS 17.0对种子萌发试验数据进行处理,利用R软件进行主成分分析,量化15种化控物质缓解苦荞干旱效果,对15种物质的5个浓度梯度

表1 供试化控物质

Table 1 Chemical substances used in the experiment

类别 Category	代表 Representative	名称 Name	厂家 Manufacturer	分类依据 Classification reference	物质浓度 Substance concentration				
微量元素	Z	硫酸锌/(g·L^{-1})	山东邹平县长山福利化工厂	[23]	Z1(0.2)	Z2(0.4)	Z3(0.8)	Z4(1)	Z5(1.6)
	Y	亚硒酸钠/(mg·L^{-1})	河北玖宇生物科技有限公司	[24]	Y1(0.5)	Y2(2)	Y3(4)	Y4(6)	Y5(8)
生物碱	B	甜菜碱/(mmol·L^{-1})	铭之鑫化工	[25]	B1(5)	B2(10)	B3(20)	B4(30)	B5(40)
植物激素	I	吲哚乙酸/(g·L^{-1})	常州华钰生物科技有限公司	[26]	I1(0.02)	I2(0.04)	I3(0.06)	I4(0.08)	I5(1.00)
	S	水杨酸/(mmol·L^{-1})	淄博市淄川区利民化工厂		S1(0.001)	S2(0.01)	S3(0.05)	S4(0.1)	S5(1)
	A	脱落酸/(g·L^{-1})	张家界恒康生物药业		A1(0.02)	A2(0.04)	A3(0.06)	A4(0.08)	A5(1.00)
	G	赤霉素/(mg·L^{-1})	麦克林试剂		G1(50)	G2(100)	G3(200)	G4(300)	G5(400)
植物生长调节剂	P	多效唑/(mg·L^{-1})	麦克林试剂	[27]	P1(50)	P2(100)	P3(200)	P4(300)	P5(400)
有机酸	N	柠檬酸/%	苏州达江精细化工	[28]	N1(5)	N2(10)	N3(15)	N4(20)	N5(25)
糖类	L	葡萄糖/(mmol·L^{-1})	富润化工	[29]	L1(0.1)	L2(0.5)	L3(1)	L4(1.5)	L5(2)
无机离子	K	氯化钾/(mg·L^{-1})	鼎昊化工	[30]	K1(200)	K2(400)	K3(600)	K4(800)	K5(1000)
	C	氯化钙/(mg·L^{-1})	山东潍坊圣川钙业	[24]	C1(200)	C2(400)	C3(600)	C4(800)	C5(1000)
其它	V	维生素C/(mg·L^{-1})	上海鼓臣生物技术有限公司	[31]	V1(40)	V2(80)	V3(120)	V4(160)	V5(200)
	O	聚丙烯酰胺/%	新奇化工	[32]	O1(0.5)	O2(1)	O3(5)	O4(7)	O5(10)
	H	过氧化氢/%	盖德化工	[33]	H1(0.05)	H2(0.5)	H3(0.1)	H4(0.2)	H5(O.3)

进行排名,筛选出苦荞抗旱最佳化控物质及浓度。

1.2.3 优选化控物质硫酸锌、甜菜碱浸种处理对干旱胁迫下苦荞出苗率及产量的影响

为进一步探明优选物质浸种处理对干旱胁迫下苦荞产量形成的影响及推荐其在生产上应用的较优处理浓度,设计如下盆栽试验:

(1) 盆栽植株、土壤类型及基础肥力

供试苦荞品种为'黑丰1号';供试土壤为黄土母质上发育而成的褐土,有机质含量26.87 g·kg^{-1},全氮含量1.03 g·kg^{-1},有效磷含量23.14 mg·kg^{-1},速效钾含量157.67 mg·kg^{-1}。

(2) 盆栽试验设计

选择经种子萌发试验筛选的较优化控物质硫酸锌和甜菜碱进行浸种处理,2种物质均设置5个浓度梯度,其中硫酸锌浓度梯度为0.2(Z1)、0.4(Z2)、0.8(Z3)、1(Z4)和1.6(Z5) g·L^{-1};甜菜碱浓度梯度为5(B1)、10(B2)、20(B3)、30(B4)、40(B5) mmol·L^{-1};干旱胁迫设置为正常供水(D0)即田间持水量65%~75%、中度胁迫(D1)即田间持水量45%~55%和重度胁迫(D2)即田间持水量25%~35%;硫酸锌与甜菜碱分别与水分梯度进行两因素完全随机试验,均以蒸馏水浸种、3个水分梯度作用下为对照,记作CKD0、CKD1、CKD2,共18个处理,每处理重复3次,共计54盆。

(3) 浸种、干旱胁迫及盆栽管理

采用25 cm×30 cm的聚乙烯塑料盆进行盆栽试验,每盆土14 kg,为保证试验期间幼苗生长不受养分限制,每盆同时施入尿素2.8 g、过磷酸钙4.3 g、氯化钾2.4 g作为底肥。试验开始时,将挑选好的种子用5%次氯酸钠消毒5 min,蒸馏水冲洗4次,吸水纸吸干附着水分备用,将备用的种子放入硫酸锌和甜菜碱各浓度溶液中浸种24 h。于3月30日播种,每盆播种18粒,待第1片真叶完全展开后间苗,每盆留苗6株,期间正常供水,采用称重法保持各处理田间持水量统一为65%~75%。直至3叶1心期开始进行干旱胁迫,且胁迫前4 d停止浇水,同样采用称重法保持各处理所对应田间持水量,直至收获。待苦荞生长至开花期(6月25日)时采用科学计数法统计各处理花序数量,完熟期(9月15日)收获后采用称重法测定不同处理下的苦荞单株粒重、千粒重和产量,苦荞籽粒品质指标蛋白质含量采用考马斯亮蓝法测定[35]、黄酮含量采用$AlCl_3$分光光度法测定[36]。

1.3 数据处理

用SPSS 17.0软件进行数据统计分析,R软件进行主成分分析,Origin 10.0作图。

2　结果与分析

2.1　化控物质浸种对干旱胁迫下种子萌发及表型变化的影响

2.1.1　植物激素类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

正常供水及干旱胁迫下,0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种处理下苦荞种子萌发情况最优,苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均随着植物激素浸种浓度的增加表现出先增加后减小的趋势。正常供水下与CK1相比,0.05 mmol·L^{-1}水杨酸处理下发芽率、发芽势达到最高值,比CK1显著提高了14.81%、40.73%;0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种处理下发芽指数、活力指数最高,比CK1显著提高31.52%,237.80%(P<0.05)。干旱胁迫下与CK2相比,0.05 mmol·L^{-1}水杨酸浸种处理下发芽率、发芽势、发芽指数值最高,比CK2显著增长29.18%、53.97%、44.16%;0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种下苦荞种子活力指数值最高,比CK2显著增加了230.41%(P<0.05)(图1A~图1B)。

2.1.2　微量元素、有机酸、植物生长调节剂对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

3类化控物质浸种后,随着浓度的升高种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数出现先升高后降低趋势。与CK1相比,0.8 g·L^{-1}硫酸锌、4 mg·L^{-1}亚硒酸钠、200 mg·L^{-1}多效唑浸种处理均显著提高苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数(P<0.05)。正常供水及干旱胁迫条件下,0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种后种子萌发4个指标均为最高值,比CK1显著增加20.09%、54.82%、71.14%、342.14%,比CK2显著增加35.40%、75.21%、60.33%、276.21%(图1C~图1D)。

