DOI:10.13880/j.cnki.65-1174/n.2026.23.021 文章编号:1007-7383(2026)05-0641-10

褐藻寡糖对干旱胁迫下伊亚 4 号亚麻生长及生理特性的影响

李善达[1],守合热提·牙地卡尔[2],刘立军[1*]
(1 华中农业大学植物科学技术学院,湖北 武汉 430070;2 伊犁州农业科学研究所,新疆 伊宁 835000)

摘要:本研究旨在探讨外源褐藻寡糖(AOS)对干旱胁迫下新疆主栽亚麻品种伊亚 4 号生长及生理生化特性的影响,为亚麻抗旱栽培提供依据。采用盆栽试验,设置正常水分+喷施清水(CK)、干旱胁迫+喷施清水(DS)、正常水分+褐藻寡糖(EGh)和干旱胁迫+褐藻寡糖(DSh)4 种处理,褐藻寡糖浓度为 15 mg·L^{-1},于亚麻快速生长期和现蕾期进行叶面喷施。结果表明,AOS 显著缓解了干旱的不利影响,DSh 组各生育期株高较 DS 组提升 9.77%~18.85%,快速生长期根系总长度提升 143.19%,成熟期生物产量恢复至 CK 组的 87.99%。DSh 组现蕾期较 DS 组丙二醛(MDA)含量下降 20.88%,快速生长期超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)活性分别提升 11.32%、26.59%。AOS 可显著提高叶片相对含水量(RWC),降低水分自然饱和亏(WSD)、电解质相对外渗率(REL),减少超氧阴离子自由基(O_2^-·)、过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(MDA)含量,显著增强 SOD 和 POD 活性,有效维持细胞膜稳定性,减轻氧化损伤。同时,AOS 促进了可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)和游离脯氨酸(Pro)的积累,优化渗透调节,现蕾期 SS、SP 和 Pro 含量较 DS 组分别提升 36.48%、30.72%、69.07%。此外,AOS 显著提升了光合色素含量,保护了光合器官,提高了光合效率。本研究证实,外源褐藻寡糖能通过改善根系发育、维持细胞膜稳定性、强化抗氧化防御、优化渗透调节及维持高效光合作用,有效增强伊亚 4 号亚麻的抗旱能力,为亚麻抗旱栽培技术研发提供科学依据,助力新疆亚麻稳产增收。

关键词:新疆;亚麻;褐藻寡糖;干旱胁迫;生理生化响应;产量
中图分类号:S563.2 **文献标志码**:A

Effects of alginate oligosaccharides on growth and physiological characteristics of flax cultivar Yiya 4 under drought stress

LI Shanda[1], YADIKAER Shouhereti[2], LIU Lijun[1*]
(1 College of Plant Science and Technology, Huazhong Agricultural University, Wuhan, Hubei 430070, China;
2 Yili Prefecture Institute of Agricultural Sciences, Yining, Xinjiang 835000, China)

Abstract: This study aimed to investigate the effects of exogenous alginate oligosaccharides (AOS) on the growth and physiological and biochemical traits of Yiya 4, the main flax(*Linum usitatissimum* L.) cultivar in Xinjiang under drought stress, so as to provide a basis for drought-resistant cultivation of flax. A pot experiment was conducted with four treatments: normal water supply (CK), drought stress (DS), normal water supply + AOS (EGh), and drought stress + AOS (DSh). The AOS concentration at 15 mg·L^{-1} was foliarly applied at the squaring stages and rapid growth stages of flax. The results show that AOS significantly alleviates the detrimental effects of drought. Compared with the DS group, plant height in the DSh group increases by 9.77%~18.85% at each growth stage, total root length at the rapid growth stage increases by 143.19%, and mature biomass recovers to 87.99% of the CK group. At the squaring stage, malondialdehyde (MDA) content in the DSh group decreases by 20.88% compared with the DS group; at the rapid growth stage, superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities increases by 11.32% and 26.59%, respectively. AOS effectively maintains cell membrane stability and mitigates oxidative damage by increasing relative water content (RWC), decreasing water saturation deficit (WSD) and relative electrolyte leakage (REL), reducing the contents of superoxide anion radical (O_2^-·), hydrogen per-

收稿日期:2026-02-08
基金项目:国家麻类产业技术体系(CARS-16-E10)
作者简介:李善达(1999—),女,硕士研究生,专业方向为作物栽培学与耕作学。
*通信作者:刘立军(1980—),男,副教授,从事麻类作物栽培理论与技术研究,e-mail:liulijun@mail.hzau.edu.cn。

oxide (H_2O_2) and malondialdehyde (MDA), as well as significantly enhancing SOD and POD activities. Meanwhile, AOS promotes the accumulation of soluble sugar (SS), soluble protein (SP) and free proline (Pro) to optimize osmotic adjustment; at the squaring stage, these three indexes in the DSh group increase by 36.48%, 30.72% and 69.07%, respectively, compared with the DS group. In addition, AOS significantly increases photosynthetic pigment content, protects photosynthetic apparatus and improves photosynthetic efficiency. This study confirms that exogenous AOS can effectively enhance the drought resistance of Yiya 4 flax by improving root development, maintaining cell membrane stability, strengthening antioxidant defense, optimizing osmotic adjustment and sustaining efficient photosynthesis. These findings provide a scientific basis for developing drought-resistant cultivation techniques for flax and help achieve stable yield and income growth of flax in Xinjiang.

Key words: Xinjiang; flax; alginate oligosaccharide; drought stress; physiological and biochemical response; yield

亚麻(*Linum usitatissimum* L.)是亚麻科亚麻属一年生草本作物,是人类最早种植与利用的重要栽培作物之一,是全球广泛栽培的油料、纤维兼用作物,具有显著经济与生态价值[1-4]。亚麻籽富含包括 α-亚麻酸在内的 ω-3 不饱和脂肪酸、蛋白质、膳食纤维、木酚素和维生素 E 等多种生物活性成分,广泛应用于功能性食品及工业领域[1-3,5-6];韧皮纤维则因机械强度优、透气性及耐腐蚀性好,在纺织业及绝缘材料制备中优势显著[1-3,7]。我国亚麻种植区域广泛,主要在西北、东北等干旱、半干旱及高寒地带种植[3,8-9],亚麻喜凉爽湿润环境,根系较浅,相比其他油料作物,其耐旱性相对较弱[10]。近年来,亚麻研究聚焦于种质创新与遗传改良、优质高效栽培、产品高值化利用及抗旱、耐盐、抗低温等抗逆机制解析方面,抗逆绿色调控已成为亚麻产业提质的重要研究方向[11-15]。

