

◆ 提质增效产品创制技术 ◆

虾青素对小麦幼苗生长和抵御盐胁迫的影响

陈景燕¹, 苏航^{2,3}, 冯尚善⁴, 张文⁵, 李晨硕^{2,3}, 郭昕宇¹, 谷劲松¹, 吕明^{2,3}

(1. 济南大学, 山东 济南 250022; 2. 中国科学院青岛生物能源与过程研究所 太阳能光电转化与利用全国重点实验室 青岛新能源山东省实验室 一碳炼制山东省工程研究中心, 山东 青岛 266101; 3. 山东能源研究院, 山东 青岛 266101; 4. 中国磷复肥工业协会, 北京 100013; 5. 国投(四川)农业科技有限责任公司, 四川 成都 610200)

[摘要] 虾青素是一类具有强抗氧化活性的天然类胡萝卜素。为探究其作为外源植物生长调节物质对小麦幼苗的生理调控作用, 通过水培实验, 系统评估低浓度虾青素对小麦幼苗生长的促进效应、对盐胁迫(100 mmol/L NaCl)耐受性的增强作用, 及其与复合肥(15-15-15)的协同增效机制。研究表明: 在无盐胁迫条件下, 低浓度虾青素(4 000倍稀释液, 0.5 mg/L)可显著促进小麦幼苗生长, 其中根长和鲜质量较清水对照组(CK)分别增加42.33%和25.00%; 在盐胁迫条件下, 添加虾青素(4 000倍稀释液)可有效缓解盐害, 其处理组(R4)幼苗的叶长、根长和鲜质量较仅加盐组(CK2)分别提升4.14%、24.76%和5.26%, 并显著提高了叶片叶绿素含量及过氧化氢酶(CAT)活性; 虾青素与肥料联用表现出显著的协同促生效果, 其中以0.4 mg/L质量浓度(T3组)效果最优, 该处理下幼苗的株高、叶长、鲜质量及叶绿素含量均显著高于单一施肥组(T1), 同时超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性最高, 过氧化氢含量降低, 表明其抗氧化能力与逆境抗性同步增强。虾青素可通过其抗氧化特性调节小麦幼苗生理状态, 缓解环境胁迫, 不仅能直接促进幼苗生长并增强其耐盐性, 还能与肥料协同增效, 为水培小麦产业的绿色可持续发展提供实验依据。

[关键词] 虾青素; 水培小麦; 盐胁迫; 抗氧化酶; 生长促进; 协同增效

[中图分类号] S142 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-4566 (2026) 04-0044-07

Effects of astaxanthin on growth and salt stress tolerance in *Triticum aestivum* seedlingsCHEN Jingyan¹, SU Hang^{2,3}, FENG Shangshan⁴, ZHANG Wen⁵, LI Chenshuo^{2,3},
GUO Xinyu¹, GU Jinsong¹, LYU Ming^{2,3}

(1. University of Jinan, Jinan 250022, China; 2. State Key Laboratory of Solar Energy Photoelectric Conversion and Utilization, Shandong Laboratory of Qingdao New Energy, Shandong Provincial Engineering Research Center of One-Carbon Refining, Qingdao Institute of Bioenergy and Bioprocess Technology, Chinese Academy of Sciences, Qingdao 266101, China; 3. Shandong Energy Institute, Qingdao 266101, China; 4. China Phosphate and Compound Fertilizer Industry Association, Beijing 100013, China; 5. SDIC (SICHUAN) Agricultural Science and Technology Co., Ltd., Chengdu 610200, China)

Abstract: Astaxanthin (ASX) is a natural carotenoid with strong antioxidant activity. To investigate the physiological regulatory effects of astaxanthin as an exogenous plant growth regulator on wheat (*Triticum aestivum*) seedlings, the promoting effects of low concentration astaxanthin on wheat seedling growth, the enhancing effect on salt stress (100 mmol/L NaCl) tolerance, and its synergistic mechanism with compound fertilizer (15-15-15) are systematically evaluated through hydroponic experiments. The research results indicate that under salt free stress conditions, low concentrations of astaxanthin (4 000 fold dilution, 0.5 mg/L) can significantly promote the growth of wheat seedlings, with root length and fresh weight increasing by 42.33% and 25.00%, respectively, compared to the water control group (CK); Under salt stress conditions, the addition of

收稿日期: 2026-02-11

作者简介: 陈景燕(1999—), 男, 贵州六盘水人, 硕士研究生, 研究方向为生物资源转化与利用。

通信作者: 苏航(1993—), 男, 陕西汉中, 微生物学博士, 研究方向为工业生物技术及合成生物学;

