

引用:宫宇飞,席美惠,王启骏,等.褐藻寡糖叶面喷施调控小麦幼苗生长及抗纹枯病的生理机制[J].聊城大学学报(自然科学版),2025,38(6):1006-1012

Citation:GONG Yufei, XI Meihui, WANG Qijun, GUO Xinyu, ZHANG Wenfei, LIU Jiacheng, ZHAO Yan, HUA Xuwen. Physiological mechanism of foliar application of alginate oligosaccharides in regulating wheat seedling growth and resistance to sheath blight[J]. Journal of Liaocheng University (Natural Science Edition), 2025, 38(6):1006-1012.

文章编号 1672-6634(2025)06-1006-07

DOI 10.19728/j.issn1672-6634.2025050008

褐藻寡糖叶面喷施调控小麦幼苗生长 及抗纹枯病的生理机制

宫宇飞,席美惠,王启骏,郭欣宇,张文斐,刘家呈,赵燕,华学文

(聊城大学 农业与生物学院,山东 聊城 252059)

摘要 真菌病害严重威胁粮食安全,其防控已成为现代农业可持续发展面临的核心挑战。褐藻寡糖(AOS)作为一种新型植物免疫诱导剂,因其独特的生物活性而备受关注。为了探究褐藻寡糖对小麦抗病性和生长发育的影响,系统评估了 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%和 0.5%五个浓度梯度的褐藻寡糖溶液诱导小麦抗纹枯病的效果及其促生长作用。结果表明,0.2% AOS 处理表现出最优的诱导抗病效果,该处理能显著提升可溶性蛋白含量,并同步激活超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、多酚氧化酶(PPO)、苯丙氨酸解氨酶(PAL)和过氧化氢酶(CAT)等关键防御酶的活性,证实其可通过系统诱导防御反应增强植物免疫。此外,0.2% AOS 处理还表现出最佳的促生长效应,其通过调控丙二醛和脯氨酸的含量增强植物抗逆能力。研究结果为 AOS 作为植物生长调节剂和抗病诱导剂的实际应用提供了重要的理论依据。

关键词 褐藻寡糖;小麦纹枯病;诱导抗性;生长指标;生理机制

中图分类号 S435.121.4

文献标志码 A

开放科学(资源服务)标识码(OSID)



Physiological mechanism of foliar application of alginate oligosaccharides in regulating wheat seedling growth and resistance to sheath blight

GONG Yufei, XI Meihui, WANG Qijun, GUO Xinyu, ZHANG Wenfei,
LIU Jiacheng, ZHAO Yan, HUA Xuwen

(School of Agriculture and Biology, Liaocheng University, Liaocheng 252059, China)

Abstract Fungal diseases pose a serious threat to global food security, and their control has become a core challenge for the sustainable development of modern agriculture. As a novel plant immunity inducer, alginate oligosaccharides (AOS) have attracted significant attention due to their unique bioactive properties. To investigate the effects of AOS on wheat disease resistance and growth, the efficacy of AOS solutions in inducing resistance against wheat sheath blight and promoting plant growth was systematically evaluated

收稿日期:2025-05-19

基金项目:国家自然科学基金项目(32001929);聊城市“科技副总”协同创新项目基金(2024XT07)资助

通信作者:华学文,男,汉族,博士,副教授,研究方向:农业病害绿色防控,E-mail:huaxuwen906@163.com。

at five concentration gradients of 0.05%, 0.1%, 0.2%, 0.3%, and 0.5%. The results demonstrated that the 0.2% AOS treatment exhibited the optimal disease resistance-inducing effect. This treatment significantly increased soluble protein content and simultaneously activated the activity of key defense enzymes, including superoxide dismutase (SOD), peroxidase (POD), polyphenol oxidase (PPO), phenylalanine ammonia-lyase (PAL), and catalase (CAT), confirming that AOS enhances plant immunity by systematically inducing defense responses. Furthermore, the 0.2% AOS treatment also showed the best growth-promoting effect, improving stress resistance by regulating the content of malondialdehyde (MDA) and proline. These findings provide an important theoretical foundation for the practical application of AOS as both a plant growth regulator and a disease resistance inducer.