干旱是全球发生频率最高、影响范围最广的非生物胁迫之一。近 20 年我国受旱耕地面积超过农作物总播种面积的 9%[16-17],新疆是西北干旱半干旱核心区域。研究表明,干旱胁迫会导致亚麻株高降低、根长缩短、生物量下降,同时会影响亚麻生殖生长,导致单株蒴果数、单株粒重减少,千粒重降低,最终导致产量下降。在生理生化层面,亚麻在干旱胁迫下光合色素含量减少,光合效率降低[18]。活性氧的过量积累导致氧化损伤,细胞膜稳定性下降。为应对干旱,亚麻会通过积累脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白等次生代谢物进行渗透调节,并增强抗氧化酶活性以清除 ROS[19-20],亟须探寻高效、绿色抗旱栽培技术提升其干旱适应能力[21]。

褐藻寡糖(alginate oligosaccharides, AOS)作为海洋褐藻的天然生物活性物质,在植物抗逆调控中潜力显著[22]。研究表明[23-29],AOS 已在蚕豆、豌豆、水稻、小麦、柑橘、黄瓜、番茄、菜心等多种作物中被证实可有效增强植株抗逆性,通过提高抗氧化酶活性、诱导渗透调节物质积累、促进根系形态建成等途径,减轻氧化损伤,增强保水、渗透调节能力和土壤水分吸收效率,其在亚麻中的应用潜力值得探讨。

当前,亚麻抗旱研究聚焦于内部抗旱机制和品种选育[2],针对外源物质提升亚麻抗旱性的研究相对有限,涉及的外源物质种类较为单一,主要集中于传统外源物质,对新型生物刺激素等研究尚未涉及,AOS 在亚麻抗旱调控中的应用及作用机制尚未明确,在新疆亚麻主栽品种上的研究仍是空白。因此,本研究通过盆栽试验,探究 AOS 对干旱胁迫下亚麻生长、产量及生理特性的影响,探讨其缓解干旱胁迫生理机制,为亚麻抗旱栽培技术研发提供科学依据,助力新疆亚麻稳产增收。

1 材料与方法

1.1 材料

试验所用亚麻品种为伊亚 4 号(新疆地区亚麻主栽品种),来源于新疆伊犁州农业科学研究所。试验所用褐藻寡糖(RY-AOS90 型,平均分子量 400~1 500 Da,含量≥90.0%,DP3-7 糖含量≥80.0%),由武汉博润科技有限公司提供。

1.2 方法

本试验采用盆栽法,于 2024 年 12 月—2025 年 6 月在湖北省武汉市华中农业大学植物科学技术学院遮雨大棚(30°27′51.11″N, 114°15′56.02″E)开展,2024 年 12 月 8 日播种。种植盆(底径 22 cm×上径 26 cm×高 25 cm)每盆装 7 kg 种植土(农田土∶基质土=5∶1体积比),其中基质土的主要成分为天然草炭、泥炭、椰糠丝、珍珠岩、蛭石及长效有机肥,pH 值介于 5.5~6.5 之间,拌入 12 g 复合肥($N-P_2O_5-K_2O$ 为 15-15-15)和 0.6 g 多菌灵,田间最大持水量为 84.58%。

选取均匀饱满的亚麻种子,每盆播种 100 粒,播种后充分浇水,定苗前正常管理。苗出齐后、控水前各间苗 1 次,每盆定苗 30 株。选取长势一致的材料

48 盆,设置 4 个处理:正常水分+喷施清水(CK)、干旱胁迫+喷施清水(DS)、正常水分+喷施 AOS(EGh)、干旱胁迫+喷施 AOS(DSh),每个处理 12 个重复。

前期采用盆栽法,在生长条件为温度(23±2)℃,湿度 60%,光照周期 16 h/8 h(光照/黑暗)的土培室内进行干旱胁迫下不同浓度的 AOS 对亚麻幼苗生长发育的影响初步评估,综合亚麻幼苗株高、根长、地上部鲜/干重、地下部鲜/干重 6 个指标,确定 AOS 的适宜施用浓度为 15 $mg \cdot L^{-1}$。

遮雨大棚内亚麻材料在快速生长期(苗高约 15 cm)开始控水,正常水分环境保持水分为田间持水量的 70%±5%,干旱胁迫环境为田间持水量的 35%±5%,采用称重法定期监测和调整土壤水分。待水分控制 14 d 后,开始进行叶面喷施。在亚麻的快速生长期、现蕾期分别施用,每隔 2 d 施用 1 次,每个时期施用 5 次。每个时期施用结束后的第 3 天测定农艺性状并取功能叶测定生理指标,生长周期结束后测定产量指标,综合评估 AOS 对干旱胁迫下亚麻生长发育的影响。

1.2.1　农艺性状指标测定

分别于亚麻出苗后 85 d(快速生长期)、出苗后 96 d(现蕾期),每个处理随机选取 7 株亚麻植株,测定株高、地上部鲜/干重。在快速生长期,每处理随机选取 3 株亚麻植株,用水轻轻洗去根系表面种植土后切下根系,使用 Espon Expression 11000XL 扫描仪测量其总根尖数、根总长、根总表面积、根总体积。在成熟期,每个处理随机选取 7 株亚麻植株测定株高、工艺长度、生物产量、原茎产量、单株分枝数、单株蒴果数以及千粒重。测量方法如下:1)株高(cm):用毫米刻度尺测量茎基部至生长点的距离;2)地上部鲜/干重(g):用电子天平称取地上部鲜重后,105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称取其干重;3)工艺长度(cm):用毫米刻度尺测量从子叶痕到花序下部的第一个分枝基部间的距离;4)生物产量(g):收获后去除根部,80 ℃烘干至恒重,称量干重;5)原茎产量(g):收获后将原茎晾干后(水分含量为 12%),去除蒴果及杂质后称重;6)单株分枝数(个):每株植株主茎顶部着生的一级分枝的个数;7)单株蒴果数(个):每株植株主茎顶部分枝上的蒴果粒数;8)千粒重(g):将每个处理的籽粒混匀后,随机取 1 000 粒称重,每个处理取 3 次重复。

1.2.2　光合色素测定

称取快速生长期、现蕾期亚麻叶片 0.1 g,放入 2 mL 离心管中,加入 2 mL 95%乙醇,避光浸泡至完全发白,取上清液用酶标仪在 665 nm、649 nm 和 470 nm 波长下测定吸光值。计算公式为:

$Ca\ (mg \cdot g^{-1}\ FW) = (13.95 \times A_{665} - 6.88 \times A_{649}) \times V / (1\,000 \times m)$,

$Cb\ (mg \cdot g^{-1}\ FW) = (24.96 \times A_{649} - 7.32 \times A_{665}) \times V / (1\,000 \times m)$,

$Cx \cdot c\ (mg \cdot g^{-1}\ FW) = (1\,000 \times A_{470} - 2.05 \times Ca - 114.8 \times Cb) \times V / (245 \times 1\,000 \times m)$,

$C\ (mg \cdot g^{-1}\ FW) = (Ca + Cb) / (1\,000 \times m)$.

