

郭婧华,王富豪,郝培培,等. 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗生长的缓解效应[J]. 江苏农业科学,2024,52(15):105–111.
doi:10.15889/j.issn.1002–1302.2024.15.013

3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗生长的缓解效应

郭婧华,王富豪,郝培培,程有普

(天津农学院,天津 300380)

摘要:为探究干旱胁迫下不同浓度的碧护、苯胺胺酸和复硝酚钠对油菜幼苗生长的缓解效应,以白菜型油菜华油 100 作为试验材料,采用 20% 聚乙二醇(PEG–6000)模拟干旱条件,研究不同浓度的单一调节剂以及低浓度调节剂组合对油菜幼苗生长指标、光合色素、膜脂过氧化作用和抗氧化物质的影响。结果表明,3 种外源物质可在不同程度上缓解干旱胁迫对油菜幼苗生长的抑制作用,单一调节剂中分别以 100 mg/L 碧护(BH₂)、100 mg/L 复硝酚钠(F₂)和 1 000 mg/L 苯胺胺酸(PA₂)缓解效果最好,低浓度组合方式中 50 mg/L 复硝酚钠和 500 mg/L 苯胺胺酸处理(F₁ + PA₁)对缓解干旱起到积极作用,与 CK 相比,4 种处理的芽长分别增加 44.55%、39.09%、30.00%、37.27%,鲜重分别提高了 46.51%、48.84%、41.86%、48.84%,叶绿素含量分别增加 21.04%、34.67%、40.50%、28.75%,丙二醛(MDA)含量分别下降 41.04%、27.48%、36.79%、30.08%,谷胱甘肽(GSH)含量分别提高 19.90%、20.38%、50.41%、36.87%。综上所述,3 种外源物质分别处理以及低浓度组合处理均可不同程度地缓解干旱对油菜幼苗生长的抑制。在单一调节剂处理中以 BH₂、F₂、PA₂ 缓解效果最好,在低浓度组合处理中以 F₁ + PA₁ 处理效果最佳,且明显优于单一调节剂的其他浓度处理,对减量增效,促进生产具有实际性意义。

关键词:油菜;幼苗生长;外源物质;干旱胁迫;缓解效应

中图分类号:S565.401 **文献标志码:**A **文章编号:**1002–1302(2024)15–0105–07

近年来,随着全球气候的急剧变化,水资源短缺问题日益紧迫。干旱胁迫在世界范围内普遍存

在,已成为植物生长发育的主要限制条件^[1]。世界上每年由于干旱造成的粮食减产占气象灾害造成总减产量的 50% 以上,且干旱面积的增加与气候变暖呈正相关,这对全球可持续农业生产构成了严重挑战。因此,应对农作物的干旱胁迫已成为各国科学家的核心研究课题^[2]。白菜型油菜(*Brassica rapa* L.)作为我国主要的油料作物,在食用油生产中占有重要地位。干旱胁迫对油菜具有破坏性影响,可导致其生理过程发生改变、生长发育迟缓,对其产

收稿日期:2023–09–14

基金项目:国家自然科学基金(编号:31572034);天津市企业科技特派员项目(编号:19JCTPJC59000)。

作者简介:郭婧华(1996—),女,河北保定人,硕士研究生,主要研究方向为除草剂药害与残留。E-mail:nf33216413@163.com。

通信作者:程有普,博士,教授,主要从事农药残留与环境行为研究。E-mail:chengyoupu@tjau.edu.cn。

[17]蔡瑞国,尹燕桦,赵发茂,等. 强筋小麦胚乳淀粉粒度分布特征及其对弱光的响应[J]. 中国农业科学,2008,41(5):1308–1316.

[18]Peng M, Gao M, Abdel–Aal E S M, et al. Separation and characterization of A– and B–type starch granules in wheat endosperm[J]. Cereal Chemistry, 1999, 76(3):375–379.

[19]夏明敬. 谷氨酰胺转氨酶对藜麦–小麦面团及面包品质的影响[J]. 食品研究与开发, 2020, 41(14):132–136.

[20]任海建,李世峰,朱秋丽. 播期、播量对小麦扬麦 23 生长特性及产量的影响[J]. 陕西农业科学, 2022, 68(9):14–18.

[21]张程翔,刘开振,薛朝尹,等. 晚播减氮对不同氮肥基追比例下小麦产量和氮素利用效率的影响[J]. 西南农业学报, 2022, 35(7):1613–1622.

[22]郭明明,王康君,张广旭,等. 播期和行距互作对小麦籽粒产量和品质的调控[J]. 作物杂志, 2021(6):152–158.

[23]裴艳婷,魏龙雪,朱金英,等. 播期与播量配置对济麦 44 产量性状及品质的影响[J]. 河北农业科学, 2022, 26(6):43–49.

