

甲哌鎇缓解大豆幼苗叶片干旱胁迫的生理效应

侯晓敏¹ 申惠波¹ 董守坤² 闫锋¹ 董扬¹ 赵富阳¹ 李清泉¹ 左月桃³

(¹黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院, 161006, 黑龙江齐齐哈尔; ²东北农业大学农学院, 150030, 黑龙江哈尔滨;

³青岛滕润翔检测评价有限公司, 266109, 山东青岛)

摘要 为探究甲哌鎇(DPC)对干旱胁迫下大豆幼苗的缓解作用,以大豆品种黑农44(HN44)为试验材料,叶面喷施不同浓度DPC(0、100、300、500、700 mg/L),用15%PEG-6000模拟干旱胁迫。结果表明,与干旱胁迫处理(S0)相比,喷施DPC处理提高了干旱胁迫下大豆叶片中超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性,提高了相对含水量(RWC)、脯氨酸、可溶性糖、生长素(IAA)、赤霉素(GA)、玉米素(ZA)含量和PSII光化学量子效率(F_v/F_m)、PSII潜在光化学效率(F_v/F_0)、表观电子传递速率(ETR)及非光化学猝灭系数(NPQ),而丙二醛(MDA)和脱落酸(ABA)含量显著下降。ABA含量随DPC浓度的增加呈先降后升的趋势,IAA在S700处理、GA和ZA在S500处理时含量最高。在第9天,与S0处理相比,S300处理的SOD、POD、CAT和APX活性分别提高了14.47%、67.60%、111.03%和83.35%。 F_v/F_m 、 F_v/F_0 和ETR均在S300处理下达到最大值,与S0处理相比,分别上升了8.30%、19.70%和32.30%。NPQ在S300处理下达到最小值,与S0处理相比下降了20.80%。适宜浓度的DPC可以通过提高植株抗氧化酶活性、提高渗透调节物质含量、抑制膜脂氧化、增加内源激素含量等方式缓解干旱胁迫对大豆生长发育的影响。

关键词 大豆; DPC; 干旱胁迫; 内源激素; 抗氧化酶

大豆不仅是重要的油料作物,也是植物蛋白的主要来源之一^[1]。近年来,我国干旱灾害频发,大豆出现缺苗、苗弱、生长延迟等现象,严重影响了大豆稳产高产,导致大豆生产安全风险增加。干旱对作物产量的影响已经引起了广泛关注。相关统计^[2]表明,干旱对植株造成的损失在所有非生物胁迫中占第一位。大豆在干旱胁迫下不但会对其植株形态、抗氧化酶及光合作用等方面产生影响,还会导致内源激素紊乱。秦彬等^[3]采用PEG-6000模拟干旱胁迫的方法发现,干旱胁迫抑制了大豆种子萌发,发芽率和鲜重明显降低。Wang等^[4]研究发现,干旱使植物抗氧化酶活性升高,渗透调节物质积累,总抗氧化能力提高。干旱胁迫会导致植物叶绿素荧光参数发生变化,破坏植物的光系统,造成光合代谢途径紊乱,使植物体内的叶绿体结构改变、叶绿素含量减少、光合效率下降。金祎婷等^[5]研究表明,干旱可影响燕麦叶绿素荧光参数,随着干旱程度的增加和时间的延长,干旱胁迫导致表观电子传递速率(ETR)和PSII光化学量子效率(F_v/F_m)整体呈下降趋势。随着全球气候变暖,全球大部分

地区将遭受更为严重且广泛的干旱灾害,严重威胁区域农业生产和可持续发展^[6-8]。因此,提高大豆的抗旱性具有重要意义。

目前关于抗旱的研究较多,葛欣等^[9]研究表明,24-表芸苔素内酯(BR)与胺鲜脂(DA-6)复配烯效唑能明显提高大豆幼苗的抗旱能力,改善光合作用,促进幼苗生长发育,有利于大豆产量的提高。研究^[10]发现,在干旱胁迫下外源褪黑素可以提高抗坏血酸-谷胱甘肽(AsA-GSH)循环的效率,调节关键酶活性,从而缓解干旱对植株的伤害。张秀玲等^[11]研究表明,喷施水杨酸明显提高了超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性和渗透调节物质含量,抑制了丙二醛(MDA)的积累,减轻干旱胁迫对大豆造成的伤害。因此,使用植物生长调节剂改善植物生长并提高抗逆性是一种可行方式。

甲哌鎇(DPC)是较温和的植物生长调节剂,在调节植物生长发育方面起关键作用^[12],可以抑制茎叶徒长,塑造理想株型,提高光照利用效率,其作用机理是降低赤霉素的浓度,扰乱细胞正常活

作者简介:侯晓敏,主要从事杂粮作物遗传育种及栽培研究, E-mail: houxiaomin2021@163.com

申惠波为通信作者,主要从事旱作农业研究, E-mail: shenhuibo@163.com

基金项目:黑龙江省农业科学院创新工程资助项目(CX23GG11)