式中:Ca 为叶绿素 a 含量;Cb 为叶绿素 b 含量;$Cx \cdot c$ 为类胡萝卜素含量;C 为总叶绿素含量;A_{665}、A_{649}、A_{470} 分别为 665 nm、649 nm、470 nm 波长下的吸光值;V 为提取液体积(mL);m 为样品质量(g)。

1.2.3　叶片含水量测定

在快速生长期、现蕾期剪取叶片,称量鲜重(FW),之后将叶片置于纯水中浸泡直至饱和,取出后用吸水纸吸干表面水分,称量饱和鲜重(SW),最后将叶片置于烘箱中 105 ℃杀青 30 min,80 ℃烘干至恒重,称量叶片干重(DW)。计算公式如下:

叶片相对含水量(%)$= (FW-DW)/(SW-DW) \times 100\%$,

叶片水分饱和亏(%)$= (SW-FW)/(SW-DW) \times 100\%$。

1.2.4　叶片电解质相对外渗率测定

在快速生长期、现蕾期称取 0.5 g 亚麻鲜叶置于 10 mL 离心管中,纯水浸泡 8 h 后充分摇匀,用电导率仪 DDS-12DW(上海般特仪器有限公司,中国)测定电解质渗透率值(R_0),沸水浴 1 h,冷却后摇匀,测定煮后电解质渗透率值(R),计算公式如下:

电解质相对外渗率(%)$= R_0/R \times 100\%$。

1.2.5　氧化应激指标含量、渗透调节物质含量、抗氧化酶活性测定

丙二醛、游离脯氨酸、可溶性糖的含量及超氧化物歧化酶、过氧化物酶活性测定均参照王学奎和黄见良的方法[30]。亚麻叶片中的过氧化氢、超氧阴离子自由基、可溶性蛋白的含量分别使用过氧化氢含量检测试剂盒(AKAO009M,北京盒子生工科技有限公司)、超氧阴离子自由基检测试剂盒(磺胺微板法)(TO1121,北京雷根生物技术有限公司)、蛋白定量(TP)测定试剂盒(A045-2,南京建成生物工程研究所)进行测定。每个处理重复测定 3 次。

1.2.6 数据分析

试验数据采用 Microsoft Excel 2019 软件整理,利用 SPSS 27.0.1(IBM, USA)和 GraphPad Prism 10.4.1(GraphPad, USA)软件进行单因素方差分析(One-way ANOVA)、事后检验(Tukey HSD)及制图,统计学检验设定显著性水平为 $P<0.05$。结果以平均值±标准误(Mean±*SE*)表示。

2 结果与分析

2.1 AOS 对干旱胁迫下亚麻农艺性状的影响

2.1.1 AOS 对干旱胁迫下不同生育期亚麻株高的影响

干旱胁迫显著抑制亚麻株高(表 1、图 1)。DS 组各生育期株高较 CK 组下降 20.6%~23.4%。喷施 AOS 后,快速生长期 DSh 组株高较 DS 组提升 18.21%,达到 CK 组的 92.59%。现蕾期,DSh 组株高较 DS 组提升 9.77%,达到 CK 组的 87.20%,AOS 在快速生长期的缓解效果较为显著。成熟期株高依赖前期生长基础,AOS 的调控效果为前期效应的延续,DSh 组株高较 DS 组提升 18.85%。各生育期的 EGh 组株高与 CK 组无显著差异,AOS 未干扰生长发育的正常节奏。

表 1 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育时期株高的影响

Table 1 Effects of AOS on the effect of drought stress on plant height of flax at different growth stages

品种	处理	各生育期株高/cm		
		快速生长期	现蕾期	成熟期
伊亚 4 号	CK	54.90a	77.67a	76.61a
	DS	43.00c	61.70b	58.68c
	DSh	50.83b	67.73ab	69.74b
	EGh	55.80a	73.27a	78.54a

注:同列不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 AOS 对干旱胁迫下快速生长期亚麻根系形态的影响

快速生长期是亚麻构建根系吸收体系与抗逆基础的关键阶段。如表 2、图 2 所示,干旱抑制了根系分化,DS 组总根尖数、根总长、根尖密度、根总表面积、根总体积较 CK 组分别下降 51.82%、53.49%、3.45%、47.38%、42.72%。干旱胁迫下喷施 AOS 后,除根总体积略低于 CK 组外,其余指标均优于 CK 组,DSh 组的总根尖数、根总长、根尖密度、根总表面积、根总体积较 DS 组分别提升 199.87%、143.19%、23.81%、90.53%、70.49%。AOS 有效促进根尖分生区细胞分裂和伸长区细胞延伸,重建了高效的根系吸收体系,改善根系形态。

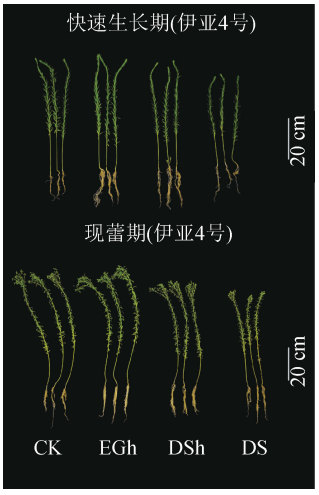


图 1 AOS 对干旱胁迫下快速生长期、现蕾期亚麻长势的影响

Figure 1 Effects of AOS on growth performance of flax at the rapid growth stage and squaring stage under drought stress

表 2 AOS 对干旱胁迫下亚麻快速生长期根系形态的影响

Table 2 Effects of AOS on root morphology of flax at the rapid growth stage under drought stress

品种	处理	总根尖数/个	根总长/cm	根尖密度/(个·cm^{-1})	根总表面积/cm^2	根总体积/cm^3
伊亚 4 号	CK	1 576.00b	645.86b	2.61a	98.36b	2.13a
	DS	759.33c	300.40c	2.52a	51.76c	1.22b
	DSh	2 277.00a	730.53ab	3.12a	98.62b	2.08a
	EGh	2 898.00a	887.21a	3.46a	131.40a	2.75a

注:同列不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

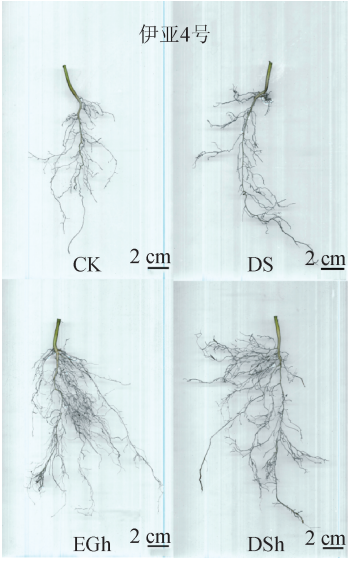


图 2 干旱胁迫下 AOS 喷施亚麻快速生长期根系扫描图

Figure 2 Root system scanning images of flax at the rapid growth stage sprayed with AOS under drought stress