吕明(1981—), 男, 山东烟台人, 研究员, 博士生导师, 研究方向为一碳生物转化合成生物学。

基金项目: 山东省重点研发计划(2022SFGC0101); 山东省重点研发计划(重大科技创新工程)项目(2025CXGC011001); 潍坊市科技发展计划项目(2024ZJ1074); 山东省博士后创新项目(SDCX-ZG-202503099); 青岛博士后项目(QDBSH20250102165); 呼和浩特市引进高层次人才创新创业人才(团队)项目(2022RC-GCC-5)

astaxanthin (4 000 fold dilution) can effectively alleviate salt damage. The treatment group (R4) shows an increase in leaf length, root length, and fresh weight of seedlings by 4.14%, 24.76% and 5.26%, respectively, compared to the salt only group (CK2), and significantly increases leaf chlorophyll content and catalase (CAT) activity; The combination of astaxanthin and fertilizer shows significant synergistic growth promoting effects, with the T3 group showing the best effect at a dilution concentration of 0.4 mg/L. Under this treatment, the seedling height, leaf length, fresh weight, and chlorophyll content are significantly higher than those of the single fertilization group (T1). At the same time, the activities of superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) are the highest, and the content of hydrogen peroxide is decreased, indicating that its antioxidant capacity and stress resistance are enhanced synchronously. In summary, astaxanthin can regulate the physiological status of wheat seedlings and alleviate environmental stress through its antioxidant properties. It not only directly promotes seedling growth and enhances salt tolerance, but also synergistically increases efficiency with fertilizers, providing experimental evidence for the green and sustainable development of hydroponic wheat industry.

Key words: astaxanthin (ASX); hydroponic wheat; salt stress; antioxidant enzyme; growth promotion; synergistic effect

0 引言

三大主粮之一的小麦，其生产对于保障国家粮食安全有着重要意义^[1-2]。我国盐渍化土地主要分布在华北、西北和东北的干旱、半干旱地区^[3]。土壤盐含量过高会使种子的萌发过程延迟，导致幼苗生长缓慢^[4-5]。近年来，随着我国人口增加和可用耕地面积减少，盐渍化土壤逐渐成为我国耕地的重要后备土地资源。在我国山东东营市已有适用于盐碱地种植的小黑麦品种^[6-8]，打造盐碱地的“新粮仓”。小麦幼苗对环境胁迫的抵抗能力，是关乎其全程生长态势与最终生长成效的关键。已有研究表明，添加具有抗氧化能力的植物生长调节物质可以有效改善植物抵抗环境胁迫的能力，如添加褐藻寡糖^[9]、褐藻酸盐^[10]等具有抗氧化活性的物质来促进植物生长、增强逆境耐受性。幼苗的抗胁迫和生长能力不足会严重影响最终农产品的品质，造成经济损失。而幼苗所面临的非生物环境胁迫因素主要考虑水分、温度、土壤的酸碱盐等。添加外源性的植物生长调节物质对促进小麦幼苗生长、增强小麦幼苗抗逆性尤为重要。

虾青素 (Astaxanthin, ASX) 作为酮式类胡萝卜素，广泛存在于海洋生物中，因其极强的着色力、抗氧化性和清除自由基能力，广泛应用于水产养殖业、保健品、医药、食品等行业^[11]。虾青素的抗氧化活性显著优于叶黄素、维生素E等传统抗氧化剂^[12]。虾青素可以作为增强小麦抵抗环境胁迫能力的调节物质^[13]，以此来促进小麦健康生长发育。有研究表明，虾青素能缓解水稻淹水胁迫造成的氧化损伤，促进干物质积累与产量恢复^[14]，

但其对小麦幼苗的影响，尤其是小麦水培体系中的影响和应用的研究尚未深入。本实验采用水培法培养小麦幼苗，引入外源性植物生长调节物质虾青素，依托其针对性强、效果稳定的优势，开展虾青素对小麦幼苗生长促进作用和抗盐以及与肥料相互作用的相关研究，以发挥虾青素对小麦幼苗生长的增益效果，为探究虾青素促进小麦幼苗生长和抗盐胁迫以及与肥料的协同应用提供参考依据。

1 实验部分

1.1 原料与试剂

虾青素，液体虾青素（虾青素质量分数为0.2%）和水溶制剂粉末（虾青素质量分数为2%），均由山东微研生物科技有限公司生产；复合肥，15-15-15 NPK复合肥；NaCl，分析纯药品。小麦品种：鲁原118。

生化试剂检测盒：植物叶绿素含量检测试剂盒，超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD) 活性检测试剂盒，过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 活性检测试剂盒，过氧化氢酶 (Catalase, CAT) 活性检测试剂盒，过氧化氢 (H₂O₂) 含量检测试剂盒，均由索莱宝科技有限公司生产。