Keywords alginate oligosaccharides; wheat sheath blight; induced resistance; growth indicators; physiological mechanism

0 引言

粮食安全是国家安全的重要基石,也是社会稳定的根本保障。随着全球人口持续增长和耕地资源日益紧张,农作物稳产高产面临严峻挑战。其中,农业真菌病害作为威胁粮食安全的重要生物因素,其防控已成为现代农业可持续发展的核心挑战^[1-2]。据全国农业技术推广服务中心数据显示,2025年我国主要粮食作物和油料、蔬菜作物重大病虫害呈现重发态势,预计全国发生面积达25.18亿亩;其中,仅小麦纹枯病的预计发生面积就高达1.18亿亩,防控形式十分严峻^[3]。当前,化学防治仍是防控农业真菌病害最直接有效的手段,然而传统杀菌剂(如QoI、MBC、DMI、SDHI等)的长期使用已导致病原菌抗药性持续加剧,加之其潜在的环境残留风险和生态毒性等问题,亟需开发新型绿色安全、环境友好的防控技术^[4-6]。

近年来,植物免疫诱导剂因其独特的“植物疫苗”效应而备受关注,其通过激活水杨酸或茉莉酸等信号转导通路,诱导植物产生系统获得性抗性(Systemic acquired resistance, SAR),从而显著降低对化学药剂的依赖^[7-8]。寡糖作为植物免疫诱导剂的重要类别,根据来源可分为植物源、真菌源、动物源和海藻源等类型^[9]。其中,海藻源寡糖因其资源丰富、提取工艺成熟等优势,在植物免疫诱导领域展现出显著的应用潜力^[9-10]。例如,氨基寡糖素(壳寡糖)可有效诱导小麦对条锈病的系统抗性^[11],岩藻寡糖能显著提升植物的抗氧化防御能力等^[12]。褐藻寡糖(Alginate oligosaccharides, AOS)为来源于褐藻的海洋天然多糖降解产物,由 β -D-甘露糖醛酸(M)和 α -L-古罗糖醛酸(G)通过 β -1,4糖苷键连接而成(图1),聚合度在2~20之间,其凭借独特的生物活性和环境友好特性,在农业、生物医药及食品工业等领域展现出广阔的应用前景,已成为海洋生物资源开发的研究热点^[13-17]。在农业应用中,研究表明褐藻寡糖不仅能够促进植物生长、增强作物抗逆能力,还可有效改善土壤结构,提高养分利用效率等^[18-20]。

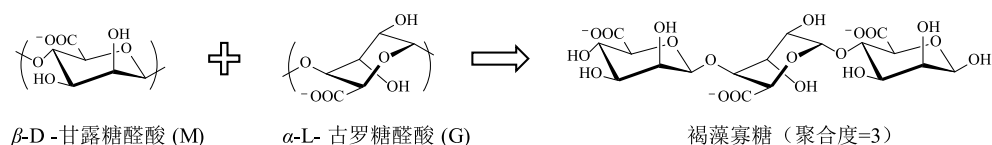


图1 由 β -D-甘露糖醛酸(M)和 α -L-古罗糖醛酸(G)通过 β -1,4糖苷键连接而成的褐藻寡糖(聚合度=3)结构

Fig. 1 Structure of alginate oligosaccharides (degree of polymerization = 3) composed of β -D-mannuronic acid (M) and α -L-guluronic acid (G) linked by β -1,4-glycosidic bonds

小麦纹枯病是由立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)侵染引起的重大农业病害,严重威胁小麦的产量与品质。本研究旨在探究褐藻寡糖诱导小麦抗纹枯病的生理机制及对小麦的促生长作用,期望为农业病害绿色防控技术创新提供理论依据。研究成果不仅为减少化学农药的使用量以及有效缓解农药残留和面源污染问题提供技术支撑,而且对保障农产品质量安全、农业生态环境可持续发展和实现国家粮食安全战略目标具有积极意义。

1 材料与方法

1.1 实验材料

褐藻寡糖购买于山东结晶集团股份有限公司,小麦纹枯病病原真菌—立枯丝核菌(*Rhizoctonia solani*)取自聊城大学农业与生物学院前期分离、鉴定和保存的菌种,供试小麦品种为济麦 22。

1.2 实验方法

1.2.1 供试菌株立枯丝核菌的活化培养。将于 4℃ 冰箱保存的立枯丝核菌(*R. solani*)置于超净工作台,用无菌接种环挑取适量菌丝,接种至灭菌的 PDA 培养基上,于 25±1℃ 生化培养箱中培养 5 d。待菌落形成后,用无菌打孔器在菌落边缘切取直径 5 mm 的菌饼,转接至新鲜 PDA 培养基中连续传代培养 2 次,完成菌株活化。取活化菌株接种于 PDB 培养基中,25±1℃、300 r/min 振荡培养 3 d,收集菌丝培养液,经简单的超声破碎处理,制备成小麦幼苗接种悬液。