收稿日期:2023-09-06;修回日期:2024-05-22;网络出版日期:2024-10-28

动,从而缩短节间,降低株高^[13]。王玺越^[14]研究发现,干旱胁迫下施用 DPC 可以显著提升大豆叶片、茎秆、叶柄和根系的干物质积累量,株高显著降低,根冠比下降。罗立津等^[15]研究发现,DPC 处理对甜椒幼苗生长和抗寒性有显著调节作用,SOD 和过氧化氢酶(CAT)活性升高,脱落酸(ABA)、脯氨酸和可溶性糖含量进一步积累,从而减轻低温胁迫对细胞质膜的伤害,表现出相对电导率和 MDA 含量降低。张特等^[16]发现,DPC 处理可以提高干旱条件下叶片光合速率,促进光合物质积累,进而提高产量。DPC 在棉花和花生上应用广泛^[17-18],而在大豆上的研究还鲜有报道。因此,本试验探究 DPC 处理对大豆抗氧化酶活性、膜脂过氧化作用、光合特性及内源激素的作用机理,为大豆抗逆高效栽培提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验大豆品种为黑农 44 (HN44),由东北农业大学农学院提供。DPC (纯度>99%)由河北国欣诺农生物技术有限公司提供。用于模拟干旱胁迫的聚乙二醇(PEG-6000)购于济南硕鼎商贸有限公司。

1.2 试验方法

试验于 2022-2023 年在黑龙江省农业科学院齐齐哈尔分院试验基地(123°41'E, 47°15'N)防雨棚内进行,采用沙培盆栽的方式,选用高度 30 cm、直径 28 cm 的塑料桶,在桶底部钻 6 个直径 0.5 cm 小孔并铺上纱网,选取籽粒饱满、大小一致、无病虫害的大豆种子播种,每盆保苗 4 株。播种后至对生真叶完全展开前每日淋浇 1 次水,每次 500 mL;对生真叶展开后每日淋浇 1 次 Hoagland 营养液,每次 500 mL。

将 DPC 溶于 10 L 蒸馏水中配制成溶液,装于有刻度线的电动喷雾器中,在苗期 V3 期将 DPC 溶液均匀喷施在每个处理植株叶面上,平均每株喷施 1 L 溶液,3 d 后进行干旱胁迫,使用含 15% PEG-6000 的营养液进行干旱胁迫处理,试验共设 6 个处理,分别为 CK (正常水分条件,每日浇淋 1 次 Hoagland 营养液)、S0 (干旱胁迫处理,每日浇淋 1 次含 15% PEG-6000 的 Hoagland 营养液)、S100 (干旱胁迫处理+100 mg/L DPC)、S300 (干旱胁迫

胁迫处理+300 mg/L DPC)、S500 (干旱胁迫处理+500 mg/L DPC)和 S700 (干旱胁迫处理+700 mg/L DPC);每个处理分别在干旱处理后 3、6、9 和 12 d 取样,每个处理每次取样 6 盆,共取 4 次。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 抗氧化酶活性及膜脂过氧化程度 采用烘干称量法^[19]测定叶片相对含水量(RWC),采用硫代巴比妥酸法测定 MDA 含量,采用 NBT 法测定 SOD 活性,采用愈创木酚法测定 POD 活性,采用比色法测定 CAT 和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性。

1.3.2 渗透调节物质含量 采用酸性茚三酮法测定脯氨酸含量,采用蒽酮法测定可溶性糖含量。

1.3.3 内源激素 采用高效液相色谱法^[20]测定赤霉素(GA)、生长素(IAA)、细胞分裂素(ZA)和 ABA 含量。高效液相色谱仪为美国 Waters ACQUITY Arc 生产。

1.3.4 叶绿素荧光参数 采用多功能植物测量仪(北京慧诺瑞德科技有限公司,型号 MultispeQV2.0)对大豆干旱胁迫第 12 天完全展开叶进行光合指标的测定,在上午阳光充足时取样,避开主叶脉,测定第 3 片完全展开叶的叶绿素荧光参数。每个处理测量 6 次。暗适应 30 min 后进行测定,测定指标包括 PSII 潜在光化学效率(F_v/F_o)、非光化学猝灭系数(NPQ)、 F_v/F_m 和 ETR。

1.4 数据处理

用 Excel 2010 进行数据处理,用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析和显著性检验,用 OriginPro 2018 作图。

2 结果与分析

2.1 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片抗氧化酶活性的影响

2.1.1 对 SOD 活性的影响 由表 1 可知,随着干旱胁迫天数的增加,各处理的 SOD 活性整体呈升高变化趋势。除取样时期 3 d 外,与 S0 相比,S100、S300、S500 和 S700 的 SOD 活性显著增加,第 9 天时,S300 处理叶片的 SOD 活性最高,较 S0 提高了 14.47%,显著高于 CK 和 S0 处理。说明 DPC 处理可以增强 SOD 活性,从而缓解干旱胁迫对大豆的过氧化损伤。

2.1.2 对 POD 活性的影响 如表 2 所示,干旱胁迫

表 1 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 SOD 活性的影响				
Table 1 Effects of DPC on SOD activity in soybean leaves under drought stress				U/g
处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	1.29±0.02b	1.32±0.01d	1.34±0.04d	1.42±0.04e
S0	1.27±0.04b	1.39±0.01c	1.52±0.08c	1.51±0.03d
S100	1.33±0.04ab	1.46±0.02b	1.69±0.02a	1.84±0.06b
S300	1.38±0.01a	1.54±0.01a	1.74±0.06a	1.96±0.04a
S500	1.35±0.03ab	1.48±0.03ab	1.72±0.03a	1.95±0.04a
S700	1.32±0.02ab	1.45±0.02b	1.60±0.02b	1.71±0.03c

同列不同字母代表处理间达到 5% 显著差异水平，下同。
Different letters in the same column indicate 5% significant differences among treatments, the same below.