[24]谭植,李瑞,吴培金,等. 钾肥对弱筋小麦淀粉粒度分布与黏度参数的影响[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版), 2020, 46(5):507–512.

[25]闫素辉,杨兵兵,许峰,等. 稻茬晚播小麦胚乳淀粉粒度分布的粒位差异[J]. 麦类作物学报, 2016, 36(6):801–807.

[26]孔令平,张海艳,赵延明. 播期和密度对不同玉米品种淀粉糊化特性和籽粒品质的影响[J]. 玉米科学, 2014, 22(3):98–102, 108.

[27]樊艳丽,董会,卢柏山,等. 播期对不同糯玉米品种淀粉糊化特性的影响[J]. 作物杂志, 2018(4):79–83.

[28]冯辉,王晨阳,郭天财,等. 播期对不同筋力型小麦品种淀粉糊化特性的影响[J]. 麦类作物学报, 2009, 29(4):647–651.

量以及品质构成极大威胁^[3]。在我国由于干旱导致的油菜减产极其严重,如果播种时期遭遇干旱,减产比例高达 32% 以上^[4]。因此采取针对性的调控措施,提高油菜的耐旱性,对于确保油菜高产稳产至关重要。

目前,施加外源物质、干旱锻炼^[5]、施肥^[6]等措施均能够在一定程度上缓解干旱胁迫对植物造成的损害。其中,施用外源物质针对性强、用量少、见效快、操作简单。近年来,采用外源物质来减轻干旱胁迫对植物造成的损伤已成为植物抗旱研究领域的重点^[7]。通过分析形态和生理参数,筛选出缓解干旱胁迫效果良好的外源植物调节剂,从而创造更高的价值,以应对降水量减少和土壤水分不足等影响油菜出苗及正常生长的情况。

复硝酚钠是一种硝基愈创木酚钠复合物,能迅速渗入植物机体内,打破细胞休眠,刺激植物生长发育,增强作物的抗逆能力,加快植物新陈代谢,促进植物排毒^[8]。苯胺胺酸(PA)是一种新型高效的植物生长调节剂,已有研究表明,喷洒苯胺胺酸可通过提高抗氧化酶活性和减少活性氧等对细胞膜的损害,提高作物的抗性^[9]。碧护是一种天然生物制品,含有 30 多种植物活性成分,其中包括内源植物激素、黄酮类化合物和氨基酸等,具有刺激细胞分裂和新陈代谢以及打破种子休眠等作用,且能够减轻干旱、低温等对作物产生的损害,诱导作物提高抗逆性、改善果实品质^[10]。目前,有关 3 种外源物质对油菜幼苗缓解干旱胁迫的研究较少。因此,研究 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜生长发育、生理生化的影响,可为油菜生产中外源物质的施用提供理论基础。

本试验以白菜型油菜华油 100 为材料,研究不同浓度的碧护、苯胺胺酸、复硝酚钠等 3 种植物生长调节剂对干旱胁迫下油菜幼苗生长过程中形态和生理参数变化的影响以及调节剂之间低浓度组合的效果是否优于单一植物生长调节剂,以达到减量增效、促进生产的效果,初步选择出综合改善效果较好的外源物质,以期能及时采取有效的补救措施应对油菜干旱以及油菜生产的健康稳定发展奠定坚实的基础。

1 材料与方法

1.1 试验地点

试验于 2023 年 7—8 月在天津农学院园艺园林

学院植物保护实验室中进行。

1.2 试验材料

供试油菜品种为白菜型华油 100(信阳市世纪润农农业开发有限公司);3 种供试的植物生长调节剂分别为 1.8% 复硝酚钠水剂(山东戴盟得生物科技有限公司)、0.136% 赤·吲乙·芸苔可湿性粉剂(商品名“碧护”,德国阿格福莱农林环境生物技术股份有限公司)、20% 苯胺胺酸可溶液剂(陕西上格之路生物科学有限公司)。

1.3 试验设计

种子处理:选择大小均匀一致的油菜种子用 1% 次氯酸钠消毒 10 min 后,用蒸馏水冲洗 3 次,置于阴凉通风处晾干。用 4 种不同浓度的碧护、复硝酚钠和苯胺胺酸进行浸种处理,以蒸馏水浸种为对照(CK)。调节剂中 4 个浓度的碧护处理分别记作 BH₁、BH₂、BH₃、BH₄,复硝酚钠处理记作 F₁、F₂、F₃、F₄,苯胺胺酸处理分别记作 PA₁、PA₂、PA₃、PA₄。试验选用不同浓度的单一调节剂以及低浓度调节剂两两组合的方式进行设置,共计 16 个处理,每个处理 3 次重复,各处理具体如表 1 所示。将种子置于不同处理溶液中浸种 24 h 后取出晾干。当其恢复到初始含水量后,进行胁迫试验。