1.2.2 小麦纹枯病诱导抗性评估。选取籽粒饱满的济麦 22 小麦种子,经 75%乙醇表面消毒和无菌蒸馏水充分洗涤后,置于铺有双层润湿滤纸的培养皿中,暗培养 5 天。选取生长一致的健康种苗移栽到营养土(基质:蛭石=3:1)中,继续培养至三叶一心期。准确称取褐藻寡糖粉末,用无菌蒸馏水溶解,分别配制质量体积浓度为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%和 0.5%五个浓度梯度的供试溶液。使用手持喷雾器均匀喷施于小麦幼苗的茎叶表面,以无菌蒸馏水处理作为空白对照,每组设置 3 个生物学重复。处理 48 h 后,均匀喷施事先制备的 *R. solani* 接种悬液,于温度 25±1℃、湿度 80%条件下培养,观察并记录小麦幼苗的染病情况。

1.2.3 小麦防御酶系活性测定。取褐藻寡糖喷施处理 2 d 后的小麦幼苗叶片 2 g,置于预冷研钵中,加入 3 mL 预冷的磷酸盐缓冲液(pH 7.8),冰浴研磨至匀浆。将匀浆液转移至离心管,并用 2 mL 磷酸盐缓冲液分两次冲洗研钵,合并所有缓冲液于 4℃、10 000 r/min 离心 20 min,收集上清液。所得粗酶提取液于 4℃密封保存,备用。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定,超氧化物歧化酶(SOD)活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定,过氧化物酶(POD)活性采用愈创木酚法测定,过氧化氢酶(CAT)活性采用 H₂O₂ 在 240 nm 处的吸光度变化通过紫外分光光度法测定,多酚氧化酶(PPO)活性采用邻苯二酚法测定,苯丙氨酸解氨酶(PAL)活性采用 L-苯丙氨酸为底物通过分光光度法测定^[21-26]。

1.2.4 小麦幼苗生长指标的测定。选取籽粒饱满、大小均一的济麦 22 小麦种子,经 75%乙醇消毒和无菌蒸馏水充分洗涤后,置于铺有双层润湿滤纸的培养皿中,在培养箱中暗培养 48 h 促使萌发。选取长势一致的健康幼苗移栽至水培盒中,采用 1/2 Hoagland 营养液进行培养,并且每 48 h 更换一次营养液。培养条件为光照培养箱,温度为 22±1℃,光照周期为 16 h 光照/8 h 黑暗。待幼苗生长至二叶期,随机分为 6 组,每组 10 株幼苗。采用手持喷雾器均匀喷施质量体积浓度为 0.05%、0.1%、0.2%、0.3%和 0.5%五个浓度梯度的褐藻寡糖溶液,以无菌蒸馏水作为空白对照。于处理后的 1、4、7、10、13、19、19 d 分别测量株高和根长,并于 19 d 取样测定地上部和地下部的鲜重和干重。

1.2.5 丙二醛和脯氨酸含量测定。为了探究褐藻寡糖(AOS)对小麦幼苗生长的调控作用,测定了经 0.2% AOS 处理第 19 d 后小麦幼苗的丙二醛(MDA)和脯氨酸的含量变化。其中,丙二醛含量测定采用硫代巴比妥酸比色法,脯氨酸含量测定采用茚三酮显色法,每个处理设置 3 个生物学重复^[27-28]。

1.3 数据分析

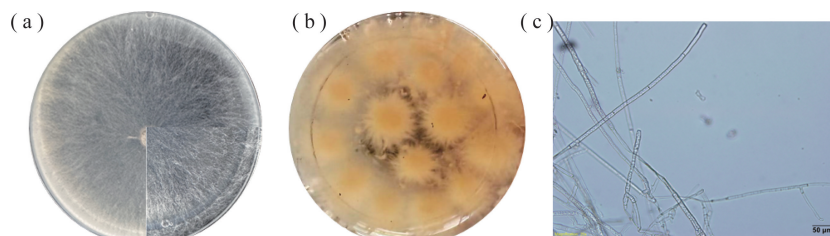
所有原始数据首先使用 Microsoft Excel 2016 进行整理和均值及标准差分析,然后采用 SAS 9.4 统计软件进行单因素方差分析(ANOVA),以 t 检验评估组间差异显著性水平,其中 * $P < 0.05$ 表示差异显著, ** $P < 0.01$ 表示差异极显著, *** $P < 0.001$ 表示差异极其显著。