正常水分下,AOS 同样可正向调控根系发育,EGh 组的总根尖数、根总长、根尖密度、根总表面积、根总体积较 CK 组分别提升 83.88%、37.37%、19.54%、33.59%、29.11%。

2.1.3　AOS 对干旱胁迫下不同生育期亚麻生物量的影响

快速生长期是亚麻营养生长与干物质积累的关键时期。如表 3 所示,干旱胁迫显著抑制亚麻干物质积累,DS 组的地上部干重较 CK 组下降 30.14%。喷施 AOS 后,DSh 组地上部干重提升至 0.68 g,恢复至 CK 水平的 93.15%。

表 3　AOS 对干旱胁迫下不同生育期亚麻生物量的影响

Table 3　Effects of AOS on biomass of flax at different growth stages under drought stress

生育期	处理	地上部鲜重/g	地上部干重/g
快速生长期	CK	4.11a	0.73a
	DS	2.44b	0.51b
	DSh	3.80a	0.68a
	EGh	4.93a	0.76a
现蕾期	CK	8.24a	1.76a
	DS	3.05c	0.58c
	DSh	5.47b	1.07b
	EGh	9.97a	2.00a

注:同列不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

现蕾期营养生长与生殖生长同步推进,干旱抑制效应增强,DS 组地上部干重较 CK 组下降 67.05%。喷施 AOS 后,DSh 组地上部干重较 DS 组提升 84.48%,恢复至 CK 水平的 60.80%。干旱对亚麻地上部鲜重同样存在显著抑制作用,AOS 可显著提升干旱条件下植株鲜重,正常水分环境中,EGh 组地上部鲜/干重略高于 CK 组,但不显著。

2.1.4　AOS 对干旱胁迫下亚麻产量的影响

如表 4 所示,干旱胁迫显著降低亚麻产量与关键农艺性状。与 CK 组相比,DS 组生物产量、原茎产量分别下降 39.22%、42.16%,工艺长度缩短 19.20%。在产量构成因子中,单株蒴果数、单株分枝数、千粒重分别下降 40.87%、28.10%、12.32%。

干旱条件下喷施 AOS 可改善亚麻产量性状。DSh 组生物产量、原茎产量、单株分枝数分别恢复至 CK 水平的 87.99%、85.95%、97.89%,工艺长度、单株蒴果数、千粒重较 DS 组分别提升 10.55%、47.00%、6.70%。正常水分条件下,EGh 组的生物产量与原茎产量较 CK 组分别提升 13.78%、19.46%,其余指标与 CK 组无显著差异。

表 4　AOS 对干旱胁迫下亚麻产量的影响

Table 4　Effects of AOS on flax yield under drought stress

品种	处理	工艺长度/cm	生物产量/(g·株$^{-1}$)	原茎产量/(g·株$^{-1}$)	单株分枝数/(个·株$^{-1}$)	单株蒴果数/(个·株$^{-1}$)	千粒重/g
伊亚 4 号	CK	63.44a	2.83ab	1.85ab	6.62a	16.10a	6.98a
	DS	51.26c	1.72c	1.07c	4.76b	9.52b	6.12c
	DSh	56.67b	2.49b	1.59b	6.48a	14.00a	6.53b
	EGh	63.13a	3.22a	2.21a	7.00a	18.10a	7.01a

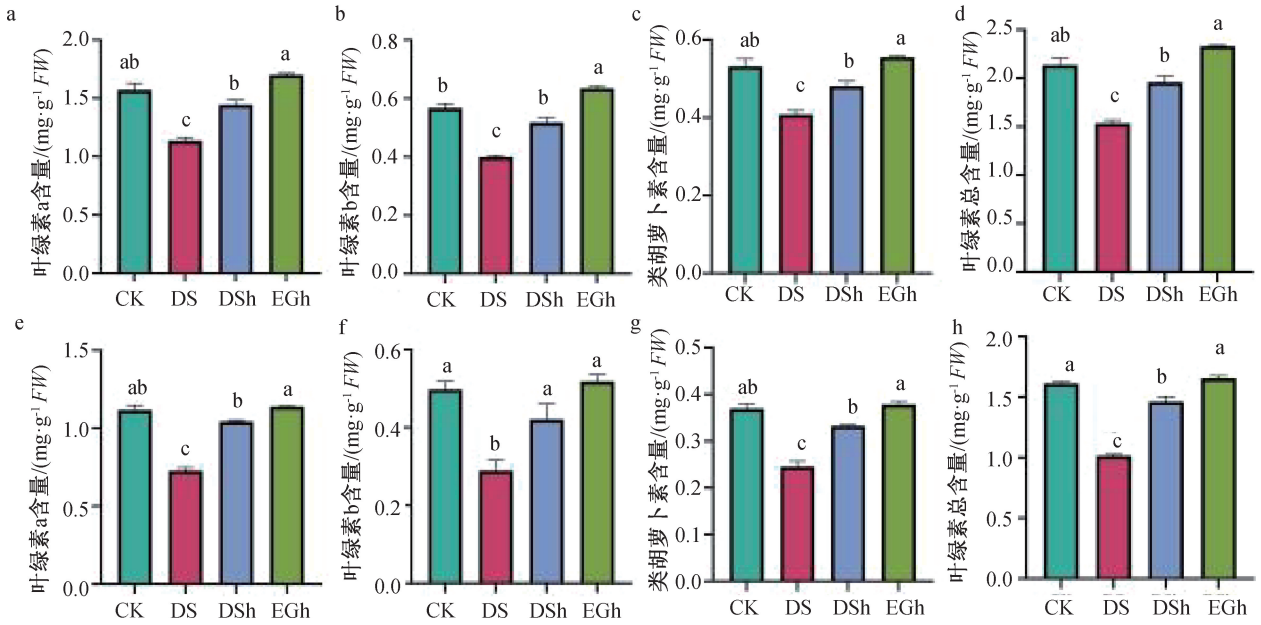
注:同列不同小写字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

2.2　AOS 对干旱胁迫下亚麻生理生化指标的影响

2.2.1　AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期光合色素的影响

光合色素含量直接影响亚麻光合作用效率。干旱胁迫会显著降低亚麻叶片光合色素含量。在快速生长期,DS 组叶绿素 a(图 3a)、叶绿素 b(图 3b)、类胡萝卜素(图 3c)及叶绿素总含量(图 3d)均显著低于 CK 组,其中类胡萝卜素下降 23.35%、叶绿素总含量下降 28.20%。喷施 AOS 后,DSh 组各项光合色素含量均显著高于 DS 组并接近 CK 组水平,其中叶绿素总含量较 DS 组恢复 27.82%。正常水分下,EGh 组仅叶绿素 b 含量较 CK 组提升 11.96%,其余各项指标含量无明显变化。