1.2 实验方法

1.2.1 虾青素促生长与抗盐胁迫实验

1) 促生长实验 选取适量小麦种子，均匀撒在含有湿布的发芽箱内，置于室温 (25 °C) 环境下，初步发芽后，选取生长相近的小麦芽水培，每个处理组设置3个平行，1个平行为8株小麦苗，随机混合均匀摆放在实验室内培养，培养条件为光照12 h与黑暗12 h交替进行，温度25 °C，培养时

间为16 d。培养期间仅补加清水保持水培养基体积一致，水培养基设置如表1所示，其中G1、G2、G3、G4处理的实际虾青素（原料为液体虾青素）质量浓度分别为4.0、2.0、1.0、0.5 mg/L。

表1 各处理水培养基虾青素质量浓度

Table 1 Astaxanthin mass concentrations in different aqueous media

处理	水培养基成分	$\rho(\text{虾青素})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
CK	清水	0
G1	500倍稀释虾青素	4.0
G2	1 000倍稀释虾青素	2.0
G3	2 000倍稀释虾青素	1.0
G4	4 000倍稀释虾青素	0.5

获得小麦幼苗后，每个处理组取一个平行组（8株/组）测量各处理组小麦幼苗的鲜质量、根长、叶长等生长参数，结果数据使用单因素方差分析（下同）。

2) 抗盐胁迫实验 取适量种子发芽，挑选长势相近的小麦幼苗置于加盐和虾青素的水培养基上，培养条件同促生长实验。培养基设置如表2所示，其中加入的盐为NaCl，且使水培养基中NaCl的浓度在100 mmol/L左右。

表2 不同抗盐水培养基虾青素的质量浓度

Table 2 Astaxanthin mass concentrations in different salt-tolerant aqueous media

处理	水培养基成分	$\rho(\text{虾青素})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
CK	清水	0
CK2	盐+清水	0
R1	盐+500倍稀释虾青素	4.0
R2	盐+1 000倍稀释虾青素	2.0
R3	盐+2 000倍稀释虾青素	1.0
R4	盐+4 000倍稀释虾青素	0.5

根据促生长和加盐胁迫的生长实验结果，进一步选取清水对照、盐加清水、4 000倍稀释虾青素、盐加4 000倍稀释虾青素的小麦幼苗，即分别选取为CK、CK2、G4、R4 4组的小麦幼苗，测量叶片叶绿素含量、超氧化物歧化酶（SOD）活性、过氧化氢酶（CAT）活性。

1.2.2 虾青素复合肥水培小麦

选取适量小麦种子，均匀撒在含有湿布的发芽箱内，置于室温（25℃）环境下，初步发芽后，选取生长相近的小麦芽，转移到水培养基上，分为5个处理组（CK、T1、T2、T3、T4），每个处理组设置3个平行（1个平行为8株小麦苗），随机混合

均匀摆放在实验室内培养，培养条件同1.2.1节。对应水培养基的设置如表3所示，其中15-15-15 NPK复合肥的添加量为2 g/L，即1 L水添加2 g复合肥，完全溶解后使复合肥水培营养液中氮（N）、磷（P₂O₅）、钾（K₂O）的质量浓度达300 mg/L左右，再添加水溶制剂粉末虾青素完全溶解，使T2、T3、T4组的实际虾青素质量浓度为1.0、0.4、0.2 mg/L。

表3 不同浓度虾青素复合肥水培养基组成

Table 3 Composition of aqueous media with compound fertilizer and different astaxanthin concentrations

处理	水培养基成分	$\rho(\text{虾青素})/(\text{mg}\cdot\text{L}^{-1})$
CK	清水	
T1	复合肥	
T2	20 000倍稀释虾青素+复合肥	1.0
T3	50 000倍稀释虾青素+复合肥	0.4
T4	100 000倍稀释虾青素+复合肥	0.2

每个处理组取一个平行组测量小麦幼苗的叶片鲜质量、根长、叶长、株高等生长参数。

测量水培后各组小麦幼苗叶片的叶绿素含量、超氧化物歧化酶（SOD）活性、过氧化物酶（POD）活性、过氧化氢（H₂O₂）含量。

2 结果与分析

2.1 虾青素促生长与盐胁迫结果

2.1.1 幼苗生长结果

虾青素促进生长和抗盐胁迫实验的小麦幼苗照片如图1所示。

促生长实验结果如图2所示，CK、G1、G2、G3、G4 5组的平均叶长分别约为13.28、12.75、14.30、12.82、13.50 cm，平均根长分别约为12.90、9.54、14.93、13.55、18.36 cm，平均鲜质量分别约为0.20、0.20、0.23、0.23、0.25 g。对比CK组可知，稀释4 000倍虾青素时的根长和鲜质量的平均结果增加最为明显，相比CK组增幅分别为42.33%、25.00%。由此可得，稀释4 000倍虾青素的促进生长效果最好，说明低浓度的虾青素有着促生长作用且在根长和鲜质量方面有着明显促进作用。