2 结果与讨论

2.1 小麦纹枯病致病菌 *R. solani* 形态

经活化的立枯丝核菌(*R. solani*)在 PDA 和 PDB 培养基中的形态如图 2 所示。在 PDA 固体培养基上,菌落呈现典型的放射状扩展,边缘不规则,菌丝体呈疏松的棉絮状结构,颜色呈现白色至浅褐色。显微镜

观察显示菌丝具有明显的隔膜,并形成密集的分枝结构。在 PDB 液体培养基上,菌丝相互缠绕形成特征性的菌丝球,表面可见放射状延伸的匍匐菌丝,外层菌丝密集交织。以上与黄雯雯等报道的立枯丝核菌的形态相一致^[29]。



注:(a) PDA;(b) PDB;(c) 菌丝。

图 2 立枯丝核菌(*R. solani*)在 PDA 和 PDB 培养基中的形态以及菌丝观察

Fig. 2 Morphology of *Rhizoctonia solani* (*R. solani*) on PDA and PDB media and observation of hyphae

2.2 褐藻寡糖诱导小麦幼苗纹枯病抗性

如图 3 所示,不同质量体积浓度褐藻寡糖(AOS)处理诱导小麦幼苗抗纹枯病的效果存在显著差异。在空白处理组,小麦幼苗受病原菌严重侵染,表现为茎基部及叶鞘出现典型褐腐病斑,叶片黄化萎蔫,植株生长受阻甚至倒伏。相比之下,0.2% AOS 处理组的小麦幼苗生长健壮,病斑扩展明显受抑制,显示出较强的诱导抗病性。然而,0.05%和 0.5% AOS 处理组的小麦幼苗发病程度较为严重,病斑面积较大,同样出现倒伏现象,表明过低或过高浓度的 AOS 处理均不利于诱导小麦幼苗的抗病性。此外,0.1%和 0.3% AOS 处理组的小麦幼苗虽然较 0.2% AOS 处理组表现出明显的发病症状,但其病害程度显著低于 0.05%和 0.5% AOS 处理组以及空白处理组。综合以上结果表明,0.2% AOS 为诱导小麦幼苗抗纹枯病的最适浓度。

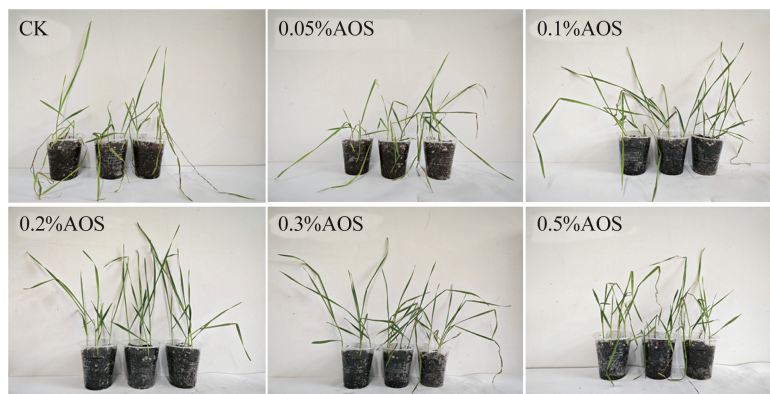


图 3 不同质量体积浓度褐藻寡糖诱导小麦幼苗抗纹枯病效果

Fig. 3 Induced resistance of alginate oligosaccharides at different mass-volume concentrations against *R. solani* in wheat seedlings