现蕾期 DS 组各光合色素含量仍显著低于 CK 组。喷施 AOS 后,DSh 组的叶绿素 a(图 3e)、叶绿素 b(图 3f)、类胡萝卜素(图 3g)及叶绿素总含量(图 3h)较 DS 组分别恢复 43.41%、45.54%、35.48%和 44.09%,各项指标均接近 CK 组水平。EGh 组各项光合色素指标含量与 CK 组无明显差异。



a:快速生长期叶绿素 a 含量;b:快速生长期叶绿素 b 含量;c:快速生长期类胡萝卜素含量;d:快速生长期总叶绿素含量;e:现蕾期叶绿素 a 含量;f:现蕾期叶绿素 b 含量;g:现蕾期类胡萝卜素含量;h:现蕾期总叶绿素含量;图中不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 3 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期光合色素含量的影响

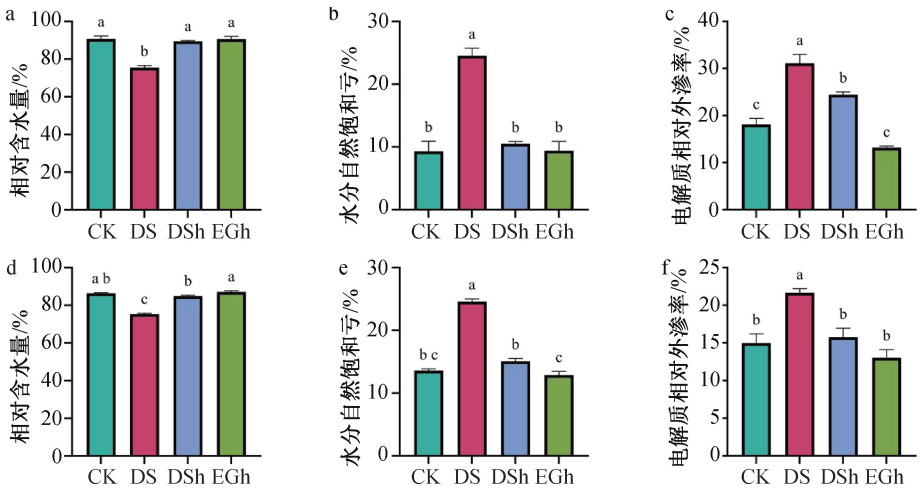
Figure 3 Effects of AOS on photosynthetic pigment contents in flax at different growth stages under drought stress

2.2.2 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期细胞膜稳定性的影响

干旱胁迫会导致植物细胞严重失水、渗透失衡,进而损伤细胞膜结构,主要体现在叶片相对含水量(relative water content, RWC)、水分自然饱和亏(water saturation deficit, WSD)及电解质相对外渗率(relative electrolyte leakage rate, REL)的异常变化(图 4)。

在快速生长期,DS 组 RWC(图 4a)较 CK 组下降 16.80%,WSD(图 4b)、REL(图 4c)分别上升 163.76%、71.99%,细胞膜受损明显。喷施 AOS 后,DSh 组的 RWC 恢复至 89.50%,与 CK 组仅差 1.32%,WSD 降至 10.50%,REL 较 DS 组下降 21.49%,有效缓解干旱损伤。EGh 组的 REL 低于 CK 组,其余指标均维持在与 CK 组相近的水平。

在现蕾期,DS 组的 RWC(图 4d)较 CK 组下降 12.75%,WSD(图 4e)上升 81.15%,REL(图 4f)上升 44.43%。DSh 组的 RWC 恢复至 84.91%,WSD 较 DS 组下降 38.66%,REL 下降 27.19%。EGh 组的 RWC 略高于 CK 组,WSD 和 REL 均低于 CK 组。



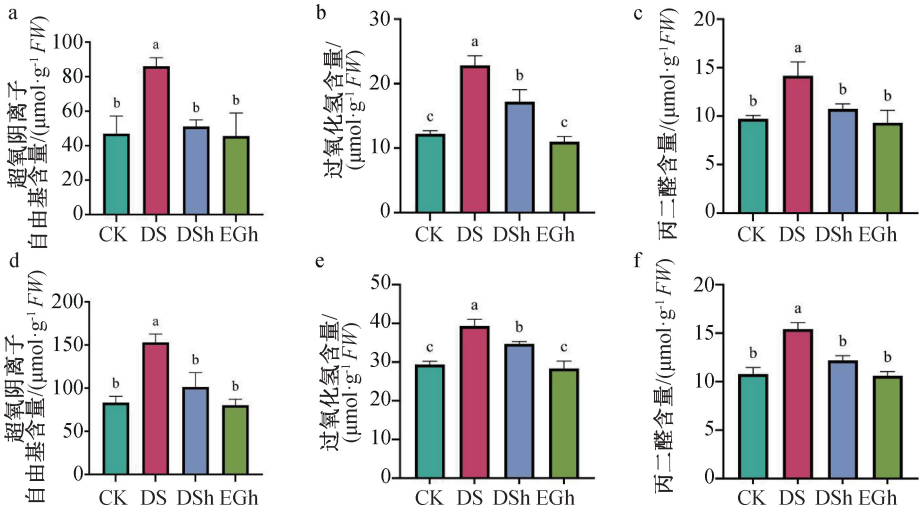
a:快速生长期相对含水量;b:快速生长期水分自然饱和亏;c:快速生长期电解质相对外渗率;d:现蕾期相对含水量;e:现蕾期水分自然饱和亏;f:现蕾期电解质相对外渗率;图中不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 4 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期叶片相对含水量、水分自然饱和亏、电解质相对外渗率的影响

Figure 4 Effects of AOS on RWC, WSD, and REL in flax at different growth stages under drought stress

干旱胁迫可打破亚麻活性氧代谢平衡,引发氧化应激与膜脂过氧化。在快速生长期,DS 组的超氧阴离子自由基($O_2^-\cdot$)(图 5a)、过氧化氢(H_2O_2)(图 5b)及丙二醛(malondialdehyde, MDA)(图 5c)含量较 CK 组分别上升 83.33%、87.14% 和 45.77%,活性氧大量积累、膜脂过氧化加剧。喷施 AOS 后,DSh 组各项指标均显著下降,$O_2^-\cdot$、H_2O_2、MDA 含量较 DS 组分别下降 40.66%、24.68%、24.21%,接近 CK 组水平。EGh 组的 3 项指标含量均略低于 CK 组,无显著差异。

现蕾期,DS 组 $O_2^-\cdot$(图 5d)、H_2O_2(图 5e)及 MDA(图 5f)含量较 CK 组分别上升 83.65%、34.15%和 42.91%。DSh 组的 $O_2^-\cdot$、H_2O_2、MDA 含量分别较 DS 组下降 33.66%、11.74%、20.88%。EGh 组 3 个指标含量均与 CK 组基本持平或略低。