添加虾青素水培的小麦抗盐胁迫结果如图3所示，其中CK、CK2、R1、R2、R3、R4 6组的平均叶长分别约为13.28、8.45、7.49、8.71、5.46、8.80 cm，平均根长分别约为12.90、7.31、5.71、7.67、5.10、9.12 cm，平均鲜质量分别约为0.20、0.19、0.13、0.19、0.10、0.20 g。由此结果可知，CK2组对比CK组，小麦的叶长、根长和鲜质量都

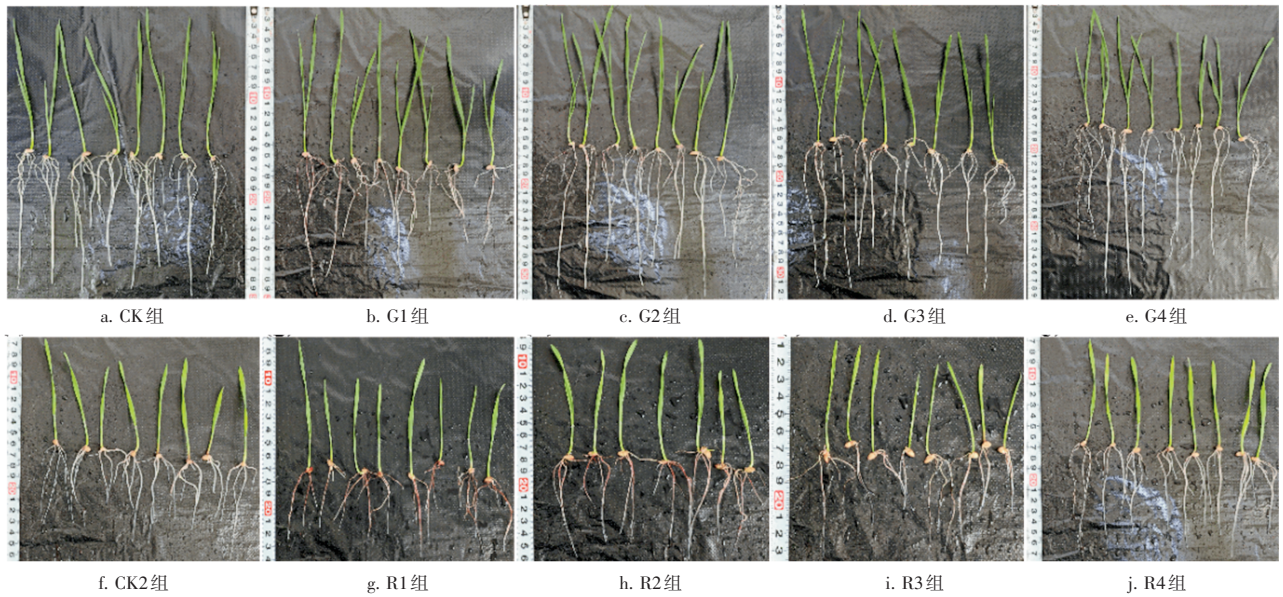


图1 虾青素促生长和抗盐胁迫实验的小麦幼苗照片

Fig. 1 *Triticum aestivum* seedlings with astaxanthin-promoted growth and salt stress tolerance