迫第 6~9 天时，与 CK 处理相比，S0 处理的 POD 活性明显上升，分别增加了 12.25% 和 13.50%。第 9 天时，随着 DPC 浓度的增加，POD 活性呈先上

升后下降的趋势，与 S0 处理相比，S100~S700 处
理分别显著提高了 31.20%、67.60%、58.90% 和
13.40%。

表 2 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 POD 活性的影响				
Table 2 Effects of DPC on POD activity in soybean leaves under drought stress				U/g
处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	428.37±16.91c	491.66±36.91c	767.64±24.23e	511.62±21.29d
S0	362.70±39.17d	551.91±13.99c	871.27±19.81d	496.76±24.57d
S100	605.87±12.42bc	744.84±58.33b	1143.24±38.37b	696.95±19.56b
S300	666.86±15.43a	994.67±99.07a	1460.22±57.36a	827.06±3.66a
S500	656.79±76.33b	795.72±32.57b	1384.09±36.77a	754.03±36.46ab
S700	567.71±29.60bc	634.97±13.76bc	988.26±61.22c	575.17±27.76c

2.1.3 对 CAT 活性的影响 如表 3 所示，DPC 处
理提高了干旱胁迫下大豆叶片的 CAT 活性，S300

处理在 3~9 d 均为最大，与 S0 处理相比，分别提
高了 206.34%、80.18% 和 111.03%，差异达到显著

表 3 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 CAT 活性的影响				
Table 3 Effects of DPC on CAT activity in soybean leaves under drought stress				U/g
处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	78.57±7.07d	139.28±10.59c	226.64±27.50c	262.46±18.13a
S0	46.35±0.60c	191.01±16.27bc	307.66±12.93bc	246.45±16.17ab
S100	107.53±8.19b	289.92±15.82a	373.58±29.17b	176.21±6.14cd
S300	141.99±4.06a	344.17±24.46a	649.25±17.95a	244.17±20.41ab
S500	138.71±0.93a	294.13±9.42a	590.19±43.67a	209.54±8.99bc
S700	86.34±5.76c	219.80±27.97b	353.98±22.00b	150.27±10.63d

水平。说明喷施 DPC 可以更好地调节大豆体内
CAT 活性，从而应对外界不良环境。

2.1.4 对 APX 活性的影响 从表 4 可以看出，干
旱胁迫诱导 APX 活性明显增强，第 6~9 天上升幅
度较大，与 CK 处理相比，S0 处理分别提高了
12.16% 和 37.02%，而在干旱胁迫后期（12 d）下
降幅度相对较大，降低了 24.17%。不同浓度 DPC
处理的 APX 活性均有不同程度增长，其中 APX
活性在整个取样时期的 S300 处理下均达到峰值，
与 S0

表 4 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 APX 活性的影响				
Table 4 Effects of DPC on APX activity in soybean leaves under drought stress				U/g
处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	5.16±0.18b	5.59±0.30c	5.70±0.23d	6.04±0.44b
S0	4.00±0.20c	6.27±0.32c	7.81±0.25c	4.58±0.33c
S100	5.34±0.26b	8.23±0.17b	8.99±0.16c	7.36±0.12a
S300	6.77±0.33a	10.33±0.75a	14.32±0.84a	7.65±0.20a
S500	5.80±0.45b	8.77±0.32b	12.65±0.24b	7.62±0.12a
S700	5.28±0.23b	6.83±0.36c	8.69±0.15c	6.75±0.39ab

处理相比，分别提高了 69.25%、64.75%、83.35% 和 67.03%，差异均达显著水平。说明喷施 DPC 能够提高干旱胁迫下大豆幼苗叶片中 APX 活性。

2.2 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片水分含量的影响

由表 5 可知，随着干旱胁迫时间的延长，各处理大豆叶片相对含水量呈递减趋势，与 CK 相比，S0 处理下大豆幼苗叶片的 RWC 显著降低，在不同取样时期分别下降 6.14%、12.62%、24.62% 和 25.28%。与 S0 处理相比，喷施 DPC 显著增加了大豆幼苗叶片的 RWC。其中，在同一取样时期条件下，4 个 DPC 浓度下大豆叶片的 RWC 均表现为 S100>S500>S300>S700。与 S0 处理相比，在不同取样时期 S300 处理分别上升 1.43%、2.14%、10.20% 和 13.93%。由此可见，干旱胁迫下喷施 DPC 可以缓解大豆幼苗的失水。

表 5 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片水分含量的影响
Table 5 Effects of DPC on leaf water contents of soybean under drought stress %