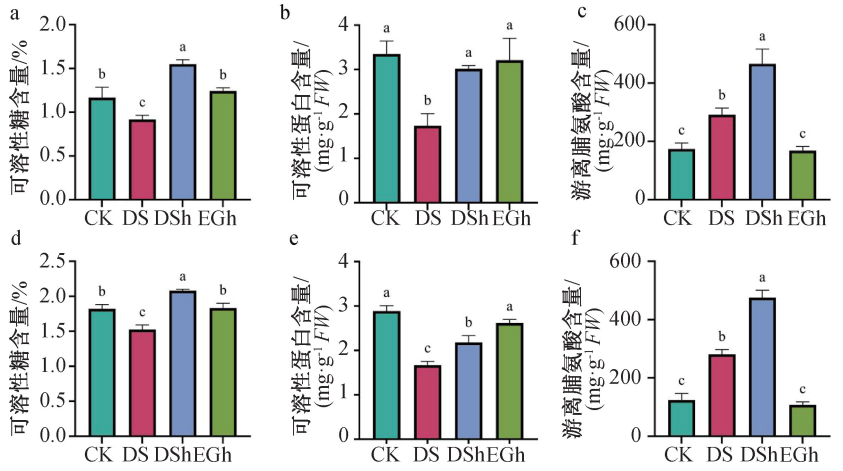
a:快速生长期超氧阴离子自由基含量;b:快速生长期过氧化氢含量;c:快速生长期丙二醛含量;d:现蕾期超氧阴离子自由基含量;e:现蕾期过氧化氢含量;f:现蕾期丙二醛含量;图中不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 5　AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期叶片超氧阴离子自由基、过氧化氢和丙二醛的影响

Figure 5　Effects of AOS on $O_2^-\cdot$, H_2O_2, and MDA in flax at different growth stages under drought stress

2.2.3　AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期渗透调节物质的影响

干旱胁迫对亚麻的可溶性糖(soluble sugar, SS)、可溶性蛋白(soluble protein, SP)、游离脯氨酸(free proline, Pro)3 种渗透调节物质含量影响显著。在快速生长期(图 6a—6c),与 CK 组相比,DS 组 SS、SP 含量分别下降 21.42%、48.27%,Pro 含量提升 67.20%。喷施 AOS 后,DSh 组的 SS 含量显著回升并



a:快速生长期可溶性糖含量;b:快速生长期可溶性蛋白含量;c:快速生长期游离脯氨酸含量;d:现蕾期可溶性糖含量;e:现蕾期可溶性蛋白含量;f:现蕾期游离脯氨酸含量;图中不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 6　AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期叶片可溶性糖、可溶性蛋白和游离脯氨酸含量的影响

Figure 6　Effects of AOS on SS, SP and Pro contents in flax at different growth stages under drought stress

高于 CK 组,较 DS 组提升 1.69 倍,含量达 1.55%,SP 含量较 DS 组提升 74.05%,恢复至 3.02 $mg \cdot g^{-1}$,接近 CK 组水平,Pro 含量较 DS 组提升 59.88%,提升至 466.20 $\mu g \cdot g^{-1}$,较 CK 组提升 167.32%。EGh 组 3 种物质含量较 CK 组无显著差异。

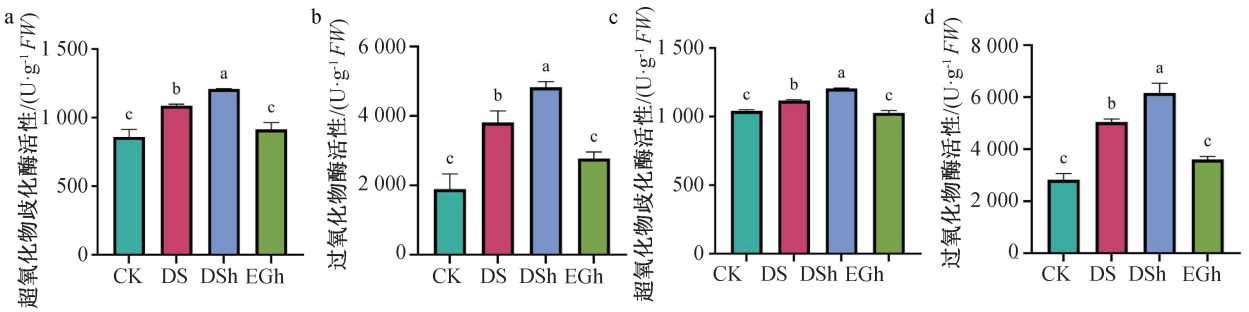
在现蕾期(图 6d—6f),DS 组 SS、SP 含量较 CK 组分别下降 16.36%、42.21%,Pro 含量较 CK 组提升 126.80%。DSh 组的 SS 含量较 DS 组提升 36.48%,较 CK 组提升 14.16%,SP 含量较 DS 组提升 30.72%,恢复至 CK 组水平的 75.54%,Pro 含量较 DS 组提升 69.07%,较 DS 组提升 2.83 倍。EGh 组的 3 种物质含量与 CK 组无显著差异,表明非胁迫条件下 AOS 不会干扰基础代谢稳态。

2.2.4 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期抗氧化酶活性的影响

超氧化物歧化酶(superoxide dismutase, SOD)可以歧化超氧阴离子自由基,将其转化为 H_2O_2 和 O_2,进而减轻超氧阴离子自由基的毒害作用,而过氧化物酶(peroxidase, POD)则可以利用 H_2O_2 作为电子受体,将多种底物氧化,将 H_2O_2 还原为水,进而清除过氧化氢和其他过氧化物,增强植株的 ROS 清除能力。

在快速生长期,干旱胁迫下亚麻的 SOD(图 7a)与 POD(图 7b)活性均有所升高。与 CK 组相比,DS 组的 SOD、POD 活性分别提升 26.41%、101.43%。喷施 AOS 后,DSh 组的 SOD 活性较 DS 组提升 11.32%,较 CK 组提升 40.71%。DSh 组的 POD 活性较 DS 组提升 26.59%,较 CK 组提升 154.99%。EGh 组的 SOD 与 POD 活性较 CK 组分别提升 6.27%、46.49%,无显著差异。

在现蕾期,DS 组的 SOD 活性(图 7c)较 CK 组提升 7.20%,POD 活性(图 7d)较 CK 组显著提升 78.28%。DSh 组的 SOD 活性较 DS 组提升 7.97%,较 CK 组提升 15.74%;POD 活性较 DS 组提升 22.22%,较 CK 组提升 117.90%。EGh 组的抗氧化酶活性无显著差异。



a:快速生长期超氧化物歧化酶活性;b:快速生长期过氧化物酶活性;c:现蕾期超氧化物歧化酶活性;d:现蕾期过氧化物酶活性;图中不同字母代表不同处理间差异显著($P<0.05$)。