2.1.3　糖类、生物碱、无机离子化控物质对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

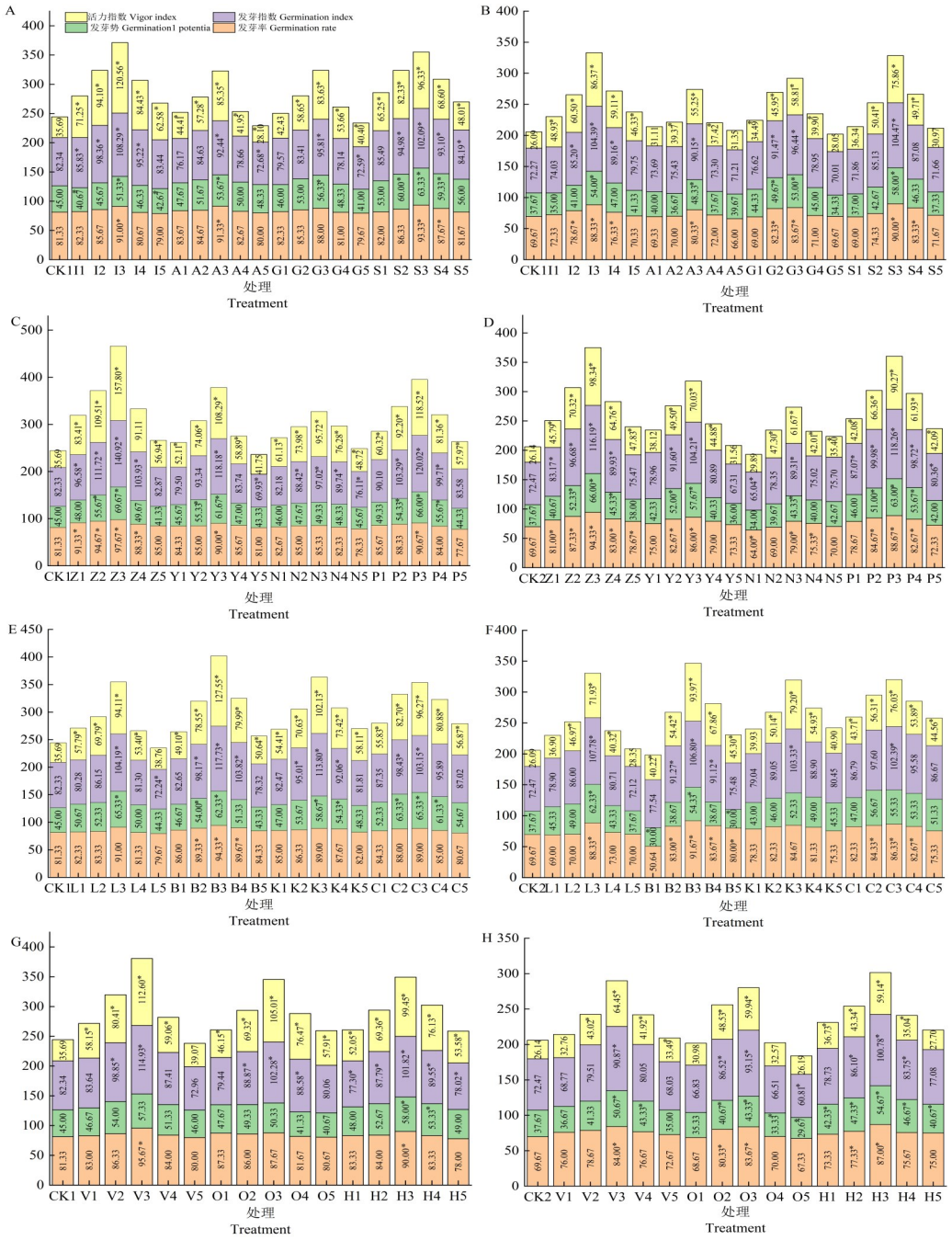
正常供水下,苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均随着化控物质浸种浓度的增加呈现出先增加后减小的趋势。与对照相比,1 mmol·L^{-1}葡萄糖、20 mmol·L^{-1}甜菜碱、600 mg·L^{-1}氯化钙均显著提高苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数(P<0.05)。20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种下,苦荞种子发芽率、发芽指数、活力指数达到最高值,比CK1显著增加15.98%、42.98%、257.38%。1 mmol·L^{-1}葡萄糖浸种下种子发芽势达到峰值,比CK1显著增加45.18%。干旱胁迫下,20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种后种子发芽率、活力指数达到最大值,比CK2显著增加31.58%、259.49%;1 mmol·L^{-1}葡萄糖浸种后种子发芽势、发芽指数达到最大值,比CK2显著增加65.46%、48.72%。葡萄糖、甜菜碱、氯化钾、氯化钙4种化控物质中,20 mmol·L^{-1}甜菜碱和1 mmol·L^{-1}葡萄糖对苦荞种子萌发的促进作用明显(图1E~图1F)。

2.1.4　其它类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

维生素、聚丙烯酰胺、过氧化氢浸种后,苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数均随着浸种浓度的升高出现先升高后降低趋势。与对照相比,120 mg·L^{-1}维生素、0.1%过氧化氢均显著提高苦荞种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数(P<0.05)。120 mg·L^{-1}维生素浸种在正常供水下种子发芽率、发芽指数、活力指数均达到峰值,比CK1显著增加17.63%、39.58%、215.49%;干旱胁迫下活力指数达到最大值,比CK2显著增加146.56%。正常供水下,0.1%过氧化氢浸种下种子发芽势达到峰值,比CK1显著增加28.89%;干旱胁迫下,发芽率、发芽势、发芽指数达到最大值,比CK2显著增加24.87%、45.13%、39.06%。3种物质相比,120 mg·L^{-1}维生素、0.1%过氧化氢在种子萌发过程中促进效果较好(图1G~图1H)。

2.1.5　植物激素类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子表型特征的影响

苦荞根长、芽长、根鲜重均随着植物激素浸种浓度的升高,呈现先升高后降低趋势,根冠比则先降低后升高。与对照相比,200 mg·L^{-1}赤霉素、0.06 g·L^{-1}脱落酸、0.05 mmol·L^{-1}水杨酸、0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种处理下苦荞根长、芽长、根鲜重、根冠比均存在显著性差异(P<0.05)。其中0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种下苦荞萌发效果最佳,干旱胁迫下表现出更强的适应性。0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种下,苦荞根长、芽长、根鲜重达到最高值,比CK1显著增加61.64%、65.36%、113.16%,比CK2显著增加64.15%、114.43%、87.88%。0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸浸种根冠比达到最小值,正常供水及干旱胁迫下均与对照差异显著(P<0.05),正常供水下降幅为18.18%,干旱胁迫下降幅为19.35%(图2A、图2C)。



A:植物激素类化控物质浸种对正常供水下苦荞种子萌发的影响;B:植物激素类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响;C:微量元素、有机酸、植物生长调节剂对正常供水下苦荞种子萌发的影响;D:微量元素、有机酸、植物生长调节剂对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响;E:糖类、生物碱、无机离子化控物质对正常供水下苦荞种子萌发的影响;F:糖类、生物碱、无机离子化控物质对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响;G:其他类化控物质浸种对正常供水下苦荞种子萌发的影响;H:其它类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发的影响

A: Effects of seed soaking in plant hormone chemical control substances on *F. tataricum* seed germination under normal water supply; B: Effects of plant hormone chemical control substances on *F. tataricum* seed germination under drought stress; C: Effects of trace elements, organic acids, and plant growth regulators on *F. tataricum* seed germination under normal water supply. ; D: Effects of trace elements, organic acids and plant growth regulators on *F. tataricum* seed germination under drought stress; E: Effects of sugars, alkaloids, and inorganic ionization control substances on *F. tataricum* seed germination under normal water supply; F: Effects of sugars, alkaloids, and inorganic ionization substances on *F. tataricum* seed germination under drought stress; G: Effects of soaking seeds in other chemical control substances on the germination of *F. tataricum* seeds under normal water supply; H: Effects of seed soaking in other chemicalcontrol substances on *F. tataricum* seed germination under drought stress

图1 化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞种子萌发特性的影响

Fig.1 Effects of seed soaking with chemical substances on seed germination of *F. tataricum* under drought stress

2.1.6　微量元素、有机酸、植物生长调节剂对干旱胁迫下苦荞种子表型特征的影响

与对照相比,硫酸锌(0.4、0.8 g·L^{-1})、亚硒酸钠(4、6 mg·L^{-1})、柠檬酸(10%、15%)、多效唑(100、200、300 mg·L^{-1})浸种均显著提高苦荞根长、芽长、根鲜重,显著降低苦荞根冠比($P<0.05$)。0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种下苦荞根长、芽长、根鲜重均达到峰值,比CK1显著增加61.13%、65.17%、128.95%,比CK2显著增加57.75%、126.89%、78.79%;根冠比降低到最小值,比CK1显著降低23.86%;比CK2显著降低25.81%。微量元素、有机酸、植物生长调节剂中,0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种效果最佳,显著促进种子萌发,增强苦荞抗逆性(图2A、图2C)。

