

斜生四链藻源生物刺激剂对小麦抗盐性的影响

王嘉姝^{1a}, 王捷^{1a, 1b, ①}, 史佳琪^{1a}, 董建新^{1a}, 王清华^{1a, 1b}, 郑军²

[1. 太原师范学院: a. 生物科学与技术学院, b. 汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室, 山西 晋中 030619;
2. 山西农业大学小麦研究所 农业农村部有机旱作农业重点实验室(部省共建), 山西 临汾 041000]

摘要: 为深入探究斜生四链藻(*Tetradismus obliquus* Wynne)源生物刺激剂对盐胁迫下小麦(*Triticum aestivum* Linn.)种子萌发及幼苗生长的影响,以蒸馏水为对照组,测定在盐胁迫(100 mmol·L⁻¹ NaCl)下外源施加0、25、50、100和200 mg·L⁻¹斜生四链藻细胞提取液(MAE)后小麦种子萌发参数及幼苗生长和生理生化指标,利用主成分分析和隶属函数对不同质量浓度MAE的作用效果进行综合评价。结果表明:MAE可显著($P<0.05$)促进盐胁迫下小麦种子萌发,以质量浓度25 mg·L⁻¹促进效果最佳,分别使盐胁迫下的发芽率、发芽势和发芽指数提高了18.26%、34.52%和24.90%。MAE整体上可显著提升盐胁迫下小麦幼苗生长,以质量浓度50 mg·L⁻¹效果最佳,分别使盐胁迫下的茎长、根长、茎鲜质量、根鲜质量、茎干质量、根干质量提高了27.74%、11.70%、13.40%、37.42%、22.58%、53.66%。盐胁迫使小麦幼苗叶片的渗透调节物质含量较对照组显著上升,MAE处理使其进一步升高,且在50 mg·L⁻¹MAE处理下最高。与对照组相比,盐胁迫及MAE处理对叶片叶绿素b含量的影响不显著;盐胁迫使叶片叶绿素a含量显著降低,50 mg·L⁻¹MAE使叶片叶绿素a含量较盐胁迫组提高了31.65%;盐胁迫对叶片类胡萝卜素含量无显著影响,而MAE处理明显提高其含量,50 mg·L⁻¹MAE使叶片类胡萝卜素含量较盐胁迫组提高了60.27%。与对照组相比,盐胁迫使小麦幼苗根系膜透性和叶片丙二醛含量显著升高,MAE处理使二者有一定程度的降低,但整体上仍显著高于对照组;盐胁迫整体上显著提高了叶片抗氧化酶活性,MAE处理进一步提高了叶片抗氧化酶活性。综合评价结果显示50和25 mg·L⁻¹MAE对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的促进效果较佳。综上,MAE可有效缓解盐胁迫对小麦种子萌发及幼苗生长的抑制作用,提高小麦的抗盐性。

关键词: 斜生四链藻细胞提取液; 生物刺激剂; 小麦; 抗盐性

中图分类号: Q948.113; S143.8; S512.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2025)02-0031-09

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2025.02.04

Effect of *Tetradismus obliquus*-derived biostimulant on salt resistance of *Triticum aestivum*

WANG Jiashu^{1a}, WANG Jie^{1a, 1b, ①}, SHI Jiaqi^{1a}, DONG Jianxin^{1a}, WANG Qinghua^{1a, 1b}, ZHENG Jun²

[1. Taiyuan Normal University: a. College of Biological Sciences and Technology, b. Shanxi Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology Security in Fenhe River Basin, Jinzhong 030619, China; 2. Key Laboratory of Sustainable Dryland Agriculture (Co-construction by Ministry and Province), Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Institute of Wheat Research, Shanxi Agricultural University, Linfen 041000, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2025, 34(2): 31-39

Abstract: To deeply investigate the effects of *Tetradismus obliquus* Wynne-derived biostimulant on seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* Linn. under salt stress, 0, 25, 50, 100, and 200 mg·L⁻¹ *T. obliquus* cell extract (MAE) were exogenously applied under salt stress (100 mmol·L⁻¹ NaCl), and distilled water was used as the control group, then the germination parameters of *T. aestivum* seeds as well as the growth and physiological and biochemical indexes of the seedlings were measured, and the effects of different mass concentrations of MAE were comprehensively evaluated by using principal

收稿日期: 2024-09-23

基金项目: 国家自然科学基金项目(32000167); 2024年度太原师范学院研究生教育创新项目(SYYJSYC-2429)

作者简介: 王嘉姝(2001—),女,山西柳林人,硕士研究生,主要从事藻类资源化利用研究。

①通信作者 E-mail: nostoc@126.com

引用格式: 王嘉姝, 王捷, 史佳琪, 等. 斜生四链藻源生物刺激剂对小麦抗盐性的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2025, 34(2): 31-39.

component analysis and membership function. The results show that MAE can significantly ($P < 0.05$) promote *T. aestivum* seed germination under salt stress, and the promoting effect is the best at the mass concentration of $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which increases the germination rate, germination potential, and germination index under salt stress by 18.26%, 34.52%, and 24.90%, respectively. MAE can significantly enhance *T. aestivum* seedling growth under salt stress in general, and the effect is the best at the mass concentration of $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, which increases the stem length, root length, stem fresh mass, root fresh mass, stem dry mass, and root dry mass under salt stress by 27.74%, 11.70%, 13.40%, 37.42%, 22.58%, and 53.66%, respectively. Salt stress significantly increases the content of osmolytes in *T. aestivum* seedling leaves compared with the control group, and MAE treatment further elevates it, which is the highest under $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE treatment. Compared with the control group, the effects of salt stress and MAE treatment on leaf chlorophyll *b* content are not significant; salt stress significantly decreases the leaf chlorophyll *a* content, while $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE increases the leaf chlorophyll *a* content by 31.65% compared with the salt stress group; salt stress has no significant impact on leaf carotenoid content, but MAE treatment obviously increases its content, and $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE increases the leaf carotenoid content by 60.27% compared with the salt stress group. Compared with the control group, salt stress significantly increases the root membrane permeability and leaf malonaldehyde content in *T. aestivum* seedlings, and MAE treatment results in a certain degree of reduction in both indexes, but they are still significantly higher than those in the control group in general. Salt stress significantly increases the leaf antioxidant enzyme activities in general, and MAE treatment further enhances the leaf antioxidant enzyme activities. The comprehensive evaluation results show that 50 and $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE have relatively good promoting effects on seed germination and seedling growth of *T. aestivum* under salt stress. In conclusion, MAE can effectively alleviate the inhibitory effects of salt stress on *T. aestivum* seed germination and seedling growth, and enhance salt resistance of *T. aestivum*.