处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	69.25±5.24a	63.61±8.10a	65.69±0.85a	60.61±3.12a
S0	65.00±4.22a	55.58±2.27b	49.52±5.38b	45.29±2.55b
S100	68.86±1.58a	62.18±1.79a	58.01±6.10ab	57.28±4.53a
S300	65.93±3.01a	56.77±2.01b	54.57±2.96ab	51.60±2.51ab
S500	68.49±3.01a	61.37±2.75a	56.17±4.88ab	52.30±6.60ab
S700	65.40±2.43a	55.38±3.45b	51.50±2.07b	50.91±3.97ab

2.3 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片 MDA 含量的影响

从表 6 可见，随干旱胁迫时间的延长，各处理的 MDA 含量变化均呈递增趋势，且均在第 12 天达到峰值。与 CK 相比，S0 处理的 MDA 含量明显增加，不同取样时期下分别增加 25.78%、265.68%、123.84% 和 104.48%。第 12 天 MDA 含量表现为 CK<S300<S500<S100<S700<S0，与

表 6 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 MDA 含量的影响
Table 6 Effects of DPC on MDA contents in soybean leaves under drought stress μmol/g

处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	8.38±0.57a	8.42±0.53d	15.27±1.51c	20.33±0.84c
S0	10.54±0.39a	30.79±0.46a	34.18±1.10a	41.57±1.56a
S100	9.56±1.99a	19.42±1.27bc	32.17±1.24ab	34.02±1.65ab
S300	8.53±0.46a	16.68±1.43c	22.86±1.55b	27.53±1.54b
S500	8.76±0.38a	18.23±0.41c	32.16±1.50ab	32.69±2.96ab
S700	10.26±1.03a	22.62±1.89b	34.07±3.13a	35.19±2.60ab

S0 处理相比，S100、S300、S500 和 S700 处理分别降低 18.16%、33.77%、21.36% 和 15.35%，这说明施用 DPC 可以缓解干旱胁迫对膜脂结构的损害。

2.4 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片渗透调节物质含量的影响

由表 7 可知，与 CK 相比，干旱胁迫下脯氨酸含量不断增加，3~12 d 下 S0 处理分别平均增加了 13.31%、82.80%、126.11% 和 125.25%。喷施 DPC 后脯氨酸含量明显升高，在干旱第 12 天时，S100、S300、S500、S700 脯氨酸含量与 S0 处理相比分别增加了 54.52%、59.94%、57.51% 和 54.02%。由此可知，干旱胁迫下 DPC 可以促进大豆叶片中脯氨酸的积累，缓解干旱胁迫对大豆细胞膜的伤害。

表 7 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片脯氨酸含量的影响
Table 7 Effects of DPC on proline contents in soybean leaves under drought stress μg/g

处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	13.52±0.17f	15.41±0.61d	18.57±0.68d	25.71±0.83c
S0	15.32±0.10e	28.17±1.63cd	41.99±0.10c	57.89±2.79b
S100	17.97±0.51c	35.92±3.29bc	66.29±0.51ab	89.45±2.53a
S300	23.11±0.10a	50.47±4.79ab	79.56±0.70a	92.59±4.38a
S500	20.31±0.02b	49.09±2.48a	77.06±0.17ab	91.18±3.47a
S700	16.29±0.50d	25.52±3.74cd	62.20±0.50b	89.16±3.24a

从表 8 可知，随着干旱胁迫时间的延长，各处理可溶性糖的含量均呈上升的趋势，除 S0 处理，其余处理均在第 12 天达到最大值。与 CK 处理相比，第 6~12 天 S0 处理的可溶性糖含量分别提高了 5.30%、13.43%、6.34%。喷施 DPC 后可溶性糖含量显著提升，第 12 天时，可溶性糖含量随着 DPC 浓度的升高呈先上升后下降的趋势，S300 处理时可溶性糖含量最大，与 S0 处理相比，升高了 29.80%，处理间差异显著。

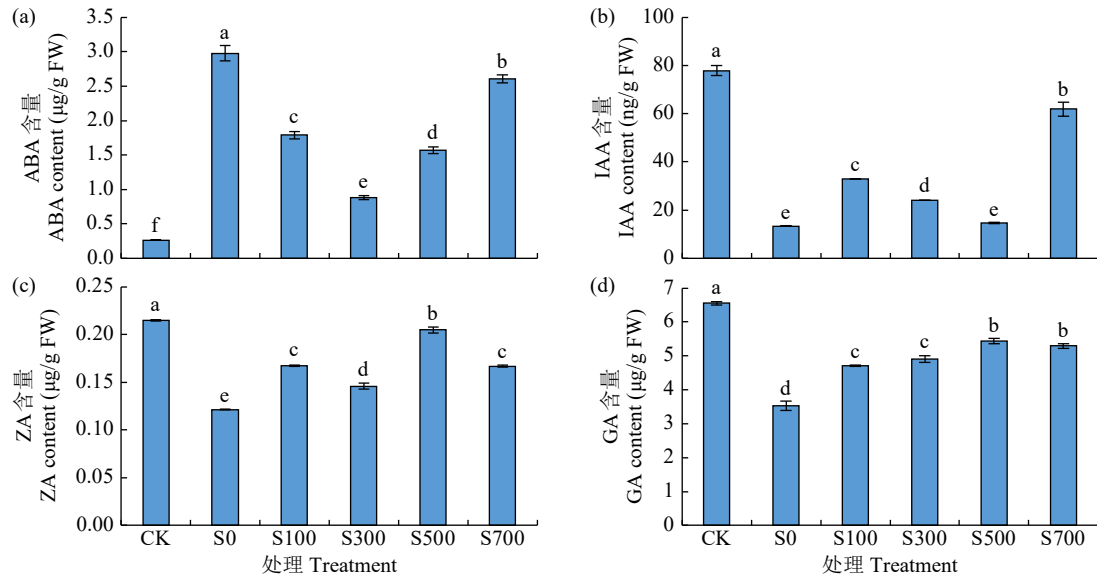
表 8 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片可溶性糖含量的影响
Table 8 Effects of DPC on soluble sugar contents in soybean leaves under drought stress mg/g