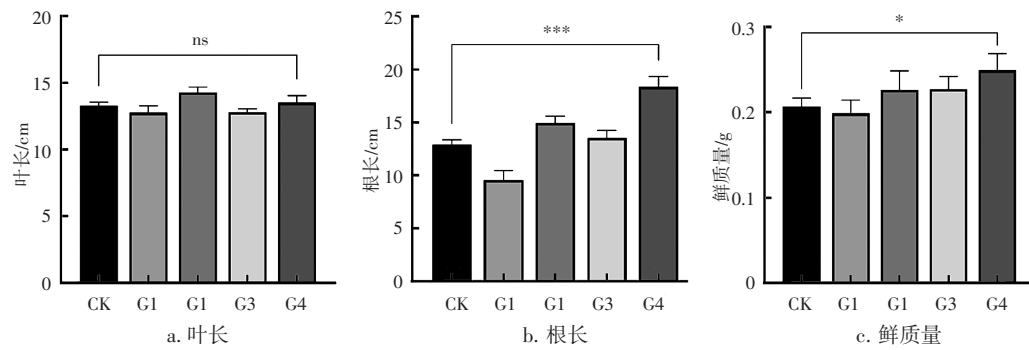


图2 虾青素促生长实验结果

Fig. 2 Results of astaxanthin-promoted growth experiment

注:*表示 $P < 0.05$, **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$, 下同。

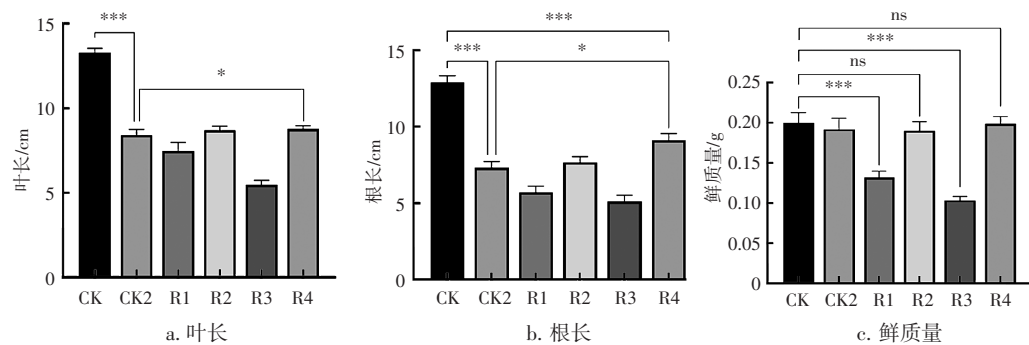


图3 虾青素抗盐胁迫实验结果

Fig. 3 Results of astaxanthin resistant to salt stress experiment

有降低, 分别下降36.37%、43.33%、5.00%, 说明加盐对小麦幼苗的生长有着明显的抑制作用。另外, CK2组对比R1、R2、R3、R4组, R4组生长最好, 小麦幼苗的叶长、根长和鲜质量有着明显的增加, 增幅分别为4.14%、24.76%、5.26%, 由此

可知, 加入4 000倍稀释虾青素后小麦幼苗面对盐胁迫时有着更好的生长特性, 说明虾青素可以增加小麦幼苗的盐胁迫抗性。

2.1.2 幼苗叶绿素与酶活性检测结果

根据促生长和抗盐胁迫实验小麦生长结果, 选取

CK组、CK2组、G4组、R4组，测量各组小麦的叶绿素含量、SOD活力、CAT活力，结果如图4所示。

由图4a.可得，CK组的叶绿素质量分数约3.66 mg/g，为最高组；CK2组叶绿素质量分数约1.14 mg/g，为最低组。R4组的叶绿素质量分数约1.24 mg/g，与CK2组相比增加8.77%。由此可知，盐胁迫下小麦幼苗的叶绿素合成受到显著抑制且叶绿素含量水平远远低于清水对照组，在添加虾青素以后，叶绿素含量有所提高，说明虾青素可以提高小麦幼苗在盐胁迫下的叶绿素合成。

由图4b.可得，CK2组的SOD活性最高，约为

324.42 U/g；其次是R4处理组，为292.42 U/g；SOD活性为CK2 > R4 > CK > G4；CK2较CK组SOD活性提高了23.88%。说明盐胁迫下，小麦幼苗的抗氧化能力增强，且添加虾青素的幼苗组SOD酶活性高于CK组。

由图4c.可得，G4组的CAT酶活性约8 445.92 U/g，R4组约为6 627.60 U/g，均处于较高水平，且远高于CK和CK2组。由此可知，加入虾青素后提高了幼苗的CAT活性，增强了幼苗清除代谢中产生的H₂O₂的能力，以避免H₂O₂积累对细胞的氧化破坏作用。

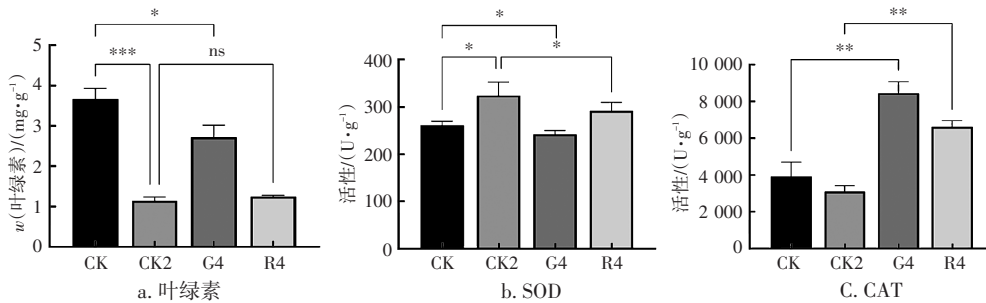


图4 幼苗叶绿素与酶活性检测结果

Fig. 4 Results of chlorophyll and enzyme activity

综上所述，我们推测低浓度的虾青素可以通过增强抗氧化能力、促进根系发育、提高养分吸收效率和协同减轻水培环境对小麦幼苗的胁迫等方面促进小麦幼苗生长。尤其是添加盐胁迫条件后，小麦幼苗的生长受到显著抑制，在添加虾青素后，通过虾青素的抗氧化特性，增强了幼苗抵御盐胁迫的抗逆性，促进幼苗在盐胁迫环境下生长。