Key words: *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract; biostimulant; *Triticum aestivum* Linn.; salt resistance

小麦 (*Triticum aestivum* Linn.) 是全球重要的粮食作物, 富含蛋白质和糖类营养成分, 是全球 35% ~ 40% 人口的日常主食, 在保障世界粮食供应方面扮演着至关重要的角色^[1]。气候变化和工业污染等加剧了土壤盐碱化问题, 已成为限制小麦产量和营养品质的关键因子^[2]。盐胁迫会对小麦造成生理性干旱, 破坏其组织和细胞结构, 并通过诱导渗透胁迫、离子胁迫和氧化胁迫等, 损坏小麦的光合系统和酶系统, 同时干扰蛋白质合成, 从而破坏小麦正常的生理生化功能, 导致其产量下降^[3]。目前, 盐碱地改良方法主要包括建立排水和灌溉系统、深耕、种植耐盐植物、施用可生物降解的有机肥料和添加化学制剂等, 然而, 这些方法往往因效率低、实施成本高、不可持续等问题而在盐碱地改良中难以达到预期效果^[4]。因此, 亟需探索并实施一系列具有可持续性的策略, 提升小麦抗盐性, 进而高效利用盐碱地资源, 同时保障粮食生产和生态安全。

生物刺激剂可通过激活细胞内的信号传导途径, 促进植物对营养成分的吸收利用, 提高植物代谢效率, 刺激植物内源激素分泌, 提升植物抗逆性; 也可作

为土壤改良剂, 改善土壤结构和功能, 促进作物产量和质量的提升^[5]。微藻以生长周期短、适宜工业养殖、可合成多种结构和功能特异的高附加值生物活性成分等优势, 成为开发新型强效生物刺激剂的理想选择^[6]。微藻不仅能够通过 Na^+/K^- 泵和 Cl^- 泵有效吸收和利用盐分, 还能通过分泌带负电荷的胞外聚合物 (EPS), 实现对 Na^+ 的吸附和去除^[7]。此外, 微藻细胞提取物含有丰富的植物激素, 包括细胞分裂素、脱落酸等, 可作为化学信使调节植物细胞活动, 同时能够促进光合作用、呼吸作用、核酸合成等过程, 改善植物生长^[8]。微藻生物刺激剂对植物的积极作用已有一些研究报道, 如德巴衣藻 (*Chlamydomonas debaryana* Gerloff) 可显著提高盐胁迫下小麦叶绿素含量以及光系统 II 活性, 有效改善小麦叶片对光能的吸收和转换能力, 提高其耐盐性^[9]; 在盐胁迫条件下, 杜氏盐藻 [*Dunaliella salina* (Dunal) Teodoresco] 细胞提取物可使小麦种子的发芽率提高 96%^[10], 还可提高西葫芦 (*Cucurbita pepo* Linn.) 品种 ‘Mabrouka’ 中类胡萝卜素、酚类化合物及氮、磷、钾的含量, 提升植株抗氧化活性并调节植物的离子稳态, 促进植株抗

逆性和生产力^[11];紫球藻(*Porphyridium cruentum* Nägeli)生物刺激剂能够通过上调抗氧化酶活性和渗透调节物质积累来提高番茄(*Solanum lycopersicum* Linn.)和草莓(*Fragaria × ananassa* Duch.)的耐盐性^[12]。这些研究表明,微藻生物刺激剂在缓解作物受盐胁迫伤害方面具有巨大的应用潜力。

斜生四链藻(*Tetradesmus obliquus* Wynne)为一种常见的淡水微藻,属于绿藻门(Chlorophyta)栅藻科(Scenedesmaceae)四链藻属(*Tetradesmus* G. M. Smith),对盐碱胁迫具有一定的适应能力^[13]。刘淑芳等^[14]研究表明:与蛋白核小球藻(*Chlorella pyrenoidosa* Molinari et Calvo-Pérez)、卷曲鱼腥藻(*Anabeana circinalis* Rab.)相比,栅藻科的四尾栅藻(*Scenedesmus quadricauda* Chodat et Illeg)对黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)幼苗生长及开花的促进效果更为显著,同时能够提升土壤养分(有机质、碱解氮、速效磷、速效钾等)含量以及水解酶(脲酶、蔗糖酶)活性,增强土壤肥力,促进植物生长。与蒸馏水相比,施加栅藻(*Desmodesmus* sp.)生物刺激剂可使小麦种子发芽率、发芽势以及发芽指数分别显著提高24%、35%和28%,有效促进小麦种子萌发^[15]。研究发现,斜生四链藻能够通过直接吸收和细胞表面吸附等途径有效去除水中大量的盐分,对盐分的去除量可达 $1.7 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$,脱盐率为20%^[16]。

目前关于四链藻属的研究主要集中于污水处理^[17]、生物柴油^[18]及光合作用机制^[19]上,而对作物受盐胁迫伤害的缓解效果鲜见报道。Abd El Baky等^[20]研究表明斜生四链藻可提升小麦的抗盐能力,但并未明确其发挥最佳缓解效果的浓度。鉴于此,本研究以斜生四链藻细胞提取液作为生物刺激剂,探索不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长的促进效果,并通过测定小麦叶片渗透调节物质含量、叶绿素含量以及抗氧化酶活