2.1.7　糖类、生物碱、无机离子化控物质对干旱胁迫下苦荞种子表型特征的影响

与对照相比,1 mmol·L^{-1}葡萄糖、甜菜碱(5、10、20、30、40 mmol·L^{-1})、氯化钾(400、600、800 mg·L^{-1})、氯化钙(400、600 mg·L^{-1})浸种处理均显著提高苦荞种子根长、芽长、根鲜重,显著降低苦荞根冠比($P<0.05$)。20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种后,正常供水下苦荞根长、芽长、根鲜重达到峰值,比CK1显著增加了59.59%、65.17%、94.74%;干旱胁迫下根长、根鲜重达到峰值,比CK2显著增加了55.23%、84.85%。在干旱胁迫下,600 mg·L^{-1}氯化钾浸种后芽长达到最高值,比CK2显著增加了113.77%。20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种后,在正常供水及干旱胁迫下,苦荞根冠比降到最低值,正常供水下降幅22.73%,干旱胁迫下降幅24.73%。相比之下,20 mmol·L^{-1}甜菜碱促进苦荞种子萌发效果最优(图2B、图2D)。

2.1.8　其它类化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞萌发种子表型特征的影响

与对照相比,120 mg·L^{-1}维生素、5%聚丙烯酰胺、0.1%过氧化氢均显著提高苦荞种子根长、芽长、根鲜重,均显著降低苦荞根冠比($P<0.05$)。5%聚丙烯酰胺浸种后,正常供水下显著促进了苦荞的根长、芽长、根鲜重,比CK1显著增加59.42%、64.38%、105.26%。干旱胁迫下显著促进根长、芽长,比CK2显著增加41.67%、110.82%。120 mg·L^{-1}维生素浸种后,干旱胁迫下种子根鲜重达到峰值,比CK2差异增加57.58%;正常供水及干旱胁迫下根冠比达到最小值,正常供水下比CK1降低19.32%,干旱胁迫下比CK2降低25.51%(图2B、图2D)。

根据15种化控物质浸种对苦荞种子萌发的影响进行综合比较,与正常供水相比,干旱胁迫下0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种处理对提高苦荞种子发芽率、发芽势、活力指数效果最佳,其次为20 mmol·L^{-1}甜菜碱,200 mg·L^{-1}多效唑提高苦荞种子发芽指数的效果要优于硫酸锌。干旱胁迫下对苦荞种子形态指标影响较大的物质为0.8 g·L^{-1}硫酸锌、0.06 g·L^{-1}吲哚乙酸,其中吲哚乙酸对苦荞根长、芽长影响最大,硫酸锌对苦荞根鲜重、根冠比影响最大。

2.2　基于主成分分析的苦荞浸种处理较优化控物质筛选

为综合评价15种化控物质浸种对苦荞干旱胁迫的缓解效应,采用主成分分析,通过可视化与量化的手段来筛选出较优化控物质及浓度。KMO值为0.842(大于0.6),Bartlett's检验$P<0.001$,表明主成分分析适用于本试验,提取了特征值大于1的2个主成分,累积贡献率占总方差90.2%,2个主成分对总信息的解释度达到90.2%,能够作为评价化控物质缓解苦荞干旱胁迫效应的依据。PC1正相关于发芽势、发芽率、发芽指数、活力指数、根长、芽长、根鲜重,负相关于根冠比。PC2正相关于根长、芽长、根鲜重、根冠比,负相关于发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数。表明主成分1可综合反映苦荞种子萌发情况,主成分2则主要反映苦荞幼苗种子形态指标。

通过主成分分析可得到8个指标对应的因子得分系数,可以计算出每个主成分因子得分,其得分表达式为:

$$F1=0.348X1+0.310X2+0.370X3+0.395X4+0.341X5+0.348X6+0.359X7-0.352X8$$

$$F2=-0.258X1-0.546X2-0.318X3-0.012X4+0.434X5+0.403X6+0.316X7+0.057X8$$

以主成分贡献率为权重,构建综合评价得分函数:$F=0.773F1+0.129F2$。根据综合评价得分函数,可计算出15种化控物质缓解苦荞干旱的综合得分及其排序,F值越大,表明该物质浓度的缓解作用最好。由表2对15种化控物质缓解苦荞干旱胁迫效果进行排序:硫酸锌(Z3:0.8 g·L^{-1})>

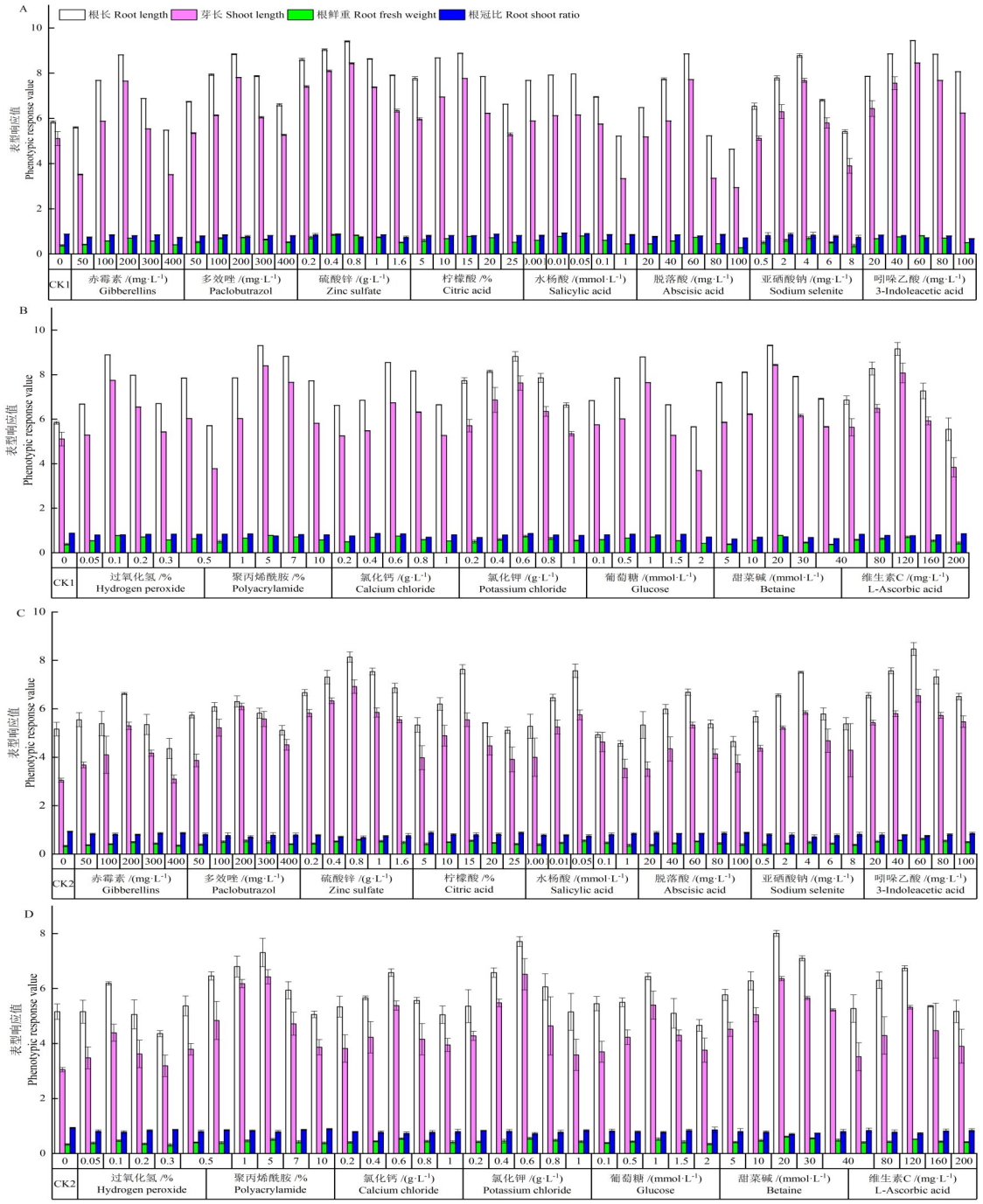


图2 不同浓度化控物质对正常供水(A、B)和干旱胁迫(C、D)下苦荞芽苗生长表型的影响

Fig.2 The effects of different concentrations of chemical substances on the growth phenotype of *F. tataricum* seedlings under normal water supply (A, B) and drought stress (C, D)