2.2 虾青素加肥料对小麦的促生长结果

2.2.1 幼苗生长结果

虾青素加肥料不同处理组小麦幼苗照片见图5，对小麦的叶长、根长、株高、鲜质量的影响如图6所示。

由图6a.可知，CK、T1、T2、T3、T4组叶长分

别约为13.8、21.6、21.8、23.6、23.3 cm，CK组最短，T2、T3、T4组均高于T1组。T3组叶长最长，相较于CK增长了71.01%。说明添加50 000倍稀释虾青素在肥料作用基础上进一步促进幼苗生长并延长叶片，增加光合作用面积。

由图6b.可知，CK组根长约20 cm，为各组最高。T1、T2、T3、T4组根长均在14~15 cm，显著低于CK组。说明当肥料和虾青素促进生长时，养分可能优先供给光合叶片和茎秆发育，导致根的生长暂时受到抑制。

由图6c.可知，小麦的株高由高到低排列：T3 > T4 > T1 > T2 > CK。其中，T3组和T4组较CK组分别提高了59.79%和58.87%，较T1组分别提高

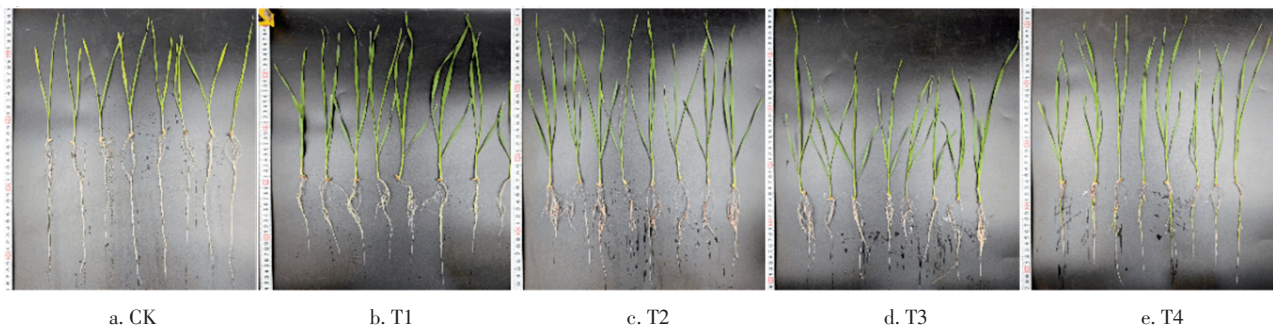


图5 虾青素加肥料不同处理组的小麦幼苗

Fig. 5 *Triticum aestivum* seedlings treated with different treatment of astaxanthin and fertilizer

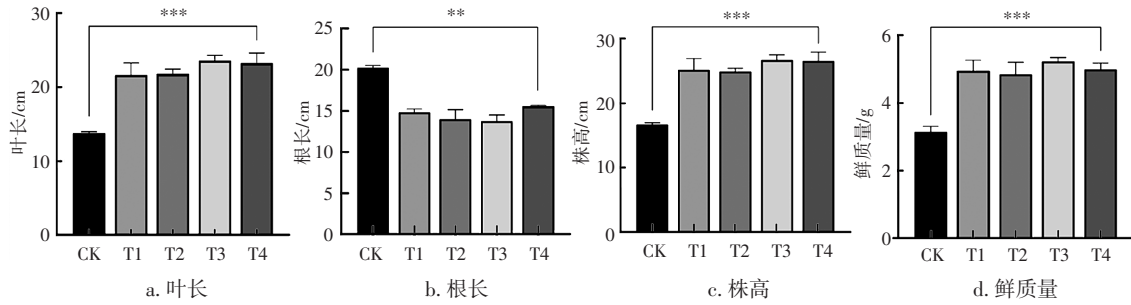


图6 虾青素加肥料不同处理的小麦幼苗生长结果

Fig. 6 Growth results of *Triticum aestivum* seedlings with different treatment of astaxanthin and fertilizer

了6.00%和5.39%。说明添加虾青素有助于幼苗的生长，促进株高增长。

由图6d.可知，CK组株鲜质量约3.15 g，为各组最低，T1组鲜质量约4.96 g，较CK组显著增加，可知在无肥料和虾青素时，小麦生物量积累有限。说明肥料能有效促进小麦叶片鲜质量积累。T2、T3、T4组鲜质量分别约为4.86、5.23、4.99 g，T3、T4组均高于T1组，其中T3组鲜质量最高。说明虾青素与肥料存在协同增效作用并且在虾青素50 000倍稀释浓度下促生长效果最优，T4组鲜质量略低于T3组。综合来看，虾青素浓度过低促进效果会减弱，过高则可能产生一定抑制作用，但鲜质量均优于仅添加肥料的小麦幼苗。