性等的变化,揭示斜生四链藻源生物刺激剂提高小麦抗盐性的机制,以期为盐碱地小麦种植提供科学、高效的解决方案与理论支撑,助力农业可持续发展与生态环境保护。

1 材料和方法

1.1 材料

供试藻株采自云南省昆明市石林彝族自治县石滩水库旁村庄水源处的潮湿石块上(地理位置为北纬 $25^{\circ}00'13''$ 、东经 $103^{\circ}19'22''$),采用经典毛细管分离法进行纯化,基于形态学、分子系统发育学和生态学相结合的多相分类法对其进行分类鉴定,最终确定为斜生四链藻。将纯化后的藻株在BG-11培养基中进行扩大培养,选取浓度一致($1.5 \times 10^9 \text{ L}^{-1}$)的藻液于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $4\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心10 min,收集藻泥沉淀;随后将藻泥置于SCIENTZ-12N/A型冷冻干燥机(宁波新芝生物科技股份有限公司)中干燥48 h,获得藻粉,并置于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存、备用。供试小麦品种‘济麦22’(‘Jimai 22’)自山西高新农业技术市场购入。

1.2 方法

1.2.1 处理溶液的制备 将1 g干燥藻粉溶解于100 mL去离子水中,用BILON92-IIIDL超声波破碎仪(上海比朗仪器有限公司)冰浴破碎15 min(超声6 s,间隔4 s),于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 、 $5\ 000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心5 min,上清液即为斜生四链藻细胞提取液(MAE),此时的质量浓度为 $0.01 \text{ g} \cdot \text{mL}^{-1}$,随后用去离子水分别稀释成质量浓度25、50、100、200 $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的供试溶液,于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存、备用。各质量浓度MAE的理化性质见表1。

实验设置6个处理,分别为蒸馏水[对照组(CK)]、 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl溶液(S)、 $S-25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$

表 1 不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液(MAE)的理化性质($\bar{X} \pm SD$)

Table 1 Physicochemical properties of different mass concentrations of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE) ($\bar{X} \pm SD$)

MAE 质量浓度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) MAE mass concentration	pH 值 pH value	电导率/ ($\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$) Electric conductivity	盐度/% Salinity	可溶性固形物含量/ ($\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$) Soluble solid content	蛋白质含量/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) Protein content	K 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) K content	Ca 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) Ca content	Na 含量/ ($\text{mg} \cdot \text{mL}^{-1}$) Na content
25	7.56 ± 0.03	2.55 ± 0.02	0.122 ± 0.003	0.47 ± 0.03	0.110 ± 0.010	0.213 ± 0.005	0.386 ± 0.004	0.148 ± 0.005
50	7.65 ± 0.05	4.34 ± 0.02	0.228 ± 0.002	0.89 ± 0.03	0.283 ± 0.004	0.354 ± 0.005	0.660 ± 0.010	0.215 ± 0.010
100	7.67 ± 0.05	7.64 ± 0.05	0.437 ± 0.001	1.74 ± 0.04	0.390 ± 0.010	0.720 ± 0.010	1.350 ± 0.020	0.438 ± 0.046
200	7.72 ± 0.04	14.82 ± 0.05	0.848 ± 0.003	3.46 ± 0.04	0.665 ± 0.005	1.090 ± 0.580	2.350 ± 0.050	0.789 ± 0.016

MAE、S-50 mg · L⁻¹ MAE、S-100 mg · L⁻¹ MAE、S-200 mg · L⁻¹ MAE。

1.2.2 小麦种子发芽实验 挑选大小一致、籽粒饱满的小麦种子,先用体积分数 0.5% NaClO 溶液消毒 30 min,再用 ddH₂O 冲洗 3~5 次,然后将种子置于蒸馏水中,在 26 °C 的黑暗环境中浸种 12 h,随后将种子均匀摆在铺有双层滤纸的培养皿(直径 90 mm)中,每个培养皿 50 粒种子,每个处理 3 个培养皿,每个培养皿加入 15 mL 处理液,置于温度 26 °C、空气相对湿度 60%、光照度 4 500 lx、光照时间 12 h · d⁻¹ 的 BSG-300 恒温培养箱(上海博讯实业有限公司)中培养 7 d。每天观察并记录小麦种子发芽数,同时补充相应处理液以保持处理体系稳定。参照任毅等^[21]的方法计算小麦种子的发芽率、发芽势、发芽指数。

1.2.3 小麦幼苗培育及指标测定 按上述方法将小麦种子浸种后置于培养皿中,用蒸馏水在 26 °C 的黑暗环境中孵育 2 d;选取芽长基本一致的小麦种子,转移到充满 V(蛭石):V(泥炭)=1:1 混合基质的萌发盘(长 54 cm、宽 28 cm)中,每个萌发盘 15 粒种子,每个处理 3 个萌发盘,每个萌发盘加入 15 mL 处理液。将萌发盘置于温度 26 °C、空气相对湿度 60%、光照度 4 500 lx、光照时间 12 h · d⁻¹ 的恒温培养箱中培养。持续培养 2 周,每日观察植株生长状况并定时补充相应处理液。

实验结束后,每个处理分别选取 10 株长势基本一致的小麦幼苗,用直尺(精度 0.1 cm)测量根和茎的长度,用电子天平(精度 0.01 g)称量单株根和茎的鲜质量,随后将根和茎放入 80 °C 烘箱中烘 24 h,称量单株根和茎的干质量。叶片相对含水量参照季平等^[22]的方法测定;叶片脯氨酸、可溶性糖、可溶性蛋白质含量分别采用 Bradford 法^[23]、蒽酮法^[22]和酸性茚三酮法^[24]测定;叶片叶绿素 a、叶绿素 b 和类胡萝卜素含量采用浸提法^[25]测定;根系膜透性使用雷磁 DDSJ-318T 电导率测定仪(上海仪电科学仪器股份有限公司)测定;使用南京建成生物工程研究所生产的相应试剂盒测定叶片超氧化物歧化酶(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;叶片丙二醛(MDA)含量参照吴承东等^[26]的方法测定。