甜菜碱(B3:20 mmol·L^{-1})>吲哚乙酸(I3:0.06 g·L^{-1})>多效唑(P3:200 mg·L^{-1})>氯化钾(K3:600 mg·L^{-1})>水杨酸(S3:0.05 mmol·L^{-1})>亚硒酸钠(Y3:4 mg·L^{-1})>氯化钙(C3:600 mg·L^{-1})>葡萄糖(L3:1 mmol·L^{-1})>维生素C(V3:120 mg·L^{-1})>聚丙烯酰胺(O3:5%)>柠檬酸(N3:15%)>赤霉素(G3:200 mg·L^{-1})>过氧化氢(H3:0.1%)>脱落酸(A3:0.06 g·L^{-1})。

根据15种化控物质浸种对苦荞种子萌发特性的影响可知,硫酸锌(Z3:0.8 g·L^{-1})、甜菜碱(B3:20 mmol·L^{-1})效果较优;依据对苦荞种子表型的影响可知,硫酸锌(Z3:0.8 g·L^{-1})、吲哚乙酸(I3:0.06 g·L^{-1})效果最优。与综合评价结果相结合,可

知硫酸锌、甜菜碱在缓解苦荞干旱胁迫方面优势更明显,可选用这2种化控物质后续展开对苦荞苗期及产量的影响,进行更加深入的研究。

2.3　硫酸锌、甜菜碱2种优选化控物质浸种处理对苦荞产量的影响

由表3、表4可见,在相同浸种浓度下,随着干

表2　综合评价得分

Table 2　Comprehensive evaluation score

物质代表 Material representation	主成分得分 Principal component score		综合得分 Composite score	排名 Ranking	物质代表 Material representation	主成分得分 Principal component score		综合得分 Composite score	排名 Ranking
	主成分1 F1	主成分2 F2				主成分1 F1	主成分2 F2		
Z1	0.54	0.81	0.52	30	S4	−0.05	−0.89	−0.15	36
Z2	3.69	0.27	2.88	7	S5	−3.13	−0.53	−2.48	69
Z3	6.83	−0.50	5.21	1	N1	−1.95	−0.64	−1.59	70
Z4	2.61	1.06	2.16	11	N2	−0.61	−0.67	−0.55	38
Z5	0.53	1.44	0.59	29	N3	3.40	−1.46	2.44	16
Y1	−2.62	1.68	−1.81	50	N4	−1.55	−0.38	−1.24	47
Y2	0.79	0.34	0.65	23	N5	−3.38	−0.44	−2.67	65
Y3	5.64	0.45	4.42	8	L1	−1.99	−0.82	−1.64	57
Y4	2.37	1.27	2.00	37	L2	−0.86	−1.18	−0.82	41
Y5	−0.31	1.72	−0.02	63	L3	1.66	−1.52	1.09	10
B1	−0.82	−0.99	−0.76	64	L4	−1.97	−1.41	−1.70	51
B2	2.17	−0.64	1.60	25	L5	−3.45	−1.45	−2.86	72
B3	4.95	−1.54	3.63	2	K1	−2.21	−0.51	−1.78	49
B4	1.90	−0.76	1.37	12	K2	−0.29	−1.44	−0.41	25
B5	−1.20	−0.27	−0.96	34	K3	1.81	−0.42	1.35	5
I1	−1.30	−0.21	−1.04	33	K4	−1.69	−0.25	−1.34	28
I2	1.06	−0.55	0.75	15	K5	−3.97	−0.50	−3.13	53
I3	3.73	−0.55	2.81	3	C1	−3.05	−0.26	−2.39	42
I4	−0.32	0.06	−0.24	18	C2	−1.76	0.84	−1.25	24
I5	−2.40	0.38	−1.80	35	C3	1.03	0.42	0.85	9
P1	−1.22	−0.40	−0.99	43	C4	−2.11	0.41	−1.57	31
P2	0.81	0.18	0.65	17	C5	−3.33	−0.17	−2.60	44
P3	4.27	0.60	3.38	4	V1	−0.06	1.94	0.21	67
P4	0.88	−0.48	0.62	19	V2	1.79	1.82	1.62	39
P5	−1.55	−0.82	−1.30	48	V3	5.14	1.04	4.11	13
A1	−2.94	0.23	−2.24	68	V4	1.63	1.17	1.41	45
A2	−0.47	0.06	−0.36	52	V5	−0.40	1.35	−0.13	66
A3	2.43	−0.02	1.88	22	O1	−3.43	0.95	−2.53	55
A4	−1.00	−0.27	−0.81	56	O2	−0.57	1.11	−0.30	25
A5	−2.61	0.35	−1.97	71	O3	1.84	1.42	1.61	14
G1	−0.54	−1.36	−0.60	62	O4	−1.16	0.30	−0.86	60
G2	1.18	−1.89	0.67	40	O5	−2.47	−0.26	−1.94	74
G3	3.41	−0.67	2.55	20	H1	−2.25	1.40	−1.56	59
G4	0.79	−1.62	0.40	54	H2	0.64	1.15	0.65	46
G5	−0.75	−1.43	−0.77	75	H3	2.21	1.20	1.86	21
S1	−2.10	0.16	−1.60	58	H4	−2.38	1.37	−1.66	61
S2	0.35	0.64	0.36	32	H5	−4.03	0.95	−2.99	73
S3	4.14	−0.36	3.15	6					

旱程度的增加,苦荞的花序数,单株粒重,千粒重,产量均显著降低($P<0.05$),同一水分条件下,随着硫酸锌、甜菜碱浓度的增加,苦荞的花序数、单株粒重、千粒重、产量均呈现出先增后降的趋势,且在Z3(0.8 g·L^{-1})浓度下达到各水分条件下的最大值,与对照(CKD1、CKD2)相比,苦荞的花序数、单株粒重、千粒重、产量分别增加了100.00%、160.00%、103.73%、120.54%,30.51%、24.93%,125.99%、152.17%,与对照及同水分条件下的其他浓度处理差异性显著($P<0.05$)。B3时苦荞花序数、单株粒重、千粒重、产量达各水分条件下的最大值,与对照(CKD1、CKD2)比,分别增加了100.00%、160.00%,103.73%、120.54%,30.51%、24.93%,125.99%、152.17%,与对照及同水分条件下的其它浓度处理差异显著($P<0.05$),D1、D2处理下硫酸锌(0.8 g·L^{-1})与甜菜碱(20 mmol·L^{-1})较优处理浓度产量分别为17.74 g和15.66 g,说明硫酸锌和甜菜碱浸种的苦荞抗旱、增产效果显著。

表3 硫酸锌浸种对干旱胁迫下苦荞花序数、单株粒重、千粒重、产量的影响

Table 3 Effects of seed soaking in $ZnSO_4$ on the number of inflorescence, grain weight per plant, thousand grain weight, and yield of *F. tataricum* under drought stress condition