处理 Treatment	取样时期 Sampling time			
	3 d	6 d	9 d	12 d
CK	1.29±0.02b	1.32±0.01d	1.34±0.04d	1.42±0.04e
S0	1.27±0.04b	1.39±0.01c	1.52±0.08c	1.51±0.03d
S100	1.33±0.04ab	1.46±0.02b	1.69±0.02a	1.84±0.06b
S300	1.38±0.01a	1.54±0.01a	1.74±0.06a	1.96±0.04a
S500	1.35±0.03ab	1.48±0.03ab	1.72±0.03a	1.95±0.04a
S700	1.32±0.02ab	1.45±0.02b	1.60±0.02b	1.71±0.03c

2.5 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片内源激素的影响

由图 1 可知, 干旱胁迫导致 ABA 含量显著上升, IAA、ZA、GA 含量显著下降, 与 CK 处理相比, ABA 含量平均提高了 10.40 倍, S0 处理达到峰值; IAA、ZA、GA 分别平均降低了 82.80%、43.60%、46.20%。喷施 DPC 可以调节内源激素的动态平衡, ABA 含量随着 DPC 浓度的增加呈现先

降低后升高的趋势, 与 S0 处理相比, S300 处理降低了 70.30%, ZA 和 GA 均在 S500 处理时上升幅度较大, 分别提高了 68.80%和 54.30%, 而 IAA 含量在 S700 处理时达到最大值, 提高了 3.60 倍, 表明喷施 DPC 处理对大豆幼苗叶片内 IAA、ZA 和 GA 含量具有显著提高作用, 从而抵抗干旱胁迫对其自身生理代谢的破坏。



不同字母代表处理间达到 5% 显著差异水平, 下同。

Different letters indicate 5% significant differences among treatments, the same below.

图 1 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片 ABA、IAA、ZA 和 GA 含量的影响

Fig.1 Effects of DPC on ABA, IAA, ZA and GA contents in soybean leaves under drought stress

2.6 DPC 对干旱胁迫下大豆叶片叶绿素荧光参数的影响

如图 2 所示, 干旱胁迫 (S0) 导致 F_v/F_m 、 F_v/F_o 、

ETR 显著下降, 与 CK 处理相比分别下降 13.81%、32.00%、16.60%和 23.40%, 而 NPQ 显著上升, 与 CK 处理相比上升了 32.00%, 各处理均存在显著性

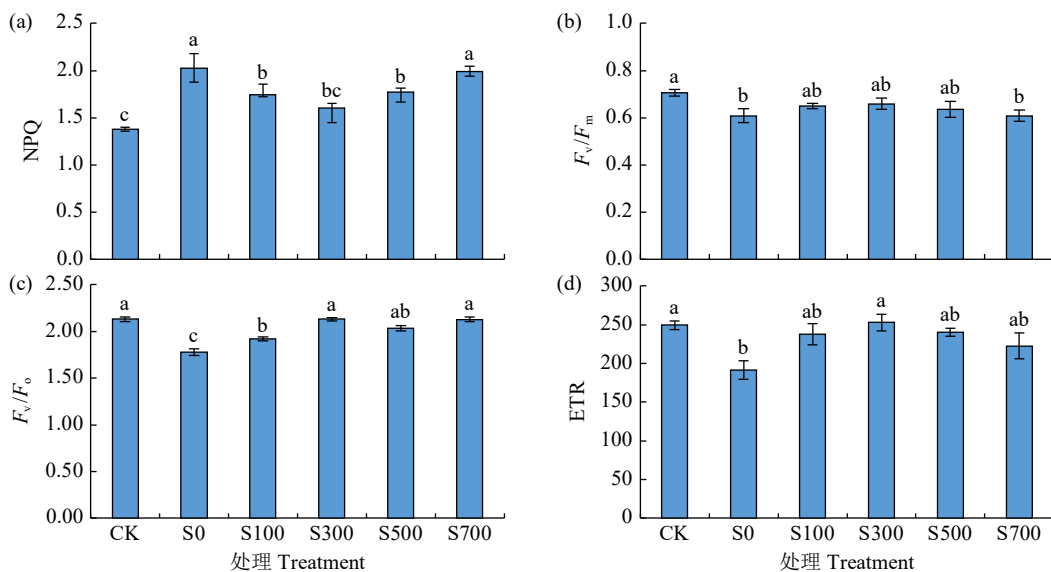


图 2 干旱胁迫下 DPC 对大豆叶片叶绿素荧光参数的影响

Fig.2 Effects of DPC on chlorophyll fluorescence parameters of soybean leaves under drought stress