表 1 油菜幼苗的不同处理

处理	胁迫处理	调节剂浓度 (mg/L)
CK	20% PEG	蒸馏水
BH ₁	20% PEG	50
BH ₂	20% PEG	100
BH ₃	20% PEG	150
BH ₄	20% PEG	200
F ₁	20% PEG	50
F ₂	20% PEG	100
F ₃	20% PEG	150
F ₄	20% PEG	200
PA ₁	20% PEG	500
PA ₂	20% PEG	1 000
PA ₃	20% PEG	1 500
PA ₄	20% PEG	2 000
BH ₁ + F ₁ (1)	20% PEG	50 + 50
BH ₁ + PA ₁ (2)	20% PEG	50 + 500
F ₁ + PA ₁ (3)	20% PEG	50 + 500

胁迫试验:在直径为 9 cm 的培养皿中铺 2 层滤纸,加入 6 mL 20% PEG-6000(聚乙二醇 6000)作为渗透介质模拟干旱胁迫,当滤纸被充分浸湿后,分别在每个培养皿中均匀放置处理后的 50 粒油菜

种子,每个处理设 3 次重复。将培养皿置于温度为 25 ℃、湿度为 65%、光—暗周期为 12 h—12 h 的人工气候箱内培养 7 d。

1.4 测定项目与方法

1.4.1 幼苗生长指标的测定 培养 7 d 后取 10 株长势均匀一致的幼苗,分别测量其芽长、根长,吸干水分后称量鲜重,然后置于烘箱内在 105 ℃杀青 30 min,70 ℃烘干至恒重后称量干重。每个处理重复 3 次,结果取平均值。

1.4.2 叶绿素含量的测定 参照《植物生理生化实验原理和技术》中的方法^[11]采用 95% 乙醇浸提油菜幼苗中的叶绿素和类胡萝卜素,使用分光光度计测定其吸光度,计算叶绿素含量。

1.4.3 生理指标的测定 丙二醛(MDA)、过氧化氢(H₂O₂)、脯氨酸(Pro)、还原型谷胱甘肽(GSH)含量均采用南京建成科技有限公司的相应试剂盒进行测定,测定步骤严格按照试剂盒说明书执行,每个指标重复测定 3 次。

1.5 数据分析

采用 Origin 8.6 软件进行图表绘制,SPSS 18.0 软件进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗生长发育的影响

从表 2 可以看出,干旱胁迫下,与 CK 相比,油菜幼苗的根长、芽长、鲜重和干重随着外源物质的施加普遍增加,说明外源物质对油菜幼苗生长有明显的促进作用。在干旱胁迫条件下施加单一调节剂的处理中,当碧护浓度为 100 mg/L、苯肽胺酸浓度为 1 000 mg/L、复硝酚钠浓度为 100 mg/L 时,油菜幼苗的根长、芽长、干鲜重明显增加,显著高于 CK。在低浓度外源物质组合处理中,复硝酚钠和苯肽胺酸组合的处理效果较好。在苯肽胺酸浓度为 2 000 mg/L 时,油菜幼苗的根长、芽长、鲜重、干重与 CK 没有显著差异。总体来看,在干旱条件下,一定浓度的外源物质可以诱导油菜幼苗胚根和胚芽的伸长,增加其干鲜重,但在过高浓度下,胚根和胚芽长度、干鲜重增加较少甚至缓解效果变差。综上,干旱胁迫下使用的 3 种外源物质对油菜幼苗的生长具有不同程度的影响,其中以 BH₂、F₂、PA₂、F₁ + PA₁ 处理效果最好,与 CK 相比,芽长分别增加