1.3 数据统计分析

使用 Microsoft EXCEL 2021 软件计算平均值和标准差,并制表。使用 IBM SPSS Statistics 22 软件进

行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Duncan's 多重极差检验,对标准化后的指标进行主成分分析,并结合隶属函数法对盐胁迫下不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液处理时小麦种子萌发和幼苗生长状况进行综合评价^[27]。

2 结果和分析

2.1 斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦种子萌发的影响

结果(表 2)显示:与对照组相比,盐胁迫(100 mmol · L⁻¹ NaCl)下小麦种子发芽率、发芽势、发芽指数分别降低了 17.85%、31.14%、22.30%。不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液(MAE)均可缓解盐胁迫的抑制作用,且缓解效果随 MAE 质量浓度升高整体呈降低趋势,25 mg · L⁻¹ MAE 使盐胁迫处理下的小麦种子发芽率、发芽势、发芽指数分别提高了 18.26%、34.52%、24.90%,且与对照组无显著差异。

表 2 斜生四链藻细胞提取液(MAE)对盐胁迫下小麦种子萌发的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 2 Effect of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE) on seed germination of *Triticum aestivum* Linn. under salt stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	发芽率/% Germination rate	发芽势/% Germination potential	发芽指数 Germination index
CK	93.33±0.04a	81.33±0.10a	61.87±4.82a
S	76.67±0.03d	56.00±0.03c	48.07±4.29c
S-25 mg · L ⁻¹ MAE	90.67±0.01ab	75.33±0.05ab	60.04±3.16ab
S-50 mg · L ⁻¹ MAE	88.00±0.02abc	72.00±0.02ab	55.83±0.62ab
S-100 mg · L ⁻¹ MAE	86.67±0.03bc	69.33±0.03b	54.76±2.10b
S-200 mg · L ⁻¹ MAE	83.33±0.03c	66.67±0.04b	55.12±2.12b

¹⁾ CK: 对照组(蒸馏水)The control group (distilled water); S: 盐胁迫 Salt stress (100 mmol · L⁻¹ NaCl). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

2.2 斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦幼苗的影响

2.2.1 对幼苗生长及叶片相对含水量的影响 结果(表 3)显示:与对照组相比,盐胁迫(100 mmol · L⁻¹ NaCl)下小麦幼苗茎和根的长度、鲜质量和干质量均显著($P < 0.05$)降低,25~100 mg · L⁻¹ 四链藻细胞提取液(MAE)处理均能使上述指标不同程度升高,且以 50 mg · L⁻¹ MAE 的促进效果最佳。与盐胁迫处理

组相比, 50 mg · L⁻¹ MAE 处理使茎长、根长、茎鲜质量、根鲜质量、茎干质量和根干质量分别提高了 27.74%、11.70%、13.40%、37.42%、22.58%、53.66%, 差异均显著。同时, 小麦幼苗叶片相对含水量在盐胁迫

处理下显著低于对照组, 添加 MAE 对此抑制作用的缓解效果整体不显著, 仅 50 mg · L⁻¹ MAE 使叶片相对含水量较盐胁迫处理组提高了 3.05%, 与对照组差异不显著。

表 3 斜生四链藻细胞提取液 (MAE) 对盐胁迫下小麦幼苗生长及叶片相对含水量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effect of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE) on growth and leaf relative water content in *Triticum aestivum* Linn. seedlings under salt stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	茎长/cm Stem length	根长/cm Root length	茎鲜质量/g Stem fresh mass	根鲜质量/g Root fresh mass	茎干质量/g Stem dry mass	根干质量/g Root dry mass	叶片相对含水量/% Leaf relative water content
CK	14.42±0.28a	14.04±0.39a	1.252±0.051a	0.730±0.033a	0.126±0.007a	0.076±0.004a	94.69±0.46a
S	9.12±0.57c	11.97±0.62c	0.985±0.052c	0.497±0.037c	0.093±0.003d	0.041±0.004c	88.16±2.19b
S-25 mg · L ⁻¹ MAE	10.88±0.70b	12.90±0.39b	1.031±0.083bc	0.644±0.040ab	0.108±0.008bc	0.054±0.005b	89.02±1.74b
S-50 mg · L ⁻¹ MAE	11.65±0.19b	13.37±0.61ab	1.117±0.090b	0.683±0.046a	0.114±0.006ab	0.063±0.006b	90.85±1.27ab
S-100 mg · L ⁻¹ MAE	10.97±0.13b	12.47±0.41bc	0.988±0.033c	0.567±0.063bc	0.099±0.009cd	0.058±0.004b	88.71±1.44b
S-200 mg · L ⁻¹ MAE	9.14±0.31c	11.91±0.20c	0.978±0.029c	0.493±0.048c	0.092±0.003d	0.040±0.006c	87.98±5.60b

¹⁾ CK: 对照组 (蒸馏水) The control group (distilled water); S: 盐胁迫 Salt stress (100 mmol · L⁻¹ NaCl). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

2.2.2 对叶片渗透调节物质和光合色素含量的影响
结果 (表 4) 显示: 与对照组相比, 盐胁迫使小麦幼苗叶片的可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量分别增加了 11.84%、77.96% 和 77.78%。在盐胁迫处理的基础上添加不同质量浓度 MAE 可进一步提高叶片可溶性蛋白质、可溶性糖和脯氨酸含量, 且三者含量随 MAE 质量浓度升高呈先升高后降低的趋势, 并在 50 mg · L⁻¹ MAE 处理下最高。

与对照组相比, 盐胁迫使小麦幼苗叶片叶绿素 *a* 含量显著降低, 而叶绿素 *b* 和类胡萝卜素含量无显著变化。在盐胁迫处理的基础上添加不同质量浓度 MAE 整体上可提高叶片叶绿素 *a*、叶绿素 *b* 和类胡萝卜素含量, 且三者含量随 MAE 质量浓度升高呈先增加后减少的趋势, 并在 50 mg · L⁻¹ MAE 处理下最高, 分别较盐胁迫处理组增加了 31.65%、14.69% 和 60.27%。