差异,表明干旱胁迫影响了大豆幼苗叶片叶绿素荧光参数。而喷施 DPC 处理对 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 ETR 均有不同程度的提升,对 NPQ 则显著下降,其中 F_v/F_m 、ETR 随 DPC 浓度的增加均呈现先升高后下降的趋势,并均在 S300 处理达到峰值,与 S0 处理相比, S300 处理的 F_v/F_m 、ETR 分别显著增加 8.30% 和 32.30%。而 F_v/F_o 则表现为 S300=S700>S500>S100, NPQ 随 DPC 浓度的增加呈现先下降后升高的趋势, S300 处理时达到最小值。由此可见, DPC 处理减轻了干旱胁迫对光合作用的抑制。

3 讨论

干旱胁迫导致大豆生长受到抑制。DPC 作为一种植物生长延缓剂,在调节植物生长发育方面起关键作用^[21]。随着研究的不断深入, DPC 在植物生产中越来越多的功能被发掘。不仅提高了高羊茅幼苗 POD 活性,促进幼苗生长,增强幼苗的抗逆性^[22],还能提高干旱胁迫下甘薯根系的 POD 活性,降低甘薯根系的 MDA 含量^[23]。本研究,干旱胁迫下大豆叶片 SOD、POD、CAT 和 APX 活性均有所增加。而干旱胁迫下施用 DPC 后,抗氧化酶活性得到了进一步的提高,其中 S300 处理提升幅度要明显大于其他处理。这说明适宜浓度的 DPC 可能会通过激发自身抗氧化系统相关的调控基因清除体内积累过多的活性氧,从而缓解细胞生物膜的损伤,降低 MDA 含量。在 Lü 等^[24]研究中,抗氧化酶活性与干旱胁迫程度具有一定的相关性,在一定范围内抗氧化酶活性随着胁迫程度加深而升高。说明干旱胁迫下,植物抗旱性与自身维持活性氧平衡代谢的能力有关。植株在干旱处理后,体内的活性氧自由基含量增加,短时间内抗氧化酶活性迅速上升,而在施加外源 DPC 后,抗旱性和 ROS 清除能力进一步提高,在体内的活性氧水平下降到动态平衡时,抗氧化酶的活性将逐渐下降。

渗透调节是作物在逆境条件下的主要生理活动之一,本研究发现,干旱胁迫使脯氨酸和可溶性糖含量增加,而 300 mg/L 的 DPC 可以显著提升脯氨酸和可溶性糖含量,与尉欣荣等^[25]对于干旱胁迫下褪黑素调控黑麦草幼苗中脯氨酸的变化结果

一致。说明 DPC 能维持稳定的细胞渗透势,防止细胞原生质过度失水,从而缓解水分亏缺导致渗透胁迫。本试验中, HN44 在 S300 处理下可有效缓解干旱胁迫下大豆的生长发育,由于不同品种耐旱性不同,对 DPC 的敏感程度也不同,因此对于其他品种的最适浓度还不能确定,还需要进一步研究。

植株遭受干旱胁迫直接导致光合作用能力和叶绿素荧光参数下降,随干旱胁迫时间的延长植株叶片含水量呈下降趋势^[26],这与本研究结果一致。PSII 是植物进行光合作用的重要场所,其中 F_v/F_o 和 F_v/F_m 是光化学反应的 2 个重要参数^[27]。本研究发现,干旱胁迫显著降低了 HN44 大豆的 F_v/F_m 和 F_v/F_o , NPQ 显著上升,这是叶片失水导致大豆叶片 PSII 结构被破坏,这与前人^[28]的研究结论一致。秦江南等^[29]研究表明, DPC 处理能有效降低 PSII 以热能形式消耗吸收的光能,显著提高 F_v/F_m 和 ETR,同时有研究^[30]发现在干旱胁迫下 DPC 可以提高棉花叶片的 F_v/F_m 和 F_v/F_o 。在本研究中,干旱胁迫下喷施 DPC 后大豆幼苗的 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 ETR 均显著增加, NPQ 则显著降低,同时, ETR 随 DPC 浓度的增加呈先升后降的趋势,并在 S300 处理最大,其原因是 DPC 能提升干旱胁迫下大豆幼苗光系统反应中心的光化学活性,减少 PSII 光合机构的氧化损伤,从而缓解干旱胁迫对大豆幼苗造成的光抑制。

内源激素是植物生长发育的重要调节物质,当遭受逆境胁迫时,内源激素含量会呈现复杂的变化趋势来调节植物的生理机能^[31]。本研究中,干旱胁迫处理的大豆叶片 IAA、GA 和 ZR 含量显著低于 CK 处理,而 ABA 含量则显著高于 CK 处理。这与李冬等^[32]研究干旱胁迫对烟草内源激素的影响结果一致,这表明干旱胁迫会降低大豆叶片细胞代谢强度,打破内源激素的平衡从而抑制大豆幼苗的生长。已有研究^[33]证实,喷施 DPC 能明显提高 GA 和 IAA 含量,且 DPC 具有调节植物体内 GA 生物合成和信号传导的作用。本试验结果表明,干旱胁迫下喷施 DPC, IAA、GA 和 ZR 含量显著增加, IAA 和 GA 含量分别在 500 和 700 mg/L 时较高, ZA 含量变化不大, ABA 含量则显著下降,说明 DPC 调控植物体内源激素的代谢水平,缓解