表 2 油菜幼苗生长指标测定

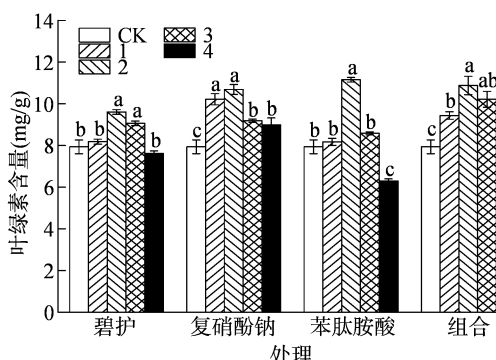
外源物质	处理	根长 (cm)	芽长 (cm)	鲜重 (g)	干重 (g)
碧护	BH ₁	5.60 ± 0.35bc	1.32 ± 0.08ab	0.47 ± 0.03b	0.29 ± 0.01b
	BH ₂	9.23 ± 0.23a	1.59 ± 0.10a	0.63 ± 0.03a	0.34 ± 0.01a
	BH ₃	7.94 ± 0.20b	1.42 ± 0.08ab	0.48 ± 0.02b	0.31 ± 0.01b
	BH ₄	6.36 ± 0.46b	1.27 ± 0.05bc	0.44 ± 0.02b	0.30 ± 0.01b
	CK	5.20 ± 0.23c	1.10 ± 0.11c	0.43 ± 0.02b	0.28 ± 0.02b
复硝酚钠	F ₁	6.93 ± 0.32b	1.36 ± 0.08ab	0.51 ± 0.02b	0.30 ± 0.01b
	F ₂	8.10 ± 0.47a	1.53 ± 0.11a	0.64 ± 0.03a	0.37 ± 0.01a
	F ₃	5.96 ± 0.42bc	1.34 ± 0.09ab	0.56 ± 0.03ab	0.31 ± 0.01b
	F ₄	5.53 ± 0.34c	1.30 ± 0.08ab	0.45 ± 0.03b	0.29 ± 0.01b
	CK	5.20 ± 0.23c	1.10 ± 0.11b	0.43 ± 0.02b	0.28 ± 0.02b
苯肽胺酸	PA ₁	6.23 ± 0.20bc	1.38 ± 0.09ab	0.44 ± 0.01b	0.30 ± 0.01ab
	PA ₂	8.43 ± 0.42a	1.43 ± 0.08a	0.61 ± 0.01a	0.34 ± 0.01a
	PA ₃	6.52 ± 0.65b	1.28 ± 0.06ab	0.45 ± 0.02b	0.29 ± 0.01b
	PA ₄	5.17 ± 0.19c	1.16 ± 0.06ab	0.38 ± 0.02c	0.27 ± 0.01b
	CK	5.20 ± 0.23c	1.10 ± 0.11b	0.43 ± 0.02bc	0.28 ± 0.02b
组合	BH ₁ + F ₁	7.83 ± 0.14b	1.40 ± 0.09ab	0.59 ± 0.02a	0.33 ± 0.02ab
	BH ₁ + PA ₁	10.04 ± 0.23a	1.47 ± 0.09a	0.62 ± 0.03a	0.34 ± 0.01a
	F ₁ + PA ₁	9.87 ± 0.18a	1.51 ± 0.10a	0.64 ± 0.03a	0.36 ± 0.02a
	CK	5.20 ± 0.23c	1.10 ± 0.11b	0.43 ± 0.02b	0.28 ± 0.02b

注:表中数据为平均值 ± 标准误;同栏同列数据后不同小写字母表示处理间差异显著(P < 0.05)。

44.54%、39.09%、30.00%、37.27%，鲜重分别提高 46.51%、48.84%、41.86%、48.84%。

2.2 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

植物的生长发育依靠光合作用,而光合作用受环境的影响较大,其中干旱胁迫对植物光合作用的影响尤为明显^[12]。叶绿素含量可直接影响植物光合速率,进而对植物的生长和逆境适应能力造成影响^[13]。类胡萝卜素是在植物细胞质体中合成的疏水性色素,是植物光合反应的重要物质^[14]。在干旱胁迫下,施用不同的调节剂后油菜幼苗的叶绿素和类胡萝卜素含量会发生不同的变化。如图 1 所示,对于碧护来说,100 mg/L 处理的叶绿素和类胡萝卜



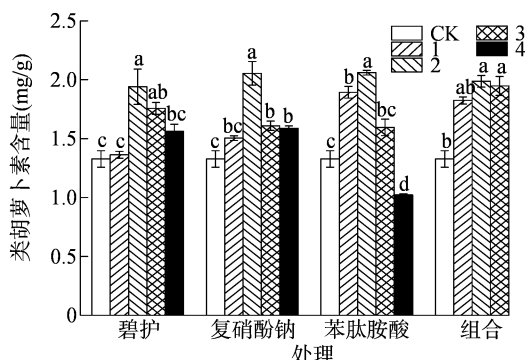
不同小写字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。下同

图1 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量的影响

2.3 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗丙二醛和过氧化氢含量的影响

MDA 是膜质过氧化产物,通常代表着细胞膜受损的程度。过氧化氢是活性氧代谢的一个重要指标,其水平可以反映植物组织中活性氧代谢的强度^[15]。在干旱胁迫下,CK 组油菜叶片中 MDA 和 H_2O_2 大量积累,外源物质处理可显著降低油菜幼苗 MDA 和 H_2O_2 的含量。如图 2 所示,在干旱胁迫下,与 CK 相比,施用单一外源物质后油菜幼苗叶片 MDA 和 H_2O_2 的含量普遍下降,整体来看,随着外源物质浓度的增加呈现先降后升的趋势。施加碧护后, BH_1 处理的 MDA 和 H_2O_2 含量最低,分别较 CK 下降 41.04% 和 13.72%;施加复硝酚钠后,相较于 CK 及其他浓度处理, F_2 处理的 MDA 和 H_2O_2 含量最低,分别较 CK 下降 27.48% 和 16.30%;施用苯胺胺酸后,相较于 CK 及其他浓度处理, PA_2 处理的 MDA 和 H_2O_2 含量最低,分别较 CK 下降 36.79% 和 42.49%。对于 2 种外源物质组合来说,复硝酚钠和苯胺胺酸组合处理的 MDA 和 H_2O_2 含量显著低于