2.2.2 幼苗叶绿素与酶活性检测结果

不同处理组的小麦幼苗各项生长指标（叶绿素含量、SOD活性、POD活性和H₂O₂含量）测量结果如图7所示。

由图7a.可知，CK、T1、T2、T3、T4组的叶绿素质量分数分别约为0.006 6、0.008 6、0.008 7、0.010 3、0.010 9 mg/g。CK组叶绿素含量最低，T1至T4组叶绿素含量进一步增加，T4组叶绿素含量最高。由此可知，CK组光合物质基础薄弱，直接导致生长受抑制。T1组叶绿素含量显著提升，说明肥料能促进叶绿素形成，为茎叶生长提供了光合

作用保障。在肥料的基础上添加虾青素后进一步增加了幼苗叶绿素含量，表明肥料与虾青素可以协同促进幼苗的叶绿素含量增加，这与叶长、鲜质量、株高的增长趋势一致。由此可知，肥料与虾青素通过增加叶绿素含量、扩大光合作用面积（叶长）来提升小麦幼苗的光合作用能力。值得注意的是，T3组叶绿素含量虽低于T4组，但生长指标却为最优，这是因为光合作用效率不仅取决于叶绿素含量，还与抗氧化能力密切相关。因培养时间较长，共16 d，到培养后期，小麦幼苗已无法获得足够的微量元素等成分。受到养分不足的影响，CK和T1处理组出现叶片泛黄，叶尖干枯等现象，而添加了虾青素的处理组T2、T3、T4叶片仍为深绿色，叶绿素水平较高。说明虾青素处理后小麦幼苗的抗氧化能力和抵抗环境胁迫的能力得到增强。

由图7b.可知，CK组的SOD酶活性最高，约1 871.88 U/g；其次是T3处理组，约为1 856.15 U/g。SOD的活性顺序为CK > T3 > T2 > T1 > T4。T3较T1组SOD活性提高了39.82%。说明虾青素的添加有助于提高小麦SOD活性，增强超氧阴离子(O₂⁻)歧化为H₂O₂和O₂过程。T4处理的SOD活性最低，原因可能是由于虾青素浓度太低，对肥料的协同利用增效有限。

由图7c.可知，CK组POD酶活性约160 000 U/g，

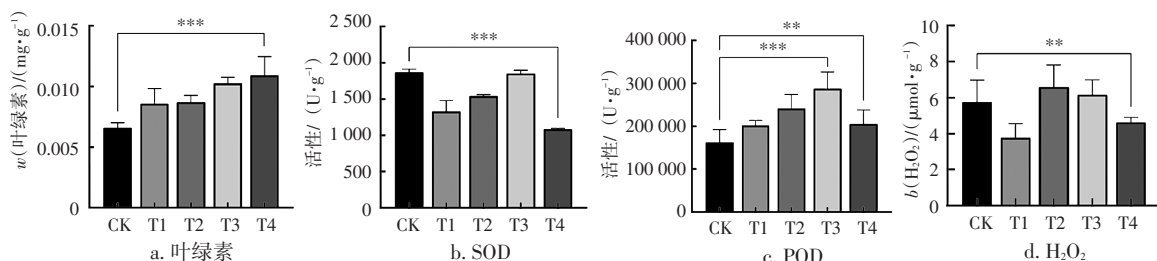


图7 虾青素加肥料不同处理的小麦幼苗叶绿素与酶活性结果

Fig. 7 Results of chlorophyll content and enzyme activities in *Triticum aestivum* seedlings with different treatment of astaxanthin and fertilizer

水平较低,无法高效清除 H_2O_2 ,这是CK组 H_2O_2 含量高的主要原因。T1组POD酶活性跃升至约200 000 U/g,显著高于CK组,添加肥料处理后POD活性提升,实现 H_2O_2 的高效清除。T2组POD酶活性进一步提升至约240 000 U/g,高于T1组,表明虾青素与肥料协同作用可以提高小麦幼苗的POD酶活性,增强 H_2O_2 清除能力。T3组POD酶活性达峰值(约290 000 U/g),较CK组提高了81.25%,较T1组提高了45.00%。T3组的 H_2O_2 清除效率最高,说明添加虾青素后为幼苗生长提供了稳定的抗氧化能力。

由图7d可知,CK组的 H_2O_2 含量约为 $5.75 \mu\text{mol/g}$,处于较高水平。可能是由于POD活性不足,SOD生成的 H_2O_2 无法被及时清除,导致活性氧积累,增加了氧化损伤风险。T2、T3、T4组的 H_2O_2 含量逐渐下降且T4组明显低于CK组,说明添加低浓度的虾青素处理后可以有效降低幼苗的 H_2O_2 含量,T2组的虾青素浓度较高导致出现抑制作用。基于此,可以得出,添加低浓度的虾青素可以与肥料发生协同作用,在小麦幼苗利用后可以改善幼苗抗氧化能力,增强对 H_2O_2 的清除能力。