干旱胁迫对大豆幼苗的损伤。因此, 推测 DPC 可以通过间接影响 IAA、GA、ZR 和 ABA 含量共同调控大豆植株应答干旱胁迫, 有提高植物耐旱性的作用, 但在干旱胁迫下 DPC 对大豆植株整个生育期的作用尚未清晰, 有待进一步试验研究。

4 结论

干旱胁迫影响大豆正常的生长发育, 而施用 DPC 可有效缓解干旱胁迫对大豆生长的抑制作用。DPC 可以增强大豆植株 SOD、POD、CAT 和 APX 活性以及脯氨酸和可溶性糖含量, 降低 MDA 和 ABA 含量, 提高 IAA、ZA、GA 含量, 同时 DPC 处理可以显著提高 F_v/F_m 、 F_v/F_o 和 ETR, 降低 NPQ, 改善了光合特性, 从而保护光合系统免遭氧化损伤。因此, DPC 能有效缓解干旱胁迫, 改善大豆幼苗的生长发育。

参考文献

- [1] Vianna G R, Cunha N B, Rech E L. Soybean seed protein storage vacuoles for expression of recombinant molecules. *Current Opinion in Plant Biology*, 2023, 71: 102331.
- [2] 王兴荣, 张彦军, 陈光荣, 等. 干旱胁迫对大豆光合、产量及品质的影响. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(2): 150-159.
- [3] 秦彬, 张明聪, 何松榆, 等. 褪黑素浸种对大豆种子萌发过程中干旱胁迫的缓解效应. *干旱地区农业研究*, 2020, 38(2): 192-198.
- [4] Wang X Y, Wu Z H, Zhou Q, et al. Physiological response of soybean plants to water deficit. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 809692.
- [5] 金炜婷, 刘文辉, 刘凯强, 等. 全生育期干旱胁迫对‘青燕 1 号’燕麦叶绿素荧光参数的影响. *草业学报*, 2022, 31(6): 112-126.
- [6] Dai A. Erratum: Increasing drought under global warming in observations and models. *Nature Climate Change*, 2013, 3(2): 171.
- [7] Eini M R, Javadi S, Delavar M, et al. Development of alternative SWAT-based models for simulating water budget components and streamflow for a karstic-influenced watershed. *Catena*, 2020, 195: 104801.
- [8] Yang H C, Feng X M, Wang H X, et al. Long time-series variation of crop yield under drought stress and drought vulnerability curves in Songnen Plain, Northeast China. *Ecological Indicators*, 2023, 154: 110624.
- [9] 葛欣, 任慧林, 陈训琦, 等. BR 与 DA-6 复配 S₃₃₀₇ 拌种对苗期干旱胁迫下大豆生长和产量的影响. *黑龙江农业科学*, 2022 (12): 38-43, 48.
- [10] 杜昕, 李博, 毛鲁泉, 等. 褪黑素对干旱胁迫下大豆产量及 AsA-GSH 循环的影响. *作物杂志*, 2022(1): 174-178.
- [11] 张秀玲, 孙颖, 孟岩, 等. 干旱胁迫下外源水杨酸对野生大豆生理特性的影响. *中国野生植物资源*, 2022, 41(1): 9-12, 19.
- [12] 范希峰, 田晓莉, 李召虎, 等. 应用 ICP-MS 研究甲哌鎇对转 Bt 基因抗虫棉籽棉中无机元素含量的影响. *光谱学与光谱分析*, 2009, 29(4): 1119-1122.
- [13] Wang L, Mu C, Du M W, et al. The effect of mepiquat chloride on elongation of cotton (*Gossypium hirsutum* L.) internode is associated with low concentration of gibberellic acid. *Plant Science*, 2014, 225: 15-23.
- [14] 王玺越. 甲哌鎇对大豆苗期干旱胁迫的调控效应. 哈尔滨: 东北农业大学, 2023.
- [15] 罗立津, 徐福乐, 洪淑珠, 等. 甲哌鎇对甜椒幼苗抗寒性的诱导作用研究. *农药学报*, 2010, 12(2): 142-148.
- [16] 张特, 赵强, 李广维. 缩节胺对棉花生长发育影响研究进展. *江苏农业科学*, 2021, 49(18): 14-18.
- [17] 赵文超, 杜明伟, 黎芳, 等. 应用缩节胺 (DPC) 调控棉花株型的定位定量效应研究. *作物学报*, 2019, 45: 1059-1069.
- [18] 石峰, 李海江, 孙孝贵, 等. 基于缩节胺调控的免打顶棉花群体结构及产量分析. *新疆农业科学*, 2021, 58(11): 1990-1999.
- [19] 陈少瑜, 郎南军, 李吉跃, 等. 干旱胁迫下 3 树种苗木叶片相对含水量、质膜相对透性和脯氨酸含量的变化. *西部林业科学*, 2004, 33(3): 30-33, 41.
- [20] 韩爱民, 杨江山, 张立梅, 等. 外源 γ -氨基丁酸对葡萄光合色素、内源激素和品质的影响. *甘肃农业大学学报*, 2023, 58(2): 83-92.
- [21] Zhang X, Feng T Q, Chen Z, et al. Exogenous hormones affect Bt protein content of two Bt cotton cultivars. *Agronomy Journal*, 2019, 111(6): 3076-3083.
- [22] 韩静, 张志勇, 汤菊香, 等. 缩节安与 CaCl₂ 复配剂对高羊茅幼苗生长的影响. *湖北农业科学*, 2009, 48(3): 657-659.
- [23] 杜召海, 汪宝卿, 解备涛, 等. 模拟干旱条件下植物生长调节剂对夏薯苗期根系生理生化特性的影响. *西北农业学报*, 2014, 23(10): 97-104.
- [24] Lü X P, Gao H J, Zhang L, et al. Dynamic responses of Haloxylon ammodendron to various degrees of simulated drought stress. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2019, 139: 121-131.
- [25] 尉欣荣, 张智伟, 周雨, 等. 褪黑素对低温和干旱胁迫下多年生黑麦草幼苗生长和抗氧化系统的调节作用. *草地学报*, 2020, 28(5): 1337-1345.
- [26] 魏晓东, 陈国祥, 施大伟, 等. 干旱胁迫对银杏叶片光合系统 II 荧光特性的影响. *生态学报*, 2012, 32(23): 7492-7500.
- [27] 张明聪, 何松榆, 秦彬, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下春大豆品种绥农 26 形态、光合生理及产量的影响. *作物学报*, 2021, 47(9): 1791-1805.
- [28] 巩擎柱, 吕金印, 徐炳成, 等. 水分胁迫和种植方式对小麦叶绿素荧光参数及水分利用效率的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2006, 34(5): 83-88.
- [29] 秦江南, 郭永翠, 王博, 等. 两种植物生长延缓剂对主干形核桃光合荧光日变化的影响. *南方农业学报*, 2018, 49(12): 2410-2418.
- [30] 马宗斌, 李伶俐, 谢德意, 等. 施肥与缩节胺配合对麦后直播夏棉光合特性及产量的影响. *中国生态农业学报*, 2006, 14(4): 94-97.
- [31] 李蒙, 范高领, 张燕, 等. 外源 2, 4-表油菜素内酯 (EBR) 对弱光胁迫下黄心菜生长和碳水化合物代谢的影响. *南方农业学报*, 2019, 50(5): 1028-1034.
- [32] 李冬, 申洪涛, 王艳芳, 等. 外源褪黑素对干旱胁迫下烟草幼苗光合碳同化和内源激素的影响. *草业学报*, 2021, 30(1): 130-139.
- [33] Wang X Y, Zhou Q, Wang X, et al. Corrigendum: Mepiquat chloride inhibits soybean growth but improves drought resistance. *Frontiers in Plant Science*, 2022, 13: 1068683.