素含量最高,分别较 CK 提高了 21.04% 和 46.15%;对于复硝酚钠来说,100 mg/L 处理的叶绿素和类胡萝卜素含量最高,较 CK 分别显著提高 34.67% 和 54.69%;对于苯胺胺酸来说,1 000 mg/L 处理叶绿素和类胡萝卜素含量最高,较 CK 分别显著提高 40.50% 和 55.15%。对于 2 种外源物质组合来说,3 种组合方式处理下油菜叶绿素和类胡萝卜素含量均显著高于 CK,其中碧护和苯胺胺酸、复硝酚钠和苯胺胺酸组合的处理效果更佳,较 CK 分别提高 37.05% 和 49.65%、28.75% 和 46.70%。综上,干旱胁迫下喷施 3 种外源物质均能不同程度地提高油菜幼苗叶绿素和类胡萝卜素含量,以 F_2 、 PA_2 、 $BH_1 + PA_1$ 、 $F_1 + PA_1$ 处理效果更佳。



CK,较 CK 分别下降 30.08% 和 33.90%。综上,干旱胁迫下喷施 3 种外源物质能有效降低油菜叶片的 MDA 和 H_2O_2 含量,以 BH_2 、 F_2 、 PA_2 、 $F_1 + PA_1$ 处理效果最佳。

2.4 3 种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗脯氨酸含量的影响

在干旱胁迫下,施用植物生长调节剂的处理油菜幼苗脯氨酸含量显著高于 CK,且总体随着调节剂浓度的升高呈先增加后降低的趋势。如图 3 所示,施加碧护后, BH_1 处理脯氨酸含量最高,显著高于 CK 29.02%;施加复硝酚钠后, F_2 处理脯氨酸含量最高,较 CK 提高 29.45%;施加苯胺胺酸后, PA_2 处理脯氨酸含量最高,显著高于 CK 38.29%。对于 2 种外源激素组合来说,3 个组合处理的脯氨酸含量均显著高于 CK,其中 $F_1 + PA_1$ 处理最高,较 CK 提高 30.58%。作为机体中有效的渗透调节物质之一,脯氨酸在保护细胞正常形态以及促使渗透压达到相对均衡方面发挥着重要作用。植物在处于逆境条件下时,体内会迅速积累大量甚至百倍以上

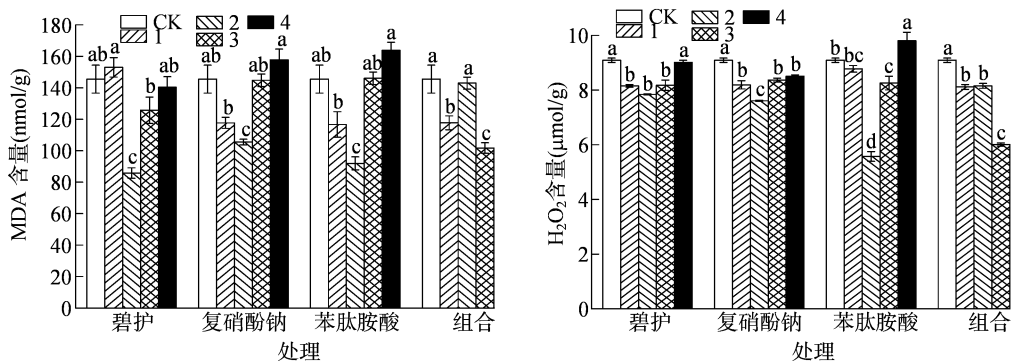


图2 3种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗丙二醛和过氧化氢含量的影响

脯氨酸^[16]。综上,在干旱条件下施用不同浓度的调节剂后,油菜幼苗的脯氨酸含量可显著提高,缓解干旱条件对幼苗造成的影响,在16种处理中,以BH₁、F₂、PA₂、F₁+PA₁处理效果最佳。