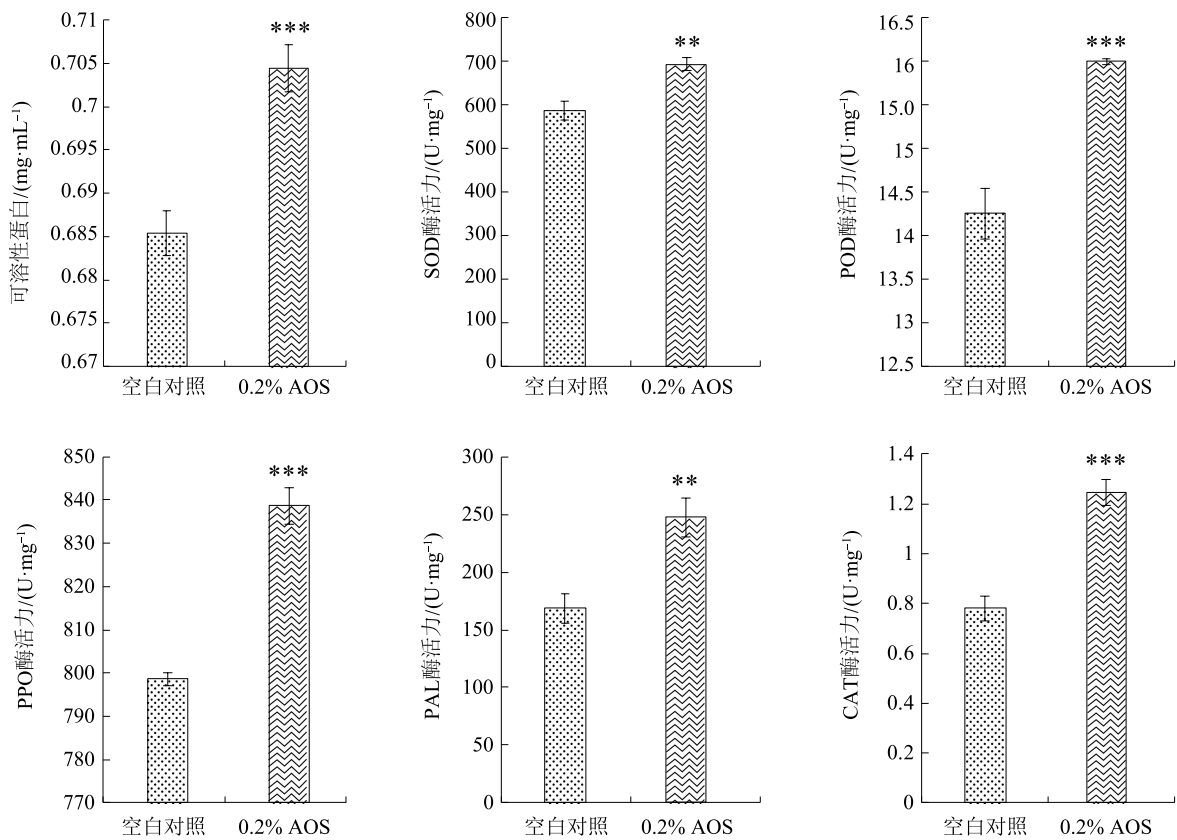
2.3 小麦幼苗的防御酶活性

上述研究结果表明,0.2% AOS 处理可显著增强小麦幼苗对纹枯病的诱导抗性。为进一步探究其生理机制,本研究测定了经 0.2% AOS 处理 2 d 后的小麦幼苗的防御酶活性(图 4)。数据表明,0.2% AOS 处理显著提高了小麦幼苗的可溶性蛋白含量(0.704 mg/mL),相较于空白对照组(0.685 mg/mL)增加了 2.8%,表明 AOS 可能通过促进蛋白质合成增强植物的抗逆能力。此外,关键防御酶的活性也均呈现显著上升趋势,例如,SOD、POD、CAT、PPO 以及 PAL 酶的活性分别为 692.952、15.994、838.615、247.159 和 1.246 U/mg,均显著高于空白对照组(图 4)。以上结果表明,0.2% AOS 处理能够有效激活小麦幼苗的防御酶系统,从而增强其对纹枯病的系统性抗性。

2.4 褐藻寡糖促进小麦幼苗生长

为了探究 AOS 处理在诱导小麦幼苗抗纹枯病以及提高防御酶活性的同时对小麦幼苗生长发育的潜在影响,本研究测定了不同质量体积浓度 AOS 处理下小麦幼苗株高和根长的动态变化趋势(图 5)。数据显示,在处理初期的 7 天内,各 AOS 处理组与空白对照组的小麦幼苗株高增长速率基本保持一致。然而,随