表 4 斜生四链藻细胞提取液 (MAE) 对盐胁迫下小麦幼苗叶片渗透调节物质和光合色素含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 4 Effect of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE) on contents of osmolytes and photosynthetic pigments in leaves of *Triticum aestivum* Linn. seedlings under salt stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	含量/(mg · g ⁻¹) Content					
	可溶性蛋白质 Soluble protein	可溶性糖 Soluble sugar	脯氨酸 Proline	叶绿素 <i>a</i> Chlorophyll <i>a</i>	叶绿素 <i>b</i> Chlorophyll <i>b</i>	类胡萝卜素 Carotenoid
CK	28.81±0.02c	18.56±0.85c	0.45±0.04b	4.50±0.61a	1.79±0.14a	0.70±0.16b
S	32.22±1.00b	33.03±3.91b	0.80±0.08a	3.16±0.70b	1.43±0.18a	0.73±0.02b
S-25 mg · L ⁻¹ MAE	33.16±1.97ab	36.26±2.30ab	0.93±0.12a	3.73±0.30ab	1.54±0.09a	1.12±0.22a
S-50 mg · L ⁻¹ MAE	34.87±1.37a	39.50±5.18a	0.97±0.10a	4.16±0.25a	1.64±0.27a	1.17±0.32a
S-100 mg · L ⁻¹ MAE	32.60±0.67ab	36.18±2.65ab	0.85±0.10a	3.84±0.34ab	1.44±0.31a	0.94±0.12ab
S-200 mg · L ⁻¹ MAE	32.34±1.53b	33.87±0.27ab	0.81±0.20a	3.15±0.14b	1.43±0.24a	0.91±0.09ab

¹⁾ CK: 对照组 (蒸馏水) The control group (distilled water); S: 盐胁迫 Salt stress (100 mmol · L⁻¹ NaCl). 同列中不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$).

2.2.3 对根系膜透性和叶片抗氧化指标的影响
结果 (表 5) 显示: 与对照组相比, 盐胁迫显著提高了小麦幼苗根系膜透性和叶片丙二醛 (MDA) 含量, 增幅分别为 57.78% 和 161.76%, 添加 MAE 可一定程度降

低根系膜透性并减少叶片 MDA 积累。在 50 mg · L⁻¹ MAE 处理下, 根系膜透性和叶片 MDA 含量最低, 分别较盐胁迫处理组降低了 18.31% 和 42.70%。

与对照组相比, 盐胁迫使小麦幼苗叶片超氧化物

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)活性均显著升高,添加MAE后,叶片中这4种酶的活性进一步提高。其中,添加MAE对叶片POD、CAT和APX活性

的影响较为显著,而对SOD活性无显著影响。与盐胁迫处理组相比,添加50 mg·L⁻¹MAE后叶片SOD、POD、CAT和APX的活性最高,增幅分别为4.36%、39.28%、86.88%和33.33%。

表5 斜生四链藻细胞提取液(MAE)对盐胁迫下小麦幼苗根系膜透性和叶片抗氧化指标的影响($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

Table 5 Effect of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE) on root membrane permeability and leaf antioxidant indexes of *Triticum aestivum* Linn. seedlings under salt stress ($\bar{X}\pm SD$)¹⁾

处理 Treatment	膜透性/% Membrane permeability	丙二醛含量/($\mu\text{mol}\cdot\text{g}^{-1}$) Malondialdehyde content	抗氧化酶活性/($\text{U}\cdot\text{mg}^{-1}$) Antioxidant enzyme activity			
			SOD	POD	CAT	APX
CK	0.45±0.04c	0.34±0.06c	16.35±1.29b	3.66±0.51c	3.81±0.39c	0.31±0.00d
S	0.71±0.05a	0.89±0.23a	19.97±1.50ab	4.15±0.43bc	7.09±3.04bc	0.75±0.11c
S-25 mg·L ⁻¹ MAE	0.68±0.03ab	0.75±0.01ab	20.45±2.78a	4.73±0.82b	10.41±0.34ab	0.79±0.01c
S-50 mg·L ⁻¹ MAE	0.58±0.05b	0.51±0.10bc	20.84±1.09a	5.78±0.31a	13.25±3.09a	1.00±0.06a
S-100 mg·L ⁻¹ MAE	0.66±0.11ab	0.81±0.18a	20.72±1.41a	4.56±0.21bc	10.52±4.99ab	0.95±0.16ab
S-200 mg·L ⁻¹ MAE	0.69±0.01ab	0.87±0.12a	20.67±2.01a	4.35±0.56bc	8.31±0.78abc	0.82±0.01bc

¹⁾ CK: 对照组(蒸馏水) The control group (distilled water); S: 盐胁迫 Salt stress (100 mmol·L⁻¹ NaCl). SOD: 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; CAT: 过氧化氢酶 Catalase; APX: 抗坏血酸过氧化物酶 Ascorbate peroxidase. 同列中不同小写字母表示差异显著($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P<0.05$).

2.3 不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长促进效果的综合评价

对小麦种子萌发和幼苗生长指标进行主成分分析,结果见表6。结果显示:前3个主成分的特征值

均大于1,累计贡献率达85.763%,表明这3个主成分能够反映小麦种子萌发和幼苗生长的基本情况。第1主成分的贡献率为62.311%,其中,茎长、根鲜质量、根干质量的载荷绝对值较高;第2主成分的贡献

表6 小麦种子萌发和幼苗生长指标的主成分(PC)分析¹⁾

Table 6 Principle component (PC) analysis of indexes of seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* Linn. ¹⁾

PC	各指标的载荷 Load of each index										Ei	CR/%	CCR/%
	R	P	I	l_s	l_r	RWC	m_{sf}	m_{rf}	m_{sd}	m_{rd}			
1	0.511	0.421	0.180	0.863	0.671	-0.019	0.595	0.847	0.683	0.875	6.231	62.311	62.311
2	0.800	0.892	0.963	0.321	0.410	0.129	-0.058	0.363	0.419	0.319	1.344	13.436	75.747
3	0.083	0.036	0.125	0.024	0.310	0.887	0.640	0.225	0.408	-0.092	1.002	10.016	85.763

¹⁾ R: 发芽率 Germination rate; P: 发芽势 Germination potential; I: 发芽指数 Germination index; l_s : 茎长 Stem length; l_r : 根长 Root length; RWC: 叶片相对含水量 Leaf relative water content; m_{sf} : 茎鲜质量 Stem fresh mass; m_{rf} : 根鲜质量 Root fresh mass; m_{sd} : 茎干质量 Stem dry mass; m_{rd} : 根干质量 Root dry mass. Ei: 特征值 Eigenvalue; CR: 贡献率 Contribution rate; CCR: 累计贡献率 Cumulative contribution rate.