Physiological Effects of Mepiquat Chloride on Alleviating Drought Stress in Soybean Seedling Leaves

Hou Xiaomin¹, Shen Huibo¹, Dong Shoukun², Yan Feng¹,
Dong Yang¹, Zhao Fuyang¹, Li Qingquan¹, Zuo Yuetao³

(¹Qiqihar Branch of Heilongjiang Academy of Agricultural Sciences, Qiqihar 161006, Heilongjiang, China;

²College of Agriculture, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, Heilongjiang, China;

³Qingdao Tengrunxiang Detection and Evaluation Co., Ltd., Qingdao 266109, Shandong, China)

Abstract In order to explore the alleviation effect of mepiquat chloride (DPC) on soybean seedlings under drought stress, soybean Heinong 44 (HN44) was used as the experimental material. Different concentrations of DPC (0, 100, 300, 500, 700 mg/L) were sprayed on the leaves, and 15% PEG-6000 was used to simulate drought stress. The results showed that the activities of superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), catalase (CAT) and ascorbate peroxidase (APX), relative water content (RWC), proline, soluble sugar, contents of auxin (IAA), gibberellin (GA), zeatin (ZA), PSII photochemical quantum yield (F_v/F_m), PSII potential photochemical efficiency (F_v/F_o), apparent electron transport rate (ETR) and non-photochemical quenching coefficient (NPQ) in soybean leaves under drought stress were increased by spraying DPC compared with those under drought stress (S0). Drought significantly reduced the contents of malondialdehyde (MDA) and abscisic acid (ABA), but the content of ABA decreased first and then increased with the increase of DPC concentration. The content of IAA was the highest in S700 treatment, and the contents of GA and ZA were the highest in S500 treatment. On the 9th day, compared with S0 treatment, the activities of SOD, POD, CAT and APX in S300 treatment increased by 14.47%, 67.60%, 111.03% and 83.35%, respectively. F_v/F_m , F_v/F_o and ETR reached the maximum under S300 treatment, which increased by 8.30%, 19.70% and 32.30%, respectively, compared with S0 treatment. NPQ reached the minimum under S300 treatment, which decreased by 20.80% compared with S0 treatment. Appropriate concentration of DPC can alleviate the effects of drought stress on soybean growth and development by increasing plant antioxidant enzyme activity and osmotic regulatory substance content, inhibiting membrane lipid oxidation, and increasing endogenous hormone content.

Key words Soybean; DPC; Drought stress; Endogenous hormone; Antioxidant enzyme