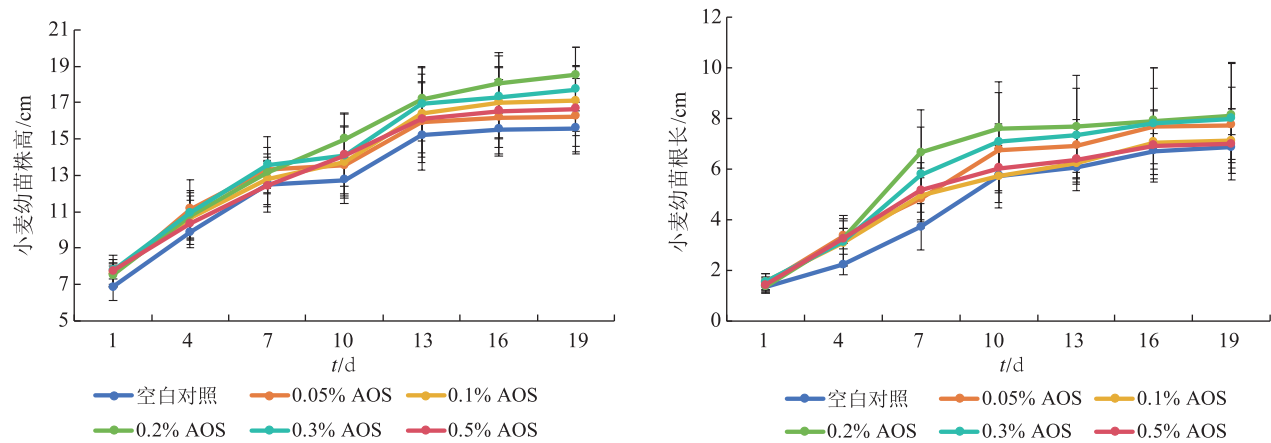
着处理时间的延长,0.2% AOS 处理组展现出明显的生长优势,其株高增长速率高于空白对照组及其他浓度处理组。近似的,0.2% AOS 处理组的小麦幼苗根系也展示出优于空白对照组和其他处理组的生长优势。值得注意的是,在测试的各浓度梯度中,0.3% AOS 处理组虽也显示出一定的促生长作用,但其效果相对弱于 0.2%处理组。综合数据发现,0.2% AOS 处理对小麦幼苗的株高和根长均产生较为显著的促进作用。此外,对叶面喷施褐藻寡糖 19 d 后小麦幼苗生物量的测定结果如表 1 所示。数据显示,0.2% AOS 处理组的地上部鲜重和干重较空白对照组显著增加,但地下部鲜重和干重与空白对照组差异不显著。结合前



注:图中数据为平均值±标准差,*表示差异具有统计学意义($P<0.05$),**表示差异显著($P<0.01$),***表示差异极显著($P<0.001$)。

图 4 经 0.2%褐藻寡糖叶面喷施处理 2 d 后小麦幼苗的防御酶活性

Fig. 4 Defense enzyme activities in wheat seedlings after foliar spraying with 0.2% alginate oligosaccharides for 2 days



注:图中数据为平均值±标准差。

图 5 经不同质量体积浓度褐藻寡糖叶面喷施处理后小麦幼苗株高和根长的变化趋势

Fig. 5 Variations in plant height and root length of wheat seedlings after foliar spraying with alginate oligosaccharides at different mass-volume concentrations

期获得的 AOS 诱导抗病性实验结果,本研究确定 0.2% 为 AOS 处理的最佳浓度。该浓度不仅能有效激活植物的防御系统,同时可促进小麦幼苗的健康生长,实现抗病性与生长发育的协同提升。这一结果与张冰等报道的 0.2% AOS 是促进黄瓜幼苗生长和提高防御酶活性的最适浓度的结论相一致^[18]。

表 1 经不同质量体积浓度褐藻寡糖叶面喷施处理 19 d 后小麦幼苗地上部和地下部的鲜重和干重

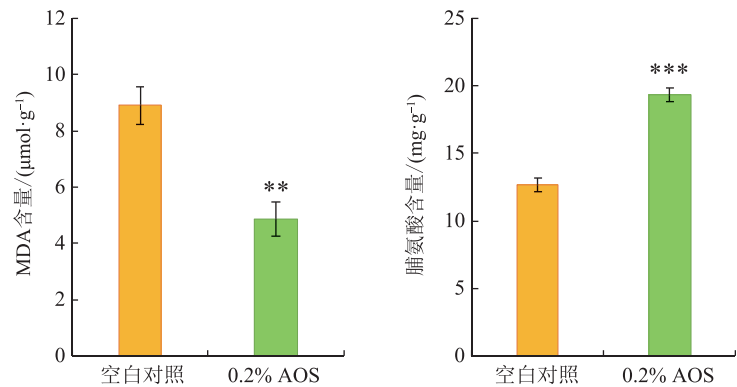
Tab. 1 Fresh weight and dry weight of aboveground and underground parts of wheat seedlings after 19 days of foliar spraying with alginate oligosaccharides at different mass-volume concentrations

实验分组	鲜重/g		干重/g	
	地上部	地下部	地上部	地下部
空白对照	0.162 ± 0.048b	0.155 ± 0.043a	0.022 ± 0.010b	0.013 ± 0.005bc
0.05% AOS	0.192 ± 0.047ab	0.144 ± 0.029a	0.029 ± 0.010ab	0.011 ± 0.003c
0.1% AOS	0.171 ± 0.039ab	0.113 ± 0.022b	0.023 ± 0.007b	0.012 ± 0.004c
0.2% AOS	0.216 ± 0.039a	0.151 ± 0.038a	0.037 ± 0.008a	0.017 ± 0.005ab
0.3% AOS	0.192 ± 0.060ab	0.145 ± 0.033a	0.030 ± 0.012ab	0.018 ± 0.006a
0.5% AOS	0.174 ± 0.043ab	0.111 ± 0.019b	0.027 ± 0.009b	0.014 ± 0.005abc