率为13.436%,其中,发芽率、发芽势、发芽指数的载荷绝对值较高;第3主成分的贡献率为10.016%,其中,叶片相对含水量的载荷绝对值最高,且明显高于其他指标。

基于主成分分析结果对5个供试质量浓度斜生四链藻细胞提取液(MAE)进行综合评价,结果见表7。结果显示:50 mg·L⁻¹MAE的综合得分最高(0.961),25 mg·L⁻¹MAE的综合得分次之(0.791)。表明50和25 mg·L⁻¹MAE对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生长的促进效果较佳。

表7 不同质量浓度斜生四链藻细胞提取液(MAE)的综合得分

Table 7 Comprehensive scores on different mass concentrations of *Tetradesmus obliquus* Wynne cell extract (MAE)

MAE 质量浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$) MAE mass concentration	在各主成分中的得分 Score in each principal component			综合得分 Comprehensive score	排名 Rank
	1	2	3		
0	0.097	0.136	0.234	0.119	5
25	0.788	0.899	0.666	0.791	2
50	0.986	0.873	0.924	0.961	1
100	0.589	0.647	0.424	0.579	3
200	0.185	0.412	0.258	0.229	4

3 讨 论

3.1 斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦种子萌发的影响

种子萌发是植物生命周期中极为关键的阶段,也是对盐分变化尤为敏感的时期^[28]。盐分不仅通过引起渗透胁迫和离子毒害来干扰种子对水分的吸收和利用,还会抑制细胞分裂和关键酶活性,导致种子萌发受阻^[29]。研究表明:微藻细胞提取液中存在初生及次生代谢物(如氨基酸、维生素、细胞分裂素、生长素和脱落酸等),能够有效激发植物细胞分裂、打破种子休眠等一系列生理反应,从而促进种子萌发^[30-31]。本研究结果表明:100 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫对小麦种子萌发的不利影响可通过添加斜生四链藻细胞提取液(MAE)来缓解。微藻生物刺激剂对盐胁迫下水稻(*Oryza sativa* Linn.)、欧洲油菜(*Brassica napus* Linn.)和番茄种子萌发也有同样的促进效果^[32-34]。以上结果表明:微藻生物刺激剂能够促进植物种子萌发并抵抗盐胁迫,但具体作用机制尚不清楚,有待进一步研究。

3.2 斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦幼苗的影响

盐胁迫会抑制小麦对土壤中水分及微量元素的吸收利用,进而阻碍植株早期的健康生长发育^[35]。本研究中,100 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫显著($P<0.05$)降低了小麦幼苗茎和根的长度和鲜质量及叶片相对含水量。这可能是因为盐胁迫阻碍了小麦根系对水分的吸收和利用所致。研究表明:脯氨酸可通过平衡 Na⁺ 等阳离子的浓度来调节渗透胁迫,从而增强植物的抗逆性^[36],如小球藻(*Chlorella vulgaris* Beijerinck)可通过增加盐胁迫下番茄的脯氨酸含量来提高其耐盐性^[37]。本研究中,盐胁迫导致小麦幼苗叶片脯氨酸含量升高,添加 MAE 后,脯氨酸含量进一步升高。光合作用与植物生长发育息息相关,光合作用增强可促进植物体内糖类的合成和转运,为蛋白质和脂肪等重要营养成分的合成提供丰富的原料^[38]。本研究中,添加 50 mg·L⁻¹ MAE 使盐胁迫下小麦幼苗叶片叶绿素 *a* 和类胡萝卜素含量显著增加,小麦幼苗根和茎的干质量及叶片的可溶性蛋白质和可溶性糖含量也显著升高,表明 MAE 促进盐胁迫下小麦幼苗的干质量积累可能是通过增强光合作用来实现的。然而,

本研究中各处理组小麦幼苗叶片叶绿素 *b* 含量均无显著变化,具体原因还需进一步深入探索。

植物受到盐胁迫时,会产生活性氧(ROS)来诱导氧化应激反应,这些 ROS 会对细胞内的关键组分如蛋白质、核酸等造成氧化损伤,从而破坏细胞膜结构^[39]。植物可通过抗氧化酶来减轻或消除这种氧化损伤^[40]。本研究结果表明:盐胁迫使小麦幼苗叶片超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、过氧化氢酶(CAT)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性显著升高。微藻提取物中含有的多种生物活性代谢物可参与植物对非生物胁迫的信号响应,如多糖可以触发多种抗氧化酶的合成,从而保护植物免受氧化损伤^[41]。本研究中,添加 MAE 可使小麦幼苗叶片 SOD、POD、CAT 和 APX 活性进一步升高,且在质量浓度 50 mg·L⁻¹ 时最高。Xu 等^[42]的研究表明:外源添加钝顶节旋藻(*Arthrospira platensis* Gomont)可增强盐胁迫下拟南芥 [*Arabidopsis thaliana* (Linn.) Heynh.]体内的 SOD、CAT、APX 及谷胱甘肽过氧化物酶(GPX)活性,从而维持 ROS 平衡。本研究发现,添加 MAE 可显著降低小麦幼苗叶片丙二醛(MDA)含量,缓解盐胁迫导致的脂质过氧化和细胞损伤,同时使根系膜透性降低,且以质量浓度 50 mg·L⁻¹ 效果最佳。表明 MAE 对小麦幼苗抗氧化能力的提升是通过增强酶和非酶 2 种防御机制来实现的。综上所述,添加 MAE 能够有效促进盐胁迫条件下小麦幼苗叶片的 SOD、POD、CAT 和 APX 活性进一步提升,显著降低 MDA 含量,这一效应不仅增强了小麦的抗氧化能力,还显著提高了小麦幼苗叶片中的叶绿素 *a* 和类胡萝卜素含量,进而使可溶性蛋白质和可溶性糖含量显著提高,最终促进小麦幼苗根和茎的干质量积累,为小麦在盐胁迫环境下的生长和发育提供有力保障。