图 7 AOS 对干旱胁迫下亚麻不同生育期叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的影响

Figure 7 Effects of AOS on superoxide dismutase and peroxidase activities in leaves of flax at different growth stages under drought stress

3 讨论与结论

本研究充分印证了干旱胁迫对亚麻植株形态建成、物质积累及产量形成等生长发育层面的不利影响,而 AOS 可有效缓解干旱胁迫对亚麻的抑制效应。结果显示,干旱会显著抑制亚麻株高伸长与根系形态建成,削弱植株对水分和养分的吸收效率,进而影响光合产物的合成与转运,导致亚麻植株生物量积累不足,最终造成亚麻地上部鲜/干重及产量相关指标大幅下降。外源喷施 AOS 能够有效改善干旱下亚麻植株生长发育态势,优化根系构型,为地上部生长提供充足保障。同时,AOS 可促进干物质的合成与分配,缓解干旱对产量造成的不利影响,使产量相关性状得到显著恢复。在正常水分条件下喷施 AOS 也可在一定程度上促进植株生长,但不会干扰亚麻正常的生长发育节律,展现出良好的应用安全性。

亚麻对干旱胁迫的生理抗性是一个从感知逆境信号到启动代谢防御的系统性过程。AOS 缓解干旱胁迫对亚麻的抑制效应,核心在于其能够系统调控亚麻植株生理代谢过程,缓解由干旱引发的生理紊乱与损伤。本研究发现,在氧化应激调控方面,干旱诱发的活性氧(ROS)爆发是导致膜脂过氧化与细胞功能受损的根本原因,AOS 增强了不同生育期亚麻叶片中的酶促抗氧化系统。研究结果显示[23-24],AOS 喷施后,亚麻叶片内 SOD 与 POD 两种抗氧化酶的活性均得到显著提升,这种酶促活性的协同上调,确保了干旱诱导产生的 H_2O_2 能被 POD 迅速还原为水,从源头上抑制了 MDA 的积累与电解质外

渗。与 Ali 等[31]关于 AOS 能够作为诱抗剂激活植物防御酶系的结论一致,这种高效清除机制使细胞膜的相对外渗率在持续干旱环境下仍能保持较低水平,其缓解效果优于传统的外源抗氧化制剂,体现了生物刺激素在激发植株内源潜能方面独特优势[26,32]。

在渗透调节稳态的重建机制中,本研究结果显示,干旱导致亚麻可溶性糖(SS)、可溶性蛋白(SP)降低,游离脯氨酸(Pro)升高,AOS 喷施后,亚麻 SS、SP、Pro 含量有显著提升,这种大幅度的溶质积累不仅有助于降低细胞渗透势以维持水分平衡,还能够保护细胞内的生物大分子结构,显著增强细胞原生质的持水力,从而在生理层面解决了亚麻因细胞失水而导致的早期枯萎问题[25-26,33],同时,亚麻渗透调节能力增强时,其体内代谢会发生偏向性分配,更多代谢资源流向防御性碳水化合物(如可溶性糖等)的合成,以强化植株抗旱防御能力,这与 AOS 调控亚麻干旱胁迫的生理机制相契合[27]。

生理稳态重建的最终成效体现为光合系统功能延续。干旱胁迫导致光合色素因氧化降解,进而限制碳同化效率,最终导致产量下降。研究结果表明,AOS 能够有效逆转干旱诱导的亚麻光合色素降解,使其接近 CK 组水平。有研究表明[33-34],AOS 可通过改善光合速率、蒸腾速率、气孔导度及 φPSII 最大光化学量子产量(F_v/F_m),提高水分利用效率(WUE),保障光合产物合成,这与 AOS 调控光合相关基因(如 LHCB)表达、优化光能转化的分子机制相呼应[23-24]。本研究测定发现,亚麻在 AOS 处理下的叶绿素 a、b 比值稳定在 2.0~3.0 的正常范围内,表明 AOS 并非单纯增加色素合成,未破坏 2 种叶绿素的协同关系,可能通过调控光合色素合成与降解的相关酶活性,保障光能从叶绿素 b 向叶绿素 a 的高效传递,维持干旱环境下亚麻的光合作用稳定。综上,干旱严重抑制新疆伊亚 4 号亚麻生长发育,叶面喷施 15 mg·L^{-1} AOS 可通过维持水分平衡、增强抗氧化能力、优化渗透调节与光合作用,有效缓解干旱损伤,提升生物量与产量,在新疆亚麻抗旱栽培中应用潜力巨大。未来深入解析其分子调控机制,并通过大田试验验证施用方案,充分发挥其抗逆栽培价值。

参考文献(References)

[1] 胡增民. 聚焦消费端核心关切拓展亚麻籽油应用场景[N]. 粮油市场报,2025-11-25(B01).

[2] 谢芳,郭栋良,葛优,等. 亚麻全生育期耐旱性评价及耐旱种质筛选[J]. 新疆大学学报(自然科学版)(中英文),2023,40(4):467-475,485.
Xie Fang, Guo Dongliang, Ge You, et al. Evaluation and screening of flax germplasm for drought tolerance in the entire growth period[J]. Journal of Xinjiang University (Natural Science Edition in Chinese and English), 2023, 40(4): 467-475, 485.

[3] You F M, Jia G F, Xiao J, et al. Genetic variability of 27 traits in a core collection of flax (*Linum usitatissimum* L.)[J]. Frontiers in Plant Science, 2017, 8: 1636.

[4] 邓乾春,禹晓,黄庆德,等. 亚麻籽油的营养特性研究进展[J]. 天然产物研究与开发,2010,22(4):715-721.
Deng Qianchun, Yu Xiao, Huang Qingde, et al. Research progress on nutritional characteristics of linseed oil[J]. Natural Product Research and Development, 2010, 22(4): 715-721.

[5] Pali V, Mehta N. Evaluation of oil content and fatty acid compositions of flax (*Linum usitatissimum* L.) varieties of India[J]. Journal of Agricultural Science, 2014, 6(9): 10.

[6] 周亚东,李明. 世界油用亚麻生产发展回顾与展望[J]. 中国农学通报,2010,26(9):151-155.
Zhou Yadong, Li Ming. Review and prospection for linseed production in the world[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(9): 151-155.

[7] Mhiret W N, Heslop-Harrison J S. Biodiversity in Ethiopian linseed (*Linum usitatissimum* L.): Molecular characterization of landraces and some wild species[J]. Genetic Resources and Crop Evolution, 2018, 65(6): 1603-1614.

[8] 刘伟伟,姬妍茹. 黑龙江省亚麻生产的现状与存在的问题[J]. 黑龙江纺织,2010(2):1-2.
Liu Weiwei, Ji Yanru. Present situation and existent question of flax production in Heilongjiang Province[J]. Heilongjiang Textile, 2010(2): 1-2.