注:表中数据为平均值±标准差。同列不同小写字母表示不同处理间经 Duncan 多重比较检验($P < 0.05$),存在显著差异。

2.5 小麦幼苗丙二醛和脯氨酸的含量

研究表明,丙二醛和脯氨酸分别作为植物膜脂过氧化程度和渗透调节能力的重要标志物,其含量变化可有效反映植物的生长适应性及生物量积累状况^[30-31]。为了探究褐藻寡糖(AOS)对小麦幼苗生长的调控作用,测定了经 0.2% AOS 处理第 19 d 后小麦幼苗中丙二醛和脯氨酸的含量变化,结果如图 6 所示。数据表明,与空白对照相比,0.2% AOS 处理显著提升了小麦幼苗中的脯氨酸含量,这一结果有助于维持植物细胞的渗透平衡,进而保护关键酶的活性和细胞膜结构的完整性。再者,丙二醛含量较空白对照组显著降低,这表明植物细胞的抗氧化能力增强。综合以上结果,0.2% AOS 处理显著提高了小麦幼苗的抗逆能力,为其在非生物胁迫条件下的生长提供了生理保障。



注:图中数据为平均值±标准差,*表示差异具有统计学意义($P < 0.05$),

表示差异显著($P < 0.01$),*表示差异极显著($P < 0.001$)。

图 6 经 0.2% 褐藻寡糖处理第 19 d 后小麦幼苗的丙二醛和脯氨酸含量

Fig. 6 Malondialdehyde (MDA) and proline content in wheat seedlings on day 19 after treatment with 0.2% alginate oligosaccharides

3 结论

随着全球人口持续增长和耕地资源日益紧张,农作物稳产高产面临严峻挑战。植物真菌性病害的持续蔓延已经严重威胁粮食安全,发展环境友好型防控策略成为实现农业可持续发展的关键所在。通过系统性评估褐藻寡糖(AOS)5 个质量体积浓度梯度(0.05%、0.1%、0.2%、0.3%和 0.5%)对小麦纹枯病的诱导抗病性及促生长作用,发现 0.2% AOS 处理表现出最优的诱导抗病效果,其生理机制主要表现为显著提升可溶性蛋白含量,并同步激活 SOD、POD、PPO、PAL 和 CAT 等关键防御酶的活性,证实了 AOS 可通过诱导系统获得性抗性增强小麦对纹枯病的抗侵染能力。在生长调控方面,0.2% AOS 处理同时展示出最佳的促生长效应,主要表现为小麦幼苗株高显著增加和根系的伸长,并通过调控丙二醛和脯氨酸含量显著增强植物抗逆能力。这一发现为 AOS 作为植物生长调节剂和抗病诱导剂的实际应用提供了重要参考,同时也为后续研究不同浓度 AOS 处理对作物生长发育的长期影响奠定了基础。