处理 Treatment	花序数/个 Flowers ordinal	单株粒重/g Grain weight per plant	千粒重/g Thousand kernel weight	产量/(g·Pot^{-1}) Yield
CKD0	12±0.58efg	1.87±0.06g	13.89±0.13ef	9.32±0.13h
D0Z1	15±1.16cde	2.24±0.02ef	14.45±0.25cd	13.27±0.15f
D0Z2	18±1.73bc	2.75±0.11bc	15.73±0.28b	17.83±0.11d
D0Z3	25±1.16a	3.58±0.17a	18.74±0.04a	23.16±0.34a
D0Z4	20±1.73b	2.96±0.1b	16.06±0.1b	19.45±0.18b
D0Z5	17±1.16bc	2.66±0.09cd	15.58±0.03b	18.89±0.03c
CKD1	8±0.58hij	1.34±0.02jk	12.16±0.16g	7.85±0.11i
D1Z1	10±1.16fgh	1.75±0.05gh	13.65±0.14f	10.48±0.15g
D1Z2	13±1.73def	2.12±0.09f	14.21±0.17de	13.59±0.36f
D1Z3	16±1.16cd	2.73±0.11bc	15.87±0.04b	17.74±0.31d
D1Z4	15±0.58cde	2.35±0.17ef	14.83±0.17c	15.32±0.2e
D1Z5	9±1.16ghi	1.69±0.03ghi	13.59±0.27f	10.43±0.27g
CKD2	5±1.16j	1.12±0.03k	10.75±0.06h	6.21±0.03l
D2Z1	7±0.58hij	1.49±0.03ij	10.93±0.29h	8.84±0.03h
D2Z2	9±1.16ghi	1.81±0.04g	11.47±0.13g	10.92±0.04g
D2Z3	13±1.16def	2.47±0.03de	13.43±0.16f	15.66±0.05e
D2Z4	9±1.16ghi	1.83±0.03g	11.49±0.11g	10.96±0.12g
D2Z5	6±1.16ij	1.55±0.04hij	11.06±0.11gh	9.03±0.16h

注:D0:正常供水;D1:中度干旱胁迫;D2:重度干旱胁迫;Z1~Z5(B1~B5)为5个不同浓度,见表1。同列不同小写字母表示处理间差异显著($P<0.05$)。表4同

Note: D0: normal water supply; D1: moderate drought ; D2: severe drought; Z1~Z5 (B1~B5) is five concentration shown in Table 1. Different lowercase letters in the same column showed significant differences of the same index between different addition treatments in the same period ($P<0.05$). The same as Table 4

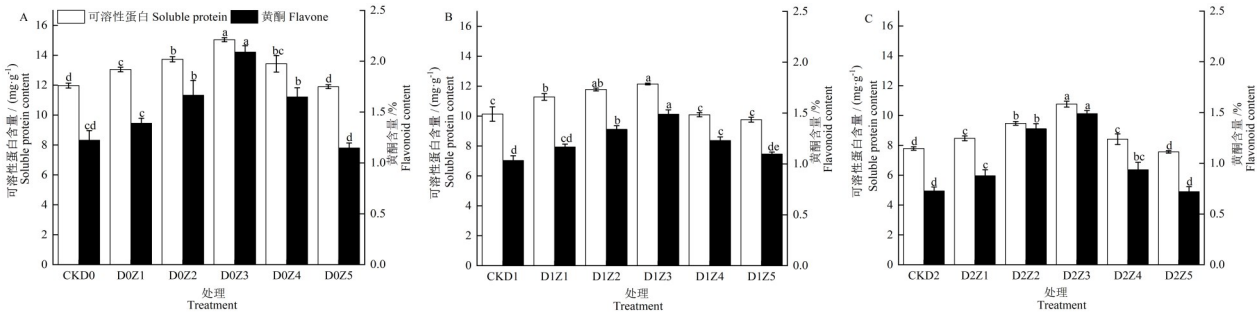
2.4 硫酸锌、甜菜碱2种优选化控物质浸种处理对苦荞籽粒品质的影响

相同浸种浓度下,随着干旱程度增加,苦荞籽粒可溶性蛋白及黄酮含量均显著下降($P<0.05$);同水分条件下,随着化控物质浸种浓度的增加,苦荞籽粒可溶性蛋白、黄酮含量均先增后减,0.8 g·L^{-1}硫酸锌、20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种浓度下籽粒品质较优,与对照(CKD0、CKD1、CKD2)相比,0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种可溶性蛋白含量分别显著增加了25.56%、19.49%、38.30%,黄酮含量分别显著增加了69.91%、44.66%、106.94%($P<0.05$);20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种可溶性蛋白含量分别显著增加了11.69%、11.15%、23.39%,黄酮含量分别增加了56.00%、32.03%、88.88%($P<0.05$),0.8 g·L^{-1}硫酸锌较20 mmol·L^{-1}甜菜碱对苦荞籽粒品质的提升效果较好(图3~图4)。

表4　甜菜碱浸种对干旱胁迫下苦荞花序数、单株粒重、千粒重、产量的影响

Table 4　Effects of seed soaking in betaine on the number of inflorescence, grain weight per plant, thousand grain weight and yield of *F. tataricum* under drought stress condition

处理 Treatment	花序数/个 Flowers ordinal	单株粒重/g Grain weight per plant	千粒重/g Thousand kernel weight	产量/(g·Pot^{-1}) Yield
CKD0	12±0.58cd	1.87±0.06cd	13.89±0.13ef	9.32±0.13h
D0B1	13±0.58bc	2.06±0.09c	14.45±0.25cd	13.27±0.15f
D0B2	14±1.16abc	2.34±0.17b	15.73±0.28b	17.83±0.11d
D0B3	17±1.16a	2.68±0.11a	18.74±0.04a	23.16±0.34a
D0B4	15±1.73ab	2.38±0.08b	16.06±0.10b	19.45±0.18b
D0B5	14±1.16abc	2.27±0.02b	15.58±0.03b	18.89±0.03c
CKD1	8±0.58efg	1.34±0.02g	12.16±0.16g	7.85±0.11i
D1B1	9±1.16def	1.42±0.03fg	13.65±0.14f	10.48±0.15g
D1B2	11±1.16cde	1.77±0.07de	14.21±0.17de	13.59±0.36f
D1B3	15±0.58ab	2.39±0.08b	15.87±0.04b	17.74±0.31d
D1B4	12±1.16bcd	2.05±0.10c	14.83±0.17c	15.32±0.20e
D1B5	8±0.58efg	1.61±0.05ef	13.59±0.27f	10.43±0.27g
CKD2	5±1.16g	1.12±0.03gh	10.75±0.06h	6.21±0.03l
D2B1	6±0.58dfg	1.44±0.02f	10.93±0.29h	8.84±0.03h
D2B2	8±1.16efg	1.53±0.02fg	11.47±0.13g	10.92±0.04g
D2B3	9±1.16ef	1.8±0.02de	13.43±0.16f	15.66±0.05e
D2B4	7±1.16fg	1.55±0.02fg	11.49±0.11g	10.96±0.12g
D2B5	5±1.16g	1.03±0.05h	11.06±0.11gh	9.03±0.16h



A:依次为正常供水(D0);B:中度干旱胁迫(D1);C:重度干旱胁迫(D2);Z1～Z5为5个浓度,见表1。同一类别不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

A: normal water supply (D0); B: moderate drought (D1); C: severe drought (D2); Z1～Z5 is five concentration shown in Table 1. Different lowercase letters in the same category indicate significant differences at $P<0.05$

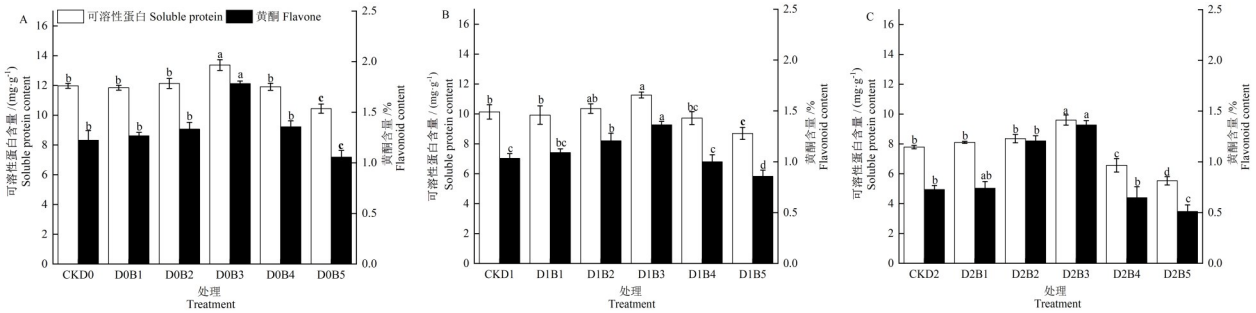
图3　硫酸锌不同浓度浸种对不同干旱胁迫程度下苦荞籽粒品质的影响

Fig.3　Effects of seed soaking in different concentrations of zinc sulfate on grain quality of *F. tataricum* under different drought stress conditions