[9] Li Y, Hoogenboom G, Asseng S, et al. Adaptation of the SIMPLE model to oilseed flax (*Linum usitatissimum* L.) for arid and semi-arid environments[J]. Agronomy, 2022, 12(6): 1267.

[10] Liu H, Wang Q, Wang J A, et al. Water requirements of flax and modification of the crop coefficient in the agro-pastoral ecotone of central Inner Mongolia, China[J]. Applied Ecology and Environmental Research, 2024, 22(2): 1121-1137.

[11] 姚丹丹,宋喜霞,姜卫东,等. 亚麻耐盐碱性研究进展[J]. 黑龙江农业科学,2024(12):103-109.
Yao Dandan, Song Xixia, Jiang Weidong, et al. Research progress on salt and alkali tolerance of flax[J]. Heilongjiang Agricultural Sciences, 2024(12): 103-109.

[12] Singh C M, Sharma P, Kaundal P, et al. Melatonin alleviates drought stress in linseed (*Linum usitatissimum* L.) by regulating antioxidants and LusCYP450 encoding

genes[J]. Plant Stress, 2025, 18: 101117.

[13] Rukh M, Khan J, Bibi N, et al. Characterization of bacillus subtilis PM49 and its role in drought stress amelioration in *Linum usitatissimum* L. [J]. Plant and Soil, 2025, 515(1): 325-341.

[14] 马凤玲,穆建花,苏军,等.亚麻籽深加工产品开发现状及研究进展[J].中国油脂,2026,51(6):128-136.
Ma Fengling, Mu Jianhua, Su Jun, et al. Current situation and research advances in development of deep-processed flaxseed products [J]. China Oils and Fats, 2026, 51(6): 128-136.

[15] 邱财生,康庆华,朱炫,等.亚麻育种新技术研究进展[J].农业与技术,2025,45(13):1-5.
Qiu Caisheng, Kang Qinghua, Zhu Xuan, et al. Research progress on new techniques of flax breeding[J]. Agricultural Science and Technology, 2025, 45(13): 1-5.

[16] 霍治国,王懿,李美萱,等.我国冬小麦干旱灾害研究进展[J].应用气象学报,2026,37(1):1-15.
Huo Zhiguo, Wang Yi, Li Meixuan, et al. A review on drought disasters of winter wheat in China[J]. J Appl Meteor Sci, 2026, 37(1): 1-15.

[17] Wang W, Wang Lei, Wang Ling, et al. Transcriptome analysis and molecular mechanism of linseed (*Linum usitatissimum* L.) drought tolerance under repeated drought using single-molecule long-read sequencing[J]. BMC Genomics, 2021, 22(1): 109.

[18] 邓欣,陈信波,龙松华,等.水分胁迫对亚麻苗期生理特性及干物质积累的影响[J].中国油料作物学报,2015,37(6):846-851.
Deng Xin, Chen Xinbo, Long Songhua, et al. Effects of water stress on physiology and dry matter accumulation of flax (*Linum usitatissimum* L.) seedling[J]. Chinese Journal of Oil Crop Sciences, 2015, 37(6): 846-851.

[19] 陈亚,袁玲,习向银.干旱胁迫对烤烟影响的研究进展[J].甘肃联合大学学报(自然科学版),2008(2):68-72.
Chen Ya, Yuan Ling, Xi Xiangyin. Evolving of research on effects of different drought stress on tobacco [J]. Journal of Gansu Lianhe University (Natural Science Edition), 2008(2): 68-72.

[20] Deshmukh R, Gupta S K, Patil G B. Integrated omics approaches for biotic and abiotic stress tolerance in plants[J]. Journal of Plant Biochemistry and Biotechnology, 2025,34(1): 1-5.

[21] 吴瑞香,杨建春,王利琴,等.不同抗旱类型胡麻幼苗对干旱胁迫的生理响应[J].华北农学报,2019,34(2):145-153.
Wu Ruixiang, Yang Jianchun, Wang Liqin, et al. Physiological response of flax seedlings with different drought-resistances to drought stress[J]. Acta Agriculturae Boreali-Sinica, 2019, 34(2): 145-153.

[22] 王恒,曹佳茵,侯剑,等.喷施褐藻寡糖对茶树抗旱性的影响[J].山东农业科学,2023,55(12):63-70.
Wang Heng, Cao Jiayin, Hou Jian, et al. Effect of spraying algal oligosaccharide on drought resistance of tea plant[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2023, 55(12): 63-70.

[23] Zhang Y H, Yin H, Zhao X M, et al. The promoting effects of alginate oligosaccharides on root development in *Oryza sativa* L. mediated by auxin signaling[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 113: 446-454.

[24] Li Z M, Duan S P, Lu B S, et al. Spraying alginate oligosaccharide improves photosynthetic performance and sugar accumulation in *Citrus* by regulating antioxidant system and related gene expression [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 13: 1108848.

[25] 孙冰,张金梅,刘朋宇,等.不同浓度褐藻寡糖对黄瓜生长、产量、品质与抗氧化酶及其基因表达的影响[J].江苏农业科学,2023,51(13):175-181.
Sun Bing, Zhang Jinmei, Liu Pengyu, et al. Impacts of different concentrations of brown algal oligosaccharides on growth, yield, quality and expression of antioxidant enzymes and their genes of cueumber[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(13): 175-181.

[26] GarcíA-GarcíA A L, GarcíA-Machado F J, Borges A A, et al. Pure organic active compounds against abiotic stress: a biostimulant overview[J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 575829.

[27] 杨锦.褐藻降解菌株的筛选、鉴定及褐藻寡糖提高菜心抗旱性的机制[D].广州:华南农业大学,2021.

[28] El Mehdi El Boukhari M, Barakate M, Drissi B, et al. Seaweed extract biostimulants differentially act in mitigating drought stress on faba bean (*Vicia faba* L.)[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2023, 42(9): 5642-5652.

[29] Guo W, Yan T, Wang Z, et al. Research advances in using seaweed fertilizers to mitigate plant water stress [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2025, 36(3):950-968.

[30] 王学奎,黄见良.植物生理生化实验原理与技术[M].3 版.北京:高等教育出版社,2015.

[31] Ali O, Ramsubhag A, Jayaraman J. Biostimulant properties of seaweed extracts in plants: Implications towards sustainable crop production[J]. Plants, 2021, 10(3): 531.

[32] Zhang C G, Wang W X, Zhao X M, et al. Preparation of alginate oligosaccharides and their biological activities in plants: A review[J]. Carbohydrate Research, 2020, 494: 108056.

[33] 王婧.硅酸钾与保水剂配施增强红麻抗旱性研究[D].武汉:华中农业大学,2024.

[34] Vangenechten B, De Coninck B, Ceusters J. How to improve the potential of microalgal biostimulants for abiotic stress mitigation in plants? [J]. Frontiers in Plant Science, 2025, 16: 1568423.

(责任编辑:唐慧 郭芸婕)