2.5 3种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗GSH含量的影响

如图3所示,在干旱胁迫下,外源物质处理可显著提高油菜幼苗叶片GSH的含量,在16种处理中

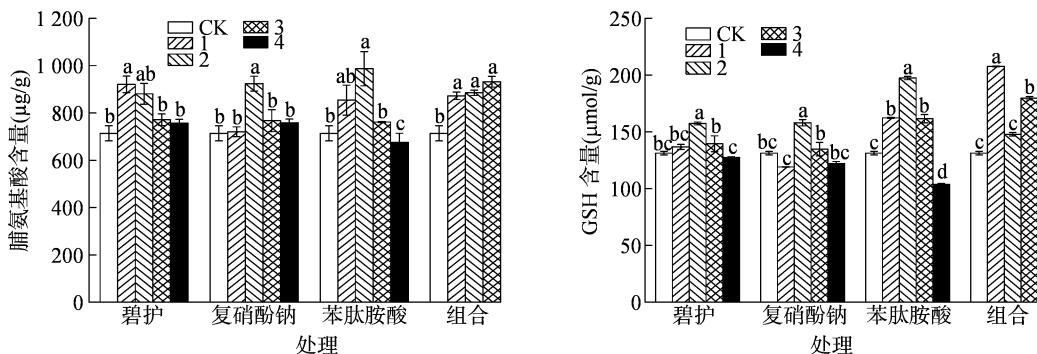


图3 3种外源物质对干旱胁迫下油菜幼苗脯氨酸和谷胱甘肽含量的影响

3 讨论与结论

探究作物抗旱性的途径主要包括人为控制干旱和模拟干旱,其中目前较为常用的是模拟干旱。施用PEG作为渗透介质模拟干旱胁迫具有方便简单、安全无毒、不被植物体吸收等优点^[17]。前人研究发现,在外源应用渗透压调节剂减轻PEG诱导的油菜干旱胁迫中,20%PEG-6000可作为油菜模拟干旱胁迫的最适浓度^[18]。马明莉等对甘蓝型油菜的研究表明,外源水杨酸对幼苗的保护阈值可能是PEG浓度15%~20%^[19]。本试验选用20%PEG-6000作为渗透介质模拟干旱胁迫。有很多途径可缓解干旱对植物种子萌发的影响,但主要包括浸种和非浸种。非浸种处理主要与直接添加调节剂有关,但研究发现,这会对试验结果产生不可控的影

响,特别是对PEG模拟干旱胁迫的溶液来说,很难确保最终的胁迫浓度不被稀释和干扰。浸种在实践中相对来说更为科学,因为PEG溶液浓度不会受到影响,还能尽早打破种子休眠。前人研究也表明,浸种是缓解干旱的有效方法^[20-21]。

干旱胁迫是对植物生长产生威胁的主要因素之一,逆境胁迫的发生导致植物不同部位活性氧的产生和抗氧化防御系统之间失衡^[22]。逆境胁迫下,植物体内发生相关生理生化反应,进而影响植物生长和形态建成,导致根长、芽长缩短,干鲜重减少^[23]。世界各国针对各地日益增长的各种农作物产量需求和快速变化的气候条件一直在寻求能够安全解决的方案。外源物质在植物生长发育过程中发挥着重要的作用,能减轻干旱对植物种子萌发和幼苗生长造成的损伤,但不同外源物质对干旱条

件下幼苗生长的影响不同^[24]。范小玉等的研究表明,施加氯化钙显著增加了花生幼芽胚根长、胚芽长及鲜质量、干质量^[25]。本试验结果表明,干旱胁迫下施加适宜的外源物质能够促进油菜生长,有效缓解干旱胁迫导致的抑制效果,在 100 mg/L 碧护、100 mg/L 复硝酚钠、1 000 mg/L 苯胺胺酸以及复硝酚钠和苯胺胺酸组合处理下达到最佳成效。

叶绿素是叶片进行光合作用的基础,其含量可以间接反映植物在干旱条件下的耐旱程度。干旱胁迫程度的加剧会改变叶片细胞内的生理生化过程,抑制叶绿素的合成并加快其降解,从而导致叶绿素含量迅速降低^[26]。杨妮等对茶树的研究表明,外源施用 5-氨基乙酰丙酸(5-ALA)能显著提高茶树叶片的叶绿素含量^[27]。本试验结果表明,施加外源物质后油菜叶片的叶绿素含量明显升高,促进光合作用的运转,进一步满足油菜生长的必要条件,加快其新陈代谢,其中在 100 mg/L 复硝酚钠、1 000 mg/L 苯胺胺酸以及碧护和苯胺胺酸、复硝酚钠和苯胺胺酸组合处理下达到最高。

在干旱条件下油菜幼苗的抗氧化酶系统出现失衡,导致植物体内的 MDA、H₂O₂ 大量积累,从而使油菜幼苗受到氧化损伤。施用外源物质能促进植物进行渗透调节,激活酶防御系统,诱导植物叶片 H₂O₂、MDA 含量发生变化,改善植物呼吸作用和光合作用,从而提高作物对于干旱胁迫的适应性^[28]。前人研究发现,丛枝菌根真菌与外源褪黑素联合应用可减轻干旱胁迫,促进烟草幼苗生长,可以看出,施用外源褪黑素在减少 H₂O₂ 和 MDA 积累方面具有积极效果^[29]。本研究结果表明,施用 3 种外源物质后,油菜幼苗叶片中的 MDA、H₂O₂ 含量相比 CK 显著降低,其中 100 mg/L 碧护、100 mg/L 复硝酚钠、1 000 mg/L 苯胺胺酸以及复硝酚钠和苯胺胺酸组合的处理效果最佳。