综上所述,在肥料基础上添加虾青素的T3、T4组,小麦鲜质量、株高、叶长均优于仅添加肥料的T1组,说明虾青素与肥料存在协同效应,可进一步促进小麦的生长。其中,50 000倍稀释(0.4 mg/L)虾青素的幼苗(T3组)在鲜质量、株高、叶长上的促进效果最优并且其SOD与POD活性最高,其抗氧化能力最强。100 000倍稀释(0.2 mg/L)虾青素(T4组)的 H_2O_2 含量也远远低于CK组,说明低浓度虾青素可以增加幼苗的抗氧化能力,基于此,可以得出虾青素与肥料可以协同促进小麦幼苗生长和增加其抗氧化能力,提高幼苗的环境抗逆性。

3 讨论

本研究通过探究不同浓度虾青素的抗盐胁迫和与肥料的协同作用,得出虾青素能促进水培小麦幼苗中的生长,增强幼苗的耐盐胁迫能力和与肥料的协同促生长作用。首先,低浓度的虾青素可能通过增强抗氧化能力、促进根系发育等促进小麦生长。小麦的叶长、根长、鲜质量在低浓度虾青素(原料为液体虾青素)下均有增加,且稀释4 000倍(0.5 mg/L)时效果最佳。其次,添加虾青素和盐后,小麦生长明显优于仅加盐的处理,其叶长、根长、鲜质量均有增加,对小麦幼苗的抗盐和生长能力有提

升。通过测量幼苗的叶绿素和酶活性可知,添加虾青素后幼苗的抗氧化能力增强,环境抗逆性增加。第三,添加虾青素(原料为水溶制剂粉末)和肥料后,各组生长和抗氧化能力均显著高于清水对照,其中虾青素50 000倍稀释(0.4 mg/L)时与肥料的协调促进生长作用最明显,幼苗的抗氧化能力最佳。综上所述,虾青素作为植物生长调节物质,虽不直接提供营养,但可能通过其抗氧化特性调节幼苗生理状态,缓解幼苗的环境胁迫状态且虾青素与肥料具有协同促生长作用。

4 结论

虾青素对小麦幼苗具有增益效果:低浓度的虾青素可以促进小麦幼苗生长;虾青素可以增强小麦幼苗对盐胁迫的抵抗能力;虾青素与肥料存在协同增效作用,促进小麦幼苗生长和增加幼苗抗氧化能力。综上,虾青素作为外源性的调节物质通过发挥其抗氧化特性,促进小麦幼苗生长和增加盐胁迫抗性,并且可以与肥料协同促进幼苗生长。

[参考文献]

- [1] 闫琰,王秀东,王济民,等.“双循环”背景下国家粮食安全战略研究[J].中国工程科学,2023,25(4):14-25.
YAN Y, WANG X D, WANG J M, et al. National Food Security Strategy Against the Backdrop of Domestic and International Dual Circulation [J]. Strategic Study of CAE, 2023, 25(4): 14-25.
- [2] 宋洪远.实现粮食供求平衡 保障国家粮食安全[J].南京农业大学学报(社会科学版),2016,16(4):1-11,155.
SONG H Y. Food Demand-Supply Balance and State Food Safety [J]. Journal of Nanjing Agricultural University (Social Science), 2016, 16(4): 1-11, 155.
- [3] 时晓磊,严勇亮,石书兵,等.小麦根部耐盐性状全基因组关联分析[J].植物遗传资源学报,2021,22(1):57-73.
SHI X L, YAN Y L, SHI S B, et al. Genome-Wide Association Study of Salt Tolerance Related Root Traits in Wheat [J]. Journal of Plant Genetic Resources, 2021, 22(1): 57-73.
- [4] 王茂莹,王慧桥,司庆臣,等.不同浓度外源-氧化氮对盐胁迫下小麦幼苗生理特性的影响[J].土壤通报,2019,50(6):1426-1433.
WANG M Y, WANG H Q, SI Q C, et al. Effects of Exogenous Nitric Oxide at Different Concentrations on Physiological Characteristics of Wheat Seedlings under Salt Stress [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2019, 50(6): 1426-1433.
- [5] 张景云,吴凤芝.盐胁迫对黄瓜不同耐盐品种叶绿素含量和叶绿体超微结构的影响[J].中国蔬菜,2009(10):13-16.
ZHANG J Y, WU F Z. Effects of Salt Stress on Chlorophyll Content and Chloroplast Ultra-structure of Different Salt-tolerant Cucumber Varieties [J]. China Vegetables, 2009(10): 13-16.
- [6] 张娟.东营打造盐碱地种业发展高地的思考[J].中国种业,2025(9):66-68.

(下转第117页)