3.3 斜生四链藻细胞提取液对盐胁迫下小麦种子萌发及幼苗生长的促进作用

本研究采用主成分分析和隶属函数对小麦种子萌发指标和幼苗生长指标进行了综合评价。主成分分析结果表明前 3 个主成分累计贡献率达到 85.763%,可作为评判不同质量浓度 MAE 对小麦抗盐性影响的综合指标。综合评价结果显示 50 和 25 mg·L⁻¹ MAE 的综合得分较高,分别排名第 1 和第 2,表明 MAE 对小麦抗盐性的影响具有浓度依赖性。Yildiztekin 等^[43]的研究结果显示 3 g·L⁻¹ 泡叶藻(*Ascophyllum nodosum* Le Jolis)对盐胁迫下辣椒

(*Capsicum annuum* Linn.)生长的促进作用效果弱于 $2 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 泡叶藻;体积分数 25%和 50%的蛋白核小球藻生物刺激剂处理显著提高了 100 和 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ $\text{NaCl} - \text{NaHCO}_3$ 胁迫下藜麦 (*Chenopodium quinoa* Willd.)种子发芽率,而体积分数 100%蛋白核小球藻生物刺激剂处理对藜麦种子萌发并无显著改善作用^[44]。本研究中,在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫条件下,小麦种子各萌发指标在 $25 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE 处理时最高, $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE 处理使小麦幼苗各生长指标达到最高。因此,25 和 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ MAE 均可作为提高小麦抗盐性的优选方案。在实际应用中,针对不同生长阶段的小麦,灵活选择和施加适当浓度的 MAE 是一种非常有效的策略,旨在最大程度提高小麦的抗盐能力,从而提升小麦的产量与质量。

参考文献:

- [1] 殷修刚,郭文慧,高美荣,等. 小麦新品种双收麦 6 号的选育[J]. 中国种业, 2025(2): 135-137.
- [2] SHARIF I, ALEEM S, FAROOQ J, et al. Salinity stress in cotton: effects, mechanism of tolerance and its management strategies[J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2019, 25(4): 807-820.
- [3] CHANTHINI K M-P, SENTHIL-NATHAN S, PAVITHRA G-S, et al. The macroalgal biostimulant improves the functional quality of tomato fruits produced from plants grown under salt stress[J]. Agriculture, 2023, 13(1): 6.
- [4] 李丹丹,沈 晖,田军仓,等. 盐碱地改良综述[J]. 现代农业科技, 2023(24): 153-159.
- [5] COLLA G, ROUPHAEL Y. Microalgae: new source of plant biostimulants[J]. Agronomy, 2020, 10(9): 1240.
- [6] 张靖洁,刘坤坤,唐 涛,等. 微藻源生物刺激剂的制备及在设施农业中的应用[J]. 生物技术通报, 2020, 36(4): 164-174.
- [7] MINAS K, KARUNAKARAN E, BOND T, et al. Biodesalination: an emerging technology for targeted removal of Na^+ and Cl^- from seawater by cyanobacteria[J]. Desalination and Water Treatment, 2015, 55(10): 2647-2668.
- [8] MIRANDA A M, HERNANDEZ-TENORIO F, VILLALTA F, et al. Advances in the development of biofertilizers and biostimulants from microalgae[J]. Biology, 2024, 13(3): 199.
- [9] 王彦钦,孟宪刚,李武阳,等. 衣藻对盐胁迫下小麦幼苗光合生理指标的影响[J]. 河南农业科学, 2023, 52(10): 22-29.
- [10] EL ARROUSSI H, ELBAOUCHI A, BENHIMA R, et al. Halophilic microalgae *Dunaliella salina* extracts improve seed germination and seedling growth of *Triticum aestivum* L. under salt stress[J]. Acta Horticulturae, 2016(1148): 13-26.
- [11] EL-ADL M F, DEYAB M A, GHAZAL M A, et al. Impact of the microalga *Dunaliella salina* (Dunal) Teodoresco culture and its β -carotene extract on the development of salt-stressed squash (*Cucurbita pepo* L. cv. Mabrouka) [J]. Physiology and Molecular Biology of Plants, 2022, 28(4): 749-762.
- [12] GUJAR A. 紫球藻培养体系的优化、多糖的制备及其提高作物对盐胁迫耐受性的作用[D]. 太原: 山西农业大学, 2020: 90-130.
- [13] 应成琦,陆建学,么宗利,等. 盐碱胁迫对斜生栅藻生长及光合特性的影响[J]. 海洋渔业, 2011, 33(4): 429-435.
- [14] 刘淑芳,吕俊平,冯 佳,等. 施用微藻对黄瓜生长及土壤质量的影响[J]. 山西农业科学, 2016, 44(9): 1312-1315, 1319.
- [15] 谭梅娟,张 婷,李雅吉,等. 栅藻对小麦种子萌发及初期幼苗生长的影响[J]. 太原师范学院学报(自然科学版), 2023, 22(4): 72-77.
- [16] 申广珠. 环境因子对斜生栅藻脱盐和产油机理的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018: 16-25.
- [17] 李 渊,葛歧利,吉 莉,等. 钛酸盐纳米材料和斜生四链藻协同处理农村生活污水的效应研究[J]. 河南师范大学学报(自然科学版), 2023, 51(2): 128-134.
- [18] LI T, LI J, SHENG X J, et al. Exogenous addition of putrescine enhanced lipid accumulation in *Tetrademus obliquus* for increased biodiesel productivity[J]. Renewable Energy, 2023, 206: 263-273.
- [19] 刘镇洲,周芷薇,张 虎,等. 不同铵盐及培养模式对贝尔纳四链藻(*Tetrademus bernardii*)生长、油脂积累及光合生理的影响[J]. 植物生理学报, 2021, 57(10): 2043-2056.
- [20] ABD EL BAKY H H, HUSSEIN M M, EL-BAROTY S G. Induces of antioxidant compounds and salt tolerance in wheat plant, irrigated with seawater as response to application of microalgae spray [J]. American Journal of Agricultural and Biological Sciences, 2014, 9(2): 127-137.
- [21] 任 毅,颜 安,张 芳,等. 国内外 301 份小麦品种(系)种子萌发期抗旱性鉴定及评价[J]. 干旱地区农业研究, 2019, 37(3): 1-14.
- [22] 季 平,刘经威,王欣婷,等. 不同水稻品种苗期叶片生理特性对高温胁迫的响应[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2024, 52(1): 36-48.
- [23] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72(1/2): 248-254.
- [24] PLANCHET E, VERDU I, DELAHAIE J, et al. Abscisic acid-induced nitric oxide and proline accumulation in independent pathways under water-deficit stress during seedling establishment in *Medicago truncatula* [J]. Journal of Experimental Botany, 2014, 65(8): 2161-2170.
- [25] 刘若溪,曹 歌,王 琪,等. 外源褪黑素对高温胁迫下西瓜幼苗生理特性的影响[J]. 天津农业科学, 2023, 29(6): 7-12, 20.
- [26] 吴承东,沈明晨,陈 镭,等. 盐胁迫对白首乌种子萌发特性