3　讨论

种子萌发对于植物生长发育来说是首要且关键的,此阶段植物对周围环境十分敏感,种子能否顺利快速萌发成为衡量植物抗旱性强弱的重要依据,且已有大量研究表明萌发阶段遭遇干旱会在很大程度上降低种子活力、发芽率和形成弱苗,最终引起减产和品质下降,因此提高种子萌发阶段抗旱能力、出苗率是提高其抗旱性和产量的重要途径之一。

本研究采用化控物质浸种处理方式,在干旱胁迫下以种子萌发率、发芽势、根长、根冠比等与抗旱相关表型为评价指标,对可显著提高苦荞种子萌发阶段抗旱能力的优选化控物质及适宜使用浓度进行筛选,并在此基础上通过盆栽试验验证了优选化控物质浸种对干旱胁迫下苦荞最终产量的影响,结果发现15种化控物质中以0.8 g·L^{-1}硫酸锌和20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种处理,可显著提高苦荞种子萌发阶段的发芽率、发芽势、发芽指数和



A:依次为正常供水(D0);B:中度干旱胁迫(D1);C:重度干旱胁迫(D2);B1~B5为5个浓度,见表1。同一类别不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)

A: normal water supply (D0); B: moderate drought (D1); C: severe drought (D2); B1~B5 is five concentration shown in Table 1. Different lowercase letters in the same category indicate significant differences at $P<0.05$

图4 甜菜碱不同浓度浸种对不同干旱胁迫胁迫程度下苦荞籽粒品质的影响

Fig.4 Effects of seed soaking in different concentrations of Betaine on grain quality of *F. tataricum* under different drought stress conditions

活力指数,是提高苦荞种子萌发阶段抗旱能力的优选化控物质和使用浓度,且该研究结果与赵丽芳等[37](干旱胁迫下使用0.8 g·L^{-1}硫酸锌与磷肥混合施用可显著提高玉米种子发芽势、活力指数和单株幼苗干重,且减缓脂质过氧化作用,进而提升其抗旱性)、张二芳等[38](干旱胁迫下甜菜碱浸种处理,10~40 mmol·L^{-1}的甜菜碱能有效缓解干旱胁迫对芫荽种子萌发及幼苗生长产生的伤害,提高种子及幼苗的抗旱能力)、王永吉等[39](干旱胁迫下10 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种处理下显著促进了紫花苜蓿种子萌发,有效缓解了干旱胁迫,能够提高紫花苜蓿的抗逆性)在化控物质种类上结论一致,但不同作物的较优使用浓度存在一定差异,说明同种化控物质在不同作物上的较优使用浓度存在一定差异。石艳华[20]研究发现采用150 mg·kg^{-1}水杨酸浸种对干旱胁迫下苦荞生长的促进效果最明显,其次为0.05%硫酸锌,可显著增加单株幼苗干重,降低丙二醛含量,增加可溶性糖含量,与本研究结果(0.8 g·L^{-1}硫酸锌浸种促进苦荞种子萌发效果优于0.05 mmol·L^{-1}水杨酸)存在差异,造成这种差异的原因可能是两者干旱胁迫程度田间持水量不同,且石艳华主要通过苦荞幼苗生理指标(叶绿素、游离脯氨酸、可溶性糖含量等)来反映缓解干旱胁迫效果,而本研究则通过苦荞种子萌发效果(发芽率、发芽势、发芽指数等)来进行分析。

在明确可显著提高苦荞种子萌发阶段抗旱能力的优选化控物质和适宜使用浓度后,本研究还通过盆栽试验对优选化控物质在干旱胁迫下的苦荞产量及品质提升效果进行了研究,结果表明:0.8 g·L^{-1}硫酸锌较20 mmol·L^{-1}甜菜碱对提升干旱胁迫下苦荞产量及品质效果更优,显著增加了苦荞的花序数、单粒重、千粒重、产量、可溶性蛋白与黄酮含量,同干旱胁迫下化控物质对苦荞萌发期缓解作用结果一致,且该研究结果与邢艳丽等[40](叶面喷施0.8%硫酸锌溶液显著增加了干旱胁迫下谷子的穗重、穗粒重、千粒重、产量)、贺丽江等[41](叶面喷施0.5 g·L^{-1}甜菜碱溶液可显著提高干旱胁迫下苎麻鲜茎重和鲜皮重)、陈静等[42](叶面喷施10 mmol·L^{-1}的甜菜碱后,玉米灌浆前中期叶片中抗氧化酶活性升高,有利于前期粒重的增加,最终实现玉米产量的增加)、马仲炼等[43-44](叶面喷施100 μmol·L^{-1}褪黑素能显著提高苦荞籽粒可溶性蛋白含量,150 μmol·L^{-1}褪黑素能显著提高籽粒黄酮含量、0.6 mmol·L^{-1} GABA处理能显著提高荞麦籽粒可溶性糖、还原糖、可溶性蛋白含量)对苦荞产量及品质提升效果相一致,但化控物质种类及作用于植物的施用方式有所不同。

最后,综合15种化控物质对不同水分条件下苦荞种子萌发、种子表型特征及产量品质的影响,本研究发现采用0.8 g·L^{-1}硫酸锌和20 mmol·L^{-1}甜菜碱浸种处理可显著提高苦荞种子萌发阶段抗旱能力及苦荞产量品质,但2种化控物质调节苦荞抗旱性的分子机制、生理机制、复配效果、田间应用效果及其在大田环境下对苦荞全生育期表型发育的影响还需进一步研究,以期为苦荞旱作栽培中应用化学调控技术提供科学的参考依据。

4 结论

适宜的化控物质浸种处理可有助于提升苦荞苗期缓解苦荞耐干旱胁迫能力,促进种子萌发和幼苗正常生长。在本试验条件下,综合考虑各因素后推荐0.8 g·L^{-1}硫酸锌、20 mmol·L^{-1}甜菜碱为

缓解苦荞干旱胁迫的最优化控物质,显著提高了苦荞的花序数,单株粒重,千粒重,产量、可溶性蛋白与黄酮含量,0.8 g·L^{-1}硫酸锌处理下的苦荞产量及品质均优于甜菜碱,最大程度缓解了干旱胁迫对苦荞的影响。

参 考 文 献

[1]曹亚静,赵美丞,郑春燕,等. 根际微生物介导的植物响应干旱胁迫机制研究进展[J]. 中国生态农业学报(中英文),2023,31(8):1330-1342.
Cao Y J, Zhao M C, Zheng C Y, et al. Rhizosphere microorganisms-mediated plant responses to drought stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2023,31(8):1330-1342.

[2]刘忠贤,姚嫚,杨再强,等. 基于Meta分析施肥与灌溉对夏玉米干旱的缓解效应及其影响因素[J]. 中国农业气象,2023,44(5):361-371.
Liu Z X, Yao M, Yang Z Q, et al. Alleviation effect of fertilization and irrigation on summer maize drought and its influencing factors based on meta-analysis[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2023,44(5):361-371.

[3]王春鹏. 化控对夏玉米茎秆发育、产量形成及养分积累的影响[D]. 保定:河北农业大学,2023.
Wang C P. Effects of chemical control on stem development, yield formation and nutrient accumulation of summer maize[D]. Baoding:Hebei Agricultural University,2023.

[4]李永松.灌溉方式和化学调控对湘南双季稻产量形成与耐旱性的影响[D].长沙:湖南农业大学,2021.
Li Y S. Effects of irrigation methods and chemical regulators on yield formation and drought tolerance of double-cropping rice in southern Hunan [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2021.

[5]Zhang H, Sun X P, Dai M Q. Improving crop drought resistance with plant growth regulators and rhizobacteria: mechanisms, applications, and perspectives[J]. Plant Communications,2021,3(1):100228.

[6]Cassidy A, Minihane A M. The role of metabolism (and the microbiome) in defining the clinical efficacy of dietary flavonoids [J]. The American Journal of Clinical Nutrition,2017,105(1):10-22.