面对逆境胁迫,植物会积累大量的渗透调节物质,如脯氨酸、可溶性糖等,以提高细胞液浓度,维持细胞膨压,从而适应逆境胁迫^[30-31]。Khan 等的研究表明,喷施油菜素内酯可使干旱条件下小麦幼苗中的脯氨酸、可溶性糖的含量显著提高^[32]。在本试验中,油菜幼苗在干旱胁迫下脯氨酸大量积累,而施加调节剂有助于其含量的升高,这可能是由于加入了能够促进油菜机体内氨基酸转化的植物生长调节剂,促使幼苗积存大量渗透调节物质,调节细胞的渗透势,维持正常的水分供应,从而提高油

菜幼苗的抗逆性,在 50 mg/L 碧护、100 mg/L 复硝酚钠、1 000 mg/L 苯胺胺酸以及复硝酚钠和苯胺胺酸组合处理下达到最高。

还原性谷胱甘肽是一种非蛋白硫醇化合物,在生物细胞中含量丰富。谷胱甘肽的亲核活性被用于生物体内的各种应激反应途径,以清除活性氧和重金属等对细胞造成的损伤^[33]。单长卷等对小麦的研究表明,不同浓度外源硝酸镧处理均显著提高了干旱下小麦的 GSH 含量^[34]。本研究中,干旱胁迫刺激油菜叶片中 GSH 含量的增加,叶片通过消耗 GSH 来达到快速清除活性氧的目的,而施加外源物质能促进 GSH 再生,使叶片保持高效抗氧化能力,并且缓解叶片因活性氧造成的损伤,其中 100 mg/L 碧护、100 mg/L 复硝酚钠、1 000 mg/L 苯胺胺酸以及碧护和复硝酚钠、复硝酚钠和苯胺胺酸组合处理效果更佳。

综上所述,在本研究中,3 种外源物质分别处理以及低浓度组合处理均不同程度地缓解了干旱对油菜幼苗生长的抑制。综合分析得出,干旱胁迫下,喷施适宜浓度的碧护、复硝酚钠、苯胺胺酸均能促进油菜幼苗生长,缓解干旱胁迫对油菜造成的伤害,进而提高产量,总体上分别以 100、100、1 000 mg/L 处理效果最好。缓解过程中主要通过增加 GSH 等抗氧化物质含量以及脯氨酸等渗透调节物质含量来降低油菜体内的活性氧含量,最终降低叶片 MDA、H₂O₂ 含量,减轻由干旱造成的氧化损伤。同时,外源物质还能促进叶片光合色素的合成,加快油菜幼苗在干旱条件下的生长速度,提高油菜的耐旱性。整体来看,低浓度组合方式缓解效果显著,大多优于单一调节剂的处理,对减量增效,促进生产具有实际性意义。在 3 种组合处理中以复硝酚钠和苯胺胺酸效果最好,而碧护和 2 种调节剂的组合效果较差,可能是由于其本身含有多种活性物质,已组成了一个特有的植物生长复合平衡调节系统,解决了外源物质功效单一、配合使用困难、调节效果不均等问题,与相同特性的物质组合后效果不甚明显,可以尝试复配其他化学制剂,这有待于进一步研究。目前种子包衣是国际上处理种子的一项较为重要的技术,可以考虑开发耐干旱的种子包衣剂,这能大大增强作物从种子到生长发育期间抵御干旱的能力,对促进生产具有实际性意义。

参考文献:

[1] 李 平,谢淑芹,方璐斌,等. 干旱胁迫下不同褪黑素浓度处理下

- 谷子种子萌发特性[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2022,42(5):76-83.
- [2]穆昆杰. 生长素对干旱胁迫下棉花幼苗生长的影响[D]. 郑州:河南农业大学,2022.
- [3]Batool M, El-Badri A M, Hassan M U, et al. Drought stress in *Brassica napus*: effects, tolerance mechanisms, and management strategies[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(1): 21-45.
- [4]牛远, 石沁荣, 吴冉迪, 等. 外源海藻糖和氯化胆碱对油菜苗期干旱胁迫的缓解效应分析[J]. 云南农业大学学报(自然科学), 2021,36(5):753-761,798.
- [5]刘义国, 万雪洁, 张艳, 等. 干旱锻炼对小麦幼苗期形态指标的影响[J]. 西北农业学报, 2022,31(2):157-163.
- [6]珊丹, 郭建英, 荣浩, 等. 施肥对干旱半干旱草原区金属矿山尾矿库土壤质量的影响及其评价[J]. 安全与环境工程, 2022,29(3):208-217.
- [7]方紫雯. 三种外源物质对凤丹干旱胁迫的缓解效应及机理研究[D]. 扬州:扬州大学,2021.
- [8]田梦好. 复硝酚钠对谷子生长发育及产量的影响[D]. 太谷:山西农业大学,2022.
- [9]刘娜. 苯胺胺酸对豇豆生长发育调控作用的研究[D]. 杨凌:西北农林科技大学,2017.
- [10]李震, 戴玲玲, 邓海玲, 等. 碧护缓解低温对草坪草萌发及苗期胁迫的作用[J]. 草地学报, 2023,31(3):804-812.
- [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.
- [12]张东, 刘艳, 张晗, 等. 甘草叶片形态结构和光合作用对干旱胁迫的响应[J]. 植物研究, 2021,41(3):449-457.
- [13]路秉翰, 卓定龙, 刘晓洲, 等. 干旱胁迫对红玉姜黄光合和叶绿素荧光参数的影响[J]. 热带农业科学, 2022,42(6):11-16.
- [14]付佳琳. 北方草原植物叶片光合色素对干旱的响应[D]. 沈阳:沈阳大学,2021.
- [15]Abid G, Ouertani R N, Jebara S H, et al. Alleviation of drought stress in faba bean (*Vicia faba* L.) by exogenous application of β -aminobutyric acid (BABA) [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2020,26(6):1173-1186.
- [16]李小玲, 贺广祥, 华智锐. 外源渗透调节物质对黄芩幼苗抗旱能力的影响研究[J]. 江西农业学报, 2021,33(11):20-27.
- [17]米超, 赵艳宁, 刘自刚, 等. PEG 模拟水分胁迫下白菜型冬油菜芽期根系特征及抗旱性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2017,35(5):229-235.
- [18]Bhuiyan T F, Ahamed K U, Nahar K, et al. Mitigation of PEG-induced drought stress in rapeseed (*Brassica rapa* L.) by exogenous application of osmolytes [J]. Biocatalysis and Agricultural Biotechnology, 2019,20:101197.
- [19]马明莉, 周文波, 钟雪梅, 等. 外源水杨酸对干旱胁迫下甘蓝型油菜幼苗生理特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2015,43(6):84-87.
- [20]李光菊, 李璇, 王倩, 等. 不同外源物质浸种对干旱胁迫下巴马火麻种子萌发的影响研究[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2018,40(5):1034-1041.
- [21]贺立恒, 郝杰, 史敏莉, 等. 烯效唑浸种对干旱胁迫下燕麦种子萌发及幼苗抗旱生理特性的影响[J]. 灌溉排水学报, 2022,41(10):19-25.
- [22]李光菊. 外源物质对大麻萌发期和苗期干旱的缓解效应研究[D]. 昆明:云南大学,2018.
- [23]万林, 李张开, 李素, 等. 外源独脚金内酯对油菜苗期干旱胁迫的缓解效应[J]. 中国油料作物学报, 2020,42(3):461-471.
- [24]闫艳华. 不同外源激素处理对曼陀罗种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 北方园艺, 2020(23):115-122.
- [25]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.
- [26]姜珊, 刘佳, 曹亮, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下红小豆幼苗生长和产量的影响[J]. 作物杂志, 2023(4):202-209.
- [27]杨妮, 李逸民, 李静文, 等. 外源 5-ALA 对干旱胁迫下茶树叶绿素合成和荧光特性及关键酶基因表达的影响[J]. 茶叶科学, 2022,42(2):187-199.
- [28]侯林欣, 吕强, 黄明, 等. 不同温度水杨酸引发对干旱胁迫下玉米种子发芽及幼苗生理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2021,37(19):13-21.
- [29]Liu L, Li D, Ma Y L, et al. Combined application of arbuscular mycorrhizal fungi and exogenous melatonin alleviates drought stress and improves plant growth in tobacco seedlings[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2021,40(3):1074-1087.
- [30]温琦, 赵文博, 张幽静, 等. 植物干旱胁迫响应的研究进展[J]. 江苏农业科学, 2020,48(12):11-15.
- [31]蒋朝维, 陶轩, 杨雷, 等. 低温胁迫下 2 个烤烟品种幼苗对外源亚精胺的生理响应[J]. 江苏农业科学, 2024,52(2):73-78.
- [32]Khan I, Awan S A, Ikram R, et al. Effects of 24-epibrassinolide on plant growth, antioxidants defense system, and endogenous hormones in two wheat varieties under drought stress [J]. Physiologia Plantarum, 2021,172(2):696-706.
- [33]刘硕, 樊仙, 李如丹, 等. 4 个甘蔗主栽品种对干旱胁迫的生理响应[J]. 热带作物学报, 2022,43(9):1812-1823.
- [34]单长卷, 张妍妍, 代海芳, 等. 硝酸镧对干旱下冬小麦幼苗抗坏血酸和谷胱甘肽代谢的影响[J]. 河南科技学院学报(自然科学版), 2020,48(3):1-5.