- 的影响[J]. 浙江农业科学, 2022, 63(9): 1-4.
- [27] 张婧, 吴慧, 程云霞, 等. 椰糠复合基质对番茄穴盘幼苗生长效应的综合评价[J]. 土壤通报, 2021, 52(5): 1156-1164.
- [28] 朱广龙, 武启迪, 钱寅森, 等. 盐胁迫对高粱生长与生理特征的影响及耐盐调控机理研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(14): 49-57.
- [29] EL-HENDAWY S, ELSHAFEI A, AL-SUHAIBANI N, et al. Assessment of the salt tolerance of wheat genotypes during the germination stage based on germination ability parameters and associated SSR markers[J]. Journal of Plant Interactions, 2019, 14(1): 151-163.
- [30] RAGHUNANDAN B L, VYAS R V, PATEL H K, et al. Perspectives of seaweed as organic fertilizer in agriculture[J]. Soil Fertility Management for Sustainable Development, 2019: 267-289.
- [31] PALMA M S, MÓGOR Á F, MÓGOR G, et al. Microalga added to *Bradyrhizobium* inoculant improves soybean tolerance to salt stress[J]. Journal of Applied Phycology, 2022, 34: 2489-2505.
- [32] LIU H, CHEN X L, SONG L, et al. Polysaccharides from *Grateloupia filicina* enhance tolerance of rice seeds (*Oryza sativa* L.) under salt stress[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2019, 124: 1197-1204.
- [33] HASHEM H A, MANSOUR H A, EL-KHAWAS S A, et al. The potentiality of marine macro-algae as bio-fertilizers to improve the productivity and salt stress tolerance of canola (*Brassica napus* L.) plants[J]. Agronomy, 2019, 9(3): 146.
- [34] RAI A, SANTANA M M, MAIA R N, et al. Bacterial inoculation and extracts of *Opuntia* rackets or marine algae trigger distinct proline balances in tomato salt stress alleviation[J]. Agronomy, 2023, 13(12): 2921.
- [35] 代亚博, 王小兵, 李娟, 等. 小麦对盐碱胁迫响应机理的研究进展[J]. 北方农业学报, 2024, 52(4): 59-68.
- [36] JAHAN M S, GUO S R, SUN J, et al. Melatonin-mediated photosynthetic performance of tomato seedlings under high-temperature stress[J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2021, 167: 309-320.
- [37] 陈平. 小球藻粉对番茄幼苗的促生抗逆作用研究[D]. 烟台: 烟台大学, 2024: 43-56.
- [38] YAO Y Y, WANG X Q, CHEN B C, et al. Seaweed extract improved yields, leaf photosynthesis, ripening time, and net returns of tomato (*Solanum lycopersicum* Mill.) [J]. ACS Omega, 2020, 5: 4242-4249.
- [39] DUMANOVIC J, NEPOVIMOVA E, NATIC M, et al. The significance of reactive oxygen species and antioxidant defense system in plants: a concise overview [J]. Frontiers in Plant Science, 2020, 11: 552969.
- [40] ZHANG D P, WANG X S, ZHANG Z Y, et al. Symbiotic system establishment between *Piriformospora indica* and *Glycine max* and its effects on the antioxidant activity and ion-transporter-related gene expression in soybean under salt stress [J]. International Journal of Molecular Sciences, 2022, 23: 14961.
- [41] LIU X Y, HONG Y, ZHANG Y W, et al. Valorization of treated swine wastewater and generated biomass by microalgae: their effects and salt tolerance mechanisms on wheat seedling growth[J]. Environmental Research, 2024, 251: 118664.
- [42] XU Q Y, ZHU T, ZHAO R F, et al. *Arthrospira* promotes plant growth and soil properties under high salinity environments [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14: 1293958.
- [43] YILDIZTEKIN M, TUNA A L, KAYA C. Physiological effects of the brown seaweed (*Ascophyllum nodosum*) and humic substances on plant growth, enzyme activities of certain pepper plants grown under salt stress [J]. Acta Biologica Hungarica, 2018, 69(3): 325-335.
- [44] MA C, CUI H L, REN C G, et al. The seed primer and biofertilizer performances of living *Chlorella pyrenoidosa* on *Chenopodium quinoa* under saline-alkali condition [J]. Journal of Applied Phycology, 2022, 34: 1621-1634.

(责任编辑: 吴蕊夷)