[7]Huang S, Zuo T, Ni W Z. Important roles of glycinebetaine in stabilizing the structure and function of the photosystem II complex under abiotic stresses[J]. Planta,2020,251(2):36.

[8]张俊杰. 干旱胁迫对夏玉米光合作用与抗氧化系统的影响及L-精氨酸的调控效应[D]. 郑州:河南农业大学,2023.
Zhang J J. Effects of drought stress on photosynthesis and antioxidant system of summer maize and regulation effect of L-arginine[D]. Zhengzhou:Henan Agricultural University,2023.

[9]陈雪峰. 多效唑影响甘蓝型油菜幼苗抗旱性的机理[D]. 重庆:西南大学,2013.
Chen X F. The physiological mechanism of PP_{333} influence drought tolerance in *Brassica napus* seedling[D]. Chongqing: Southwest University,2013.

[10]马超. 外源茉莉酸甲酯对干旱胁迫下小麦抗旱响应的调控效应研究[D]. 郑州:河南农业大学,2013.
Ma C. Regulating effect of exogenous methyl jasmonate on response to drought resistance of wheat[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University,2013.

[11]邱美欢. 茉莉酸甲酯、壳聚糖与多效唑对提高香蕉幼苗抗旱性的综合效应[D]. 海口:华南热带农业大学,2006.
Qiu M H. Physiological effects of MJ, CS and PP_{333} on drought resistance of banana seedlings[D]. Haikou: South China University of Tropical Agriculture,2006.

[12]何春梅. 引入甘氨酸甜菜碱合成途径提高小麦抗逆性研究[D]. 济南:山东大学,2009.
He C M. Study on the enhancement of abiotic stress tolerance of wheat plants by introduction of glycinebetaine-synthesis pathway[D]. Jinan:Shandong University,2009.

[13]李小白. 干旱条件下外源$CaCl_2$、海藻糖和甜菜碱对谷子萌发及幼苗生长的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2013.
Li X B. Germination and seedling growth under drought conditions exogenous $CaCl_2$, trehalose, and betaine millet[D]. Taigu:Shanxi Agricultural University,2013.

[14]刘玲丽,杜锦,向春阳,等. 外源硫酸锌对糯玉米种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 湖南生态科学学报,2023,10(2):65-70.
Liu L L, Du J, Xiang C Y, et al. Effects of exogenous zinc sulfate on seed germination and seedling growth of waxy maize [J]. Journal of Hunan Ecological Science,2023,10(2):65-70.

[15]王迪,杨汉梅,李阳倩,等. 苦荞麦"品、质、效、用"的多维评价及其活性成分高值化利用的研究进展[J]. 浙江农业学报,2023,35(8):1960-1974.
Wang D, Yang H M, Li Y Q, et al. Multidimensional evaluation of "variety, quality, efficiency and application" of Tartary buckwheat and research progress of high-value utilization of active ingredients [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis,2023,35(8):1960-1974.

[16]Yao X, Zhou M L, Ruan J J, et al. Pretreatment with H_2O_2 alleviates the negative impacts of NaCl stress on seed germination of Tartary buckwheat (*Fagopyrum tataricum*)[J]. Plants,2021,10(9):1784.

[17]Park B I, Kim J, Lee K, et al. Flavonoids in common and Tartary buckwheat hull extracts and antioxidant activity of the extracts against lipids in mayonnaise [J]. Journal of Food Science and Technology,2019,56(5):2712-2720.

[18]Seki M, Kamei A, Yamaguchi-Shinozaki K, et al. Molecular responses to drought, salinity and frost: common and different paths for plant protection[J]. Current Opinion in Biotechnology,2003,14(2):194-199.

[19]Ahmad Anjum S, Ashraf U, Zohaib A, et al. Growth and developmental responses of crop plants under drought stress: a review[J]. Zemdirbyste-Agriculture,2017,104(3):267-276.

[20]石艳华,张永清,罗海婧. 化学调节物质浸种对不同水分条件下苦荞生长及其生理特性的影响[J]. 西北植物学报,2013,33(1):123-131.
Shi Y H, Zhang Y Q, Luo H J. Influence of seed soaking with chemical regulators on the growth and physiological characteristics of Tartary buckwheat in different water conditions [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2013,33(1):123-131.

[21]高安静,刘婷婷,周美亮,等. 外源褪黑素对干旱胁迫下苦荞幼苗生长及生理特性的影响[J]. 南方农业学报,2021,52(11):3003-3012.

Gao A J, Liu T T, Zhou M L, et al. Effects of exogenous melatonin on growth and physiological characteristics of Tartary buckwheat seedlings under drought stress[J]. Journal of Southern Agriculture, 2021, 52(11): 3003-3012.

[22]何佩云,张余,周良,等. 干旱胁迫及氮肥调控对苦荞植株形态、生理特性及产量的影响[J]. 应用与环境生物学报,2022,28(1):122-128.

He P Y, Zhang Y, Zhou L, et al. Effects of drought stress and nitrogen fertilizer regulation on morphology, physiological characteristics, and yield of *Fagopyrum tataricum*[J]. Chinese Journal of Applied and Environmental Biology, 2022, 28(1): 122-128.

[23]胡新元,孙小花,罗爱花,等. 叶面喷施硫酸锌对马铃薯抗病性和产量的影响[J]. 西北农业学报,2023,32(8):1187-1193.

Hu X Y, Sun X H, Luo A H, et al. Effects of foliar spraying of zinc sulfate on disease resistance and yield of potato[J]. Acta Agriculturae Boreali-occidentalis Sinica, 2023, 32(8): 1187-1193.

[24]范小玉,陈雷,刘卫星,等. 氯化钙浸种对干旱胁迫下花生种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2022,50(8):101-105.

Fan X Y, Chen L, Liu W X, et al. Influences of calcium chloride seed soaking on seed germination and seedling physiological characteristics of peanut under drought stress[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(8): 101-105.

[25]柴文臣,阎世江. 甜菜碱对干旱胁迫下茄子幼苗生长及生理指标的影响[J]. 中国瓜菜,2021,34(8):78-83.

Chai W C, Yan S J. Effect of betaine on the growth and physiological indexes of eggplant seedlings under drought stress [J]. China Cucurbits and Vegetables, 2021, 34(8): 78-83.

[26]黎家,李传友. 新中国成立70年来植物激素研究进展[J]. 中国科学(生命科学),2019,49(10):1227-1281.

Li J, Li C Y. Seventy-year major research progress in plant hormones by Chinese scholars[J]. Scientia Sinica (Vitae), 2019, 49(10): 1227-1281.

[27]吕梦雯,徐金光,杜杰,等. 外源赤霉素和多效唑对芍药冬季鳞芽发育的影响[J]. 植物生理学报,2018,54(5):790-802.

Lü M W, Xu J G, Du J, et al. Effects of exogenous gibberellin A3 and paclobutrazol on development of herbaceous peony (*Paeonia lactiflora*) bulbils[J]. Plant Physiology Journal, 2018, 54(5): 790-802.

[28]靳琇,陈浩婷,石玉,等. 柠檬酸浸种引发对低磷胁迫下番茄幼苗生长及生理特性的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2021,29(7):1159-1170.

Jin X, Chen H T, Shi Y, et al. Effect of citric acid seed priming on the growth and physiological characteristics of tomato seedlings under low phosphorus stress[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(7): 1159-1170.

[29]武俊英,赵宝平,刘景辉,等. 葡萄糖浸种对NaCl胁迫下燕麦幼苗生长和渗透调节的影响[J]. 麦类作物学报,2014,34(7):983-989.

Wu J Y, Zhao B P, Liu J H, et al. Effects of glucose soaking on growth and osmotic adjustment of oat seedlings under NaCl stress[J]. Journal of Triticeae Crops, 2014, 34(7): 983-989.

[30]张舒涵,张俊莲,王文,等. 氯化钾对干旱胁迫下马铃薯根系生理及形态的影响[J]. 中国土壤与肥料,2018(5):77-84.

Zhang S H, Zhang J L, Wang W, et al. Influence of potassium chloride on the root physiology and morphology of potato under drought stress[J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2018(5): 77-84.