参 考 文 献

- [1] STUKENBROCK E, GURR S. Address the growing urgency of fungal disease in crops[J]. Nature, 2023, 617: 31-34.
- [2] SCHUSTER M, KILARU S, STEINBERG G. Azoles activate type I and type II programmed cell death pathways in crop pathogenic fungi[J]. Nature Communion 2024, 15: 4357.
- [3] 病虫害测报处. 2025 年全国农作物重大病虫害发生趋势预报[EB/OL]. 全国农技推广网, 2025-01-03.
- [4] YANG R, SHI Q, HUANG T, et al. The natural pyrazolotriazine pseudoiodinine from *Pseudomonas mosselii* 923 inhibits plant bacterial and fungal pathogens[J]. Nature Communion, 2023, 14: 734.
- [5] DORIGAN A, MOREIRA S, GUIMARÃES S, et al. Target and non-target site mechanisms of fungicide resistance and their implications for the management of crop pathogens[J]. Pest Management Science, 2023, 79: 4731-4753.
- [6] HIDEO I. New chemical fungicides in relation to risk for resistance development[J]. Tropical Plant Pathology, 2023, 49(1): 18-35.
- [7] VAV AUBEL G, CAMBIER P, DIEU M, et al. Plant immunity induced by COS-OGA elicitor is a cumulative process that involves salicylic acid[J]. Plant Science, 2016, 247: 60-70.
- [8] 周欣欣, 吴声敢, 王倬, 等. 植物免疫诱导剂酰氨基寡糖素对环境非靶标生物的毒性研究[J]. 现代农药, 2022, 21(3): 50-53.
- [9] 余劲聪, 何舒雅, 林克明. 海洋寡糖诱导植物抗逆性的研究进展[J]. 中国农业科技导刊, 2016, 18(4): 44-51.
- [10] 马式太, 王峰, 成琪璐, 等. 海藻寡糖在农业领域的研究应用进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(33): 86-92.
- [11] 王怡萍, 彭予汐, 徐一仟, 等. 氨基寡糖素对小麦条锈病防控及增产效果评估[J]. 植物保护学报, 2025, 52(1): 222-230
- [12] WANG M, VEERAPERUMAL S, ZHONG S, et al. Fucoidan-derived functional oligosaccharides: recent developments, preparation, and potential applications[J]. Foods, 2023, 12: 878.
- [13] LI L, JIANG J, YAO Z, et al. Recent advances in the production, properties and applications of alginate oligosaccharides-a mini review [J]. World Journal of Microbiology and Biotechnology, 2023, 39(8): 207.
- [14] 何浩锋, 李绍冲, 吕明, 等. 褐藻寡糖的制备方法及其在肥料增效中的应用研究进展[J]. 生态产业科学与磷氟工程, 2025, 40(2): 54-65.
- [15] SONG M, CHEN L, DONG C, et al. Alginate oligosaccharide and gut microbiota: exploring the key to health[J]. Nutrients, 2025, 17: 1977.
- [16] LI Y, WANG J, FAN K, et al. Alginate oligosaccharide coordinately modulates endogenous phytohormone profiles to enhance tomato growth[J]. Horticulturae, 2025, 11: 580.
- [17] GUO W, CHEN M, ZOU C, et al. Design, synthesis and biological evaluation of alginate oligosaccharide derivatives[J]. Bioorganic & Medicinal Chemistry Letters, 2025, 116: 130039.
- [18] 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.
- [19] 郑志红. 褐藻胶裂解酶 AlyW201 的表达、性质、固定化及产物褐藻寡糖在农业应用中的研究[D]. 大连: 大连海洋大学, 2023.
- [20] 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(26): 446-454.
- [21] 侯琤, 周增强, 王丽, 等. 水杨酸诱导对苹果体内防御酶活性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(18): 39-43.
- [22] 杨勇, 张启林, 杜宜新, 等. 绿色木霉对小麦防御酶系的影响[J]. 植物保护学报, 2005, 32(4): 437-438.
- [23] IRFAN M, BHAT M A, RASHID U, et al. Enzymatic activity assays and functional component profiling reveals coordinated defense response of mungbean against *Cercospora canescens* during leaf spot disease[J]. Plant Biotechnology Reports, 2024, 18: 563-577.
- [24] 徐亚, 范会芬, 赵玎玲, 等. 考马斯亮蓝法测定大豆水溶性蛋白提取方法的优化[J]. 大豆科学, 2022, 41(2): 196-202.
- [25] NI J H, XUE Y W, LIAO J L. Dynamic changes and spectrometric quantitative analysis of antioxidant enzyme activity of TYLCV-infected tomato plants[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2025, 232: 110109.
- [26] 赵炀, 李永生, 高秀峰. 基于愈创木酚荧光减量准确测定过氧化物酶活性的新方法[J]. 分析化学, 2015, 43(7): 1040-1046.
- [27] 郭胜伟, 高云东. 比色法测定中华芦荟叶片中叶绿素含量方法的研究[J]. 中医药学刊, 2004(1): 53-76.
- [28] 王彦, 杨若兰, 袁绍, 等. 高温胁迫下二斑叶螨体内海藻糖、山梨醇、丙二醛和蛋白质含量的应激变化[J]. 西北农业学报, 2024, 33(8): 1549-1558.
- [29] 黄雯雯, 王玲, 刘连盟, 等. 水稻纹枯病立枯丝核菌的分类及遗传多样性研究进展[J]. 中国稻米, 2010, 16(3): 34-38.
- [30] 王志昊, 叶冬梅, 何炎红, 等. 5 种沙生植物丙二醛、脯氨酸和 2 种氧化物酶比较[J]. 分子植物育种, 2018, 16(11): 3727-3731.
- [31] 胡春霞. 植物生长调节剂及复配对南果梨苗木抗寒性的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(13): 179-182.

(责任编辑:刘庆松)