[31]李才生,胡寿祥,巫薇薇. 干旱胁迫下维生素C对玉米根系生长的影响[J]. 西南农业学报,2010,23(1):293-295.

Li C S, Hu S X, Wu W W. Effect of vitamin C on root growth of corn under drought stress[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2010, 23(1): 293-295.

[32]柯贞进,尹美强,温银元,等. 干旱胁迫下聚丙烯酰胺浸种对谷子种子萌发及幼苗期抗旱性的影响[J]. 核农学报,2015,29(3):563-570.

Ke Z J, Yin M Q, Wen Y Y, et al. Effects of polyacrylamide seed soaking on seed germination and drought resistance of millet (*Setaria italica*) seedlings under drought stress[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2015, 29(3): 563-570.

[33]刘建新,欧晓彬,王金成. 外源H_2O_2对干旱胁迫下裸燕麦幼苗叶片生理特性的影响[J]. 干旱地区农业研究,2019,37(4):146-153.

Liu J X, Ou X B, Wang J C. Effects of exogenous hydrogen peroxide (H_2O_2) on the physiological characteristics in leaves of *Avena nuda* L. seedlings under drought stress[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2019, 37(4): 146-153.

[34]刘玲,孟淑春. 2012版《国际种子检验规程》修订通报[J]. 核农学报,2012,26(5):762-763.

Liu L, Meng S C. Bulletin on revision of International seed Inspection regulations (2012 edition)[J]. Journal of Nuclear Agricultural Sciences, 2012, 26(5): 762-763.

[35]刘三才,李为喜,刘方,等. 苦荞麦种质资源总黄酮和蛋白质含量的测定与评价[J]. 植物遗传资源学报,2007,8(3):317-320.

Liu S C, Li W X, Liu F, et al. Identificaiton and evaluation of total flavones and protein content in Tartary buckwheat germplasm[J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2007, 8(3): 317-320.

[36]张琪,刘慧灵,朱瑞,等. 苦荞麦中总黄酮和芦丁的含量测定方法的研究[J]. 食品科学,2003,24(7):113-116.

Zhang Q, Liu H L, Zhu R, et al. Study on the determination method of total flavonoids and rutin content in *Fagopyrum tataricum*[J]. Food Science, 2003, 24(7): 113-116.

[37]赵丽芳,袁亮,张水勤,等. 锌与磷肥不同混合方式对玉米产量及磷、锌利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2021,27(12):2205-2215.

Zhao L F, Yuan L, Zhang S Q, et al. Effects of different methods of mixing zinc and phosphate fertilizer on corn yield and utilization of phosphorus and zinc[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2021, 27(12): 2205-2215.

[38]张二芳,李元圆,郝旺林. 外源甜菜碱对干旱胁迫下苋菜种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 种子,2022,41(12):93-97,105.

Zhang E F, Li Y Y, Hao W L. Effects of exogenous *Glycine* betaine on seed germination and physiological characteristics of *Coriandrum sativum* seedlings under drought stress[J]. Seed, 2022, 41(12): 93-97, 105.

[39]王永吉,郝小玲,周佳佳,等. 外源甜菜碱对干旱胁迫下紫花苜蓿种子萌发与幼苗生长的影响[J]. 北方园艺,2022(15):

51-57.
Wang Y J, Hao X L, Zhou J J, et al. Effects of exogenous *Glycine* betaine on seed germination and seedling growth of alfalfa under drought stress[J]. Northern Horticulture, 2022(15):51-57.
[40]邢艳丽. 叶面喷施硫酸锌对张杂谷10号农艺性状及产量的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2019.
Xing Y L. Effect of foliar application of zinc on growing development and yield of ZhangzaGu 10[D]. Taigu: Shanxi Agricultural University,2019.
[41]贺丽江,陈雷宇,李文略,等. 干旱胁迫下喷施甜菜碱对苎麻生理特性及产量的影响[J]. 中国麻业科学,2015,37(3):130-134.
He L J, Chen L Y, Li W L, et al. Effect of spraying betaine on physiological characters and yield of ramie under drought stress[J]. Plant Fiber Sciences in China,2015,37(3):130-134.
[42]陈静,任佰朝,赵斌,等. 叶面喷施甜菜碱对不同播期夏玉米产量形成及抗氧化能力的调控[J]. 作物学报,2022,48(6):1502-1515.
Chen J, Ren B Z, Zhao B, et al. Regulation of leaf-spraying glycine betaine on yield formation and antioxidation of summer maize sowed in different dates[J]. Acta Agronomica Sinica, 2022,48(6):1502-1515.
[43]马仲炼,龚健福,马永翠,等. 外源褪黑素对苦荞生理特性、产量及品质的影响[J]. 河南农业科学,2024,53(1):41-47.
Ma Z L, Gong J F, Ma Y C, et al. Effects of exogenous melatonin on physiological characters, yield and quality of Tartary buckwheat[J]. Journal of Henan Agricultural Sciences,2024,53(1):41-47.
[44]马仲炼,盘贵经,陈悦,等. 外源γ-氨基丁酸对苦荞生理特性及产量品质的影响[J]. 江苏农业科学,2023,51(12):85-90.
Ma Z L, Pan G J, Chen Y, et al. Influences of exogenous γ-aminobutyric acid on physiological characteristics and yield and quality of Tartary buckwheat[J]. Jiangsu Agricultural Sciences,2023,51(12):85-90.

Effects of soaking *Fagopyrum tataricum* seeds in fifteen chemical substances on alleviating drought stress

Zhang Yali[1], Zhang Yijun[2], Pei Hongbin[2*], Gao Zhenfeng[3], Yang Qian[2]

(*1.College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030801, China; 2.College of Life Sciences, Shanxi Normal University, Taiyuan 030000, China; 3.Agricultural Products Storage and Preservation Research Institute, Shanxi Agricultural University (Shanxi Academy of Agricultural Sciences), Taiyuan 030000, China*)

Abstract: [Objective] Drought stress is a main limiting factor for achieving high and stable yields of *Fagopyrum tataricum* L. This study aimed to screen chemical substances from 15 options that can enhance the drought stress resistance of *F. tataricum*, providing a theoretical basis for alleviating drought stress and improving the yield and quality of the buckwheat crop. [Methods] Using *F. tataricum* as the experimental material, the experiment involved two factors: water and chemical substances. A three-level nested hydroponic experiment was conducted to explore the effect of soaking seeds in chemical substances on seed germination of *F. tataricum*. Principal component analysis (PCA) was used to select zinc sulfate and betaine for pot experiment, analyzing the effects of soaking seeds in different concentrations of these two substances on improving the yield of *F. tataricum*. [Results] Compared with normal water supply, under drought stress conditions, the germination rate, germination potential, germination index, vigor index, root length, bud length, and fresh root weight during the germination process of *F. tataricum* initially increased and then decreased with the increase in seed soaking concentration of the 15 chemical control substances. The maximum values of these indicators were achieved with 0.8 g·L^{-1} zinc sulfate, showing the most significant effect in alleviating drought. The root-to-shoot ratio initially decreased and then increased, with the minimum value observed at 0.8 g·L^{-1} zinc sulfate. PCA analysis and comprehensive scoring were used to rank the effectiveness of the 15 substances in enhancing drought tolerance of buckwheat. The ranking was as follows: zinc sulfate>betaine>indoleacetic acid>paclobutrazol>potassium chloride>salicylic acid>sodium selenite>calcium chloride>glucose>vitamin>polyacrylamide>citric acid>gibberellin>hydrogen peroxide>abscisic acid. Pot simulations of drought testing showed that 0.8 g·L^{-1} zinc sulfate significantly improved the number of inflorescences, grain weight per plant, 1000-grain weight, yield, and grain quality of F. tataricum compared to other treatments. [Conclusion] Among the 15 chemical substances, soaking seeds in 0.8 g·L^{-1} zinc sulfate had the best effect on improving drought resistance of *F. tataricum*. Under moderate and severe stress, it increased the yield of *F. tataricum* by 98.98% and 75.20%, respectively, and significantly increased the soluble protein and flavonoid content of the grains.

Keywords: *F. tataricum*, Drought stress, Chemical control substances, Principal component analysis

(编辑:吕俊俐)