

氯化胆碱喷施对盐胁迫下玉米幼苗生长及生理性状的影响

张祥臻, 汤继彬, 加娜尔, 毕斯锐, 薛吉全, 秦晓梁
(西北农林科技大学农学院, 陕西 杨凌 712100)

摘要: 土壤盐渍化是全球面临的具有挑战性的环境问题之一, 提升作物抗盐性是开发盐渍土资源的关键。氯化胆碱作为低毒高效的植物生长调节剂, 可有效缓解植物盐胁迫, 玉米作为重要的粮食作物和饲料作物, 其在盐渍化土壤中的生长面临诸多挑战。本研究综合生理指标测定与分子生物学方法, 系统探究喷施氯化胆碱对盐胁迫下玉米幼苗生长的调控作用。结果表明, 盐胁迫下喷施氯化胆碱能有效增加玉米根系长度, 提高玉米叶绿素含量, 增强氮素吸收能力; 同时促进渗透调节物质可溶性蛋白的含量和降低过氧化物丙二醛的含量; 另外还能提高超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)等抗氧化酶活性, 从多维度缓解盐胁迫损伤。该研究为盐渍土区域玉米农业生产提供理论与技术支持, 为增强幼苗抗逆性并培育玉米壮苗提供参考。

关键词: 氯化胆碱; 盐胁迫; 生理指标; 抗氧化酶; 渗透调节物质

中图分类号: S513; S156 **文献标志码:** A **文章编号:** 2097-2172(2025)07-0648-06

doi: 10.3969/j.issn.2097-2172.2025.07.010

Effects of Foliar Choline Chloride Application on the Growth and Physiological Traits of Maize Seedlings under Salt Stress

ZHANG Xiangzhen, TANG Jishan, JIA Naer, BI Siyue, XUE Jiquan, QIN Xiaoliang
(College of Agriculture, Northwest A&F University, Yangling Shannxi 712100, China)

Abstract: Soil salinization has become one of the most challenging environmental issues worldwide. Improving crop salt tolerance is crucial for utilizing saline soil resources. As a low-toxicity and highly effective plant growth regulator, choline chloride can effectively alleviate salt stress in plants. Maize, as an important food and forage crop, faces numerous challenges when growing in saline soils. This study systematically investigates the regulatory effects of foliar-applied choline chloride on the maize seedling growth under salt stress through integrated physiological measurements and molecular biology approaches. The results demonstrate that choline chloride application under salt stress significantly increases root length, enhances chlorophyll content, improves nitrogen uptake capacity, promotes osmoregulatory substance (soluble protein) accumulation, reduces malondialdehyde content, and elevates antioxidant enzyme activities (SOD, CAT), thereby alleviating salt stress damage through multiple pathways. This study provides theoretical and technical support for maize production in saline soils and offers references for enhancing seedling stress resistance and cultivating vigorous maize seedlings.

Key words: Choline chloride; Salt stress; Physiological index; Antioxidant enzyme; Osmoregulatory substance

土壤盐渍化对农业生产活动产生的影响是一个全球性的问题, 世界上大约有 20% 的灌溉土壤受到盐度的影响, 且呈不断恶化的趋势^[1]。胁迫引发的渗透失衡、离子毒害及氧化损伤, 严重阻碍作物生长, 尤其对盐敏感的玉米生产威胁显著,

在我国北方盐碱区已成为限制玉米产量的关键因素^[2-4]。研究盐渍化对我国农业可持续发展、提高盐碱地的生产能力和维持良好的生态经济效益具有举足轻重的作用。植物生长调节剂是缓解作物盐胁迫的重要途径, 其中氯化胆碱因低毒易降解

收稿日期: 2025-06-15; 修订日期: 2025-07-02

基金项目: 西北农林科技大学大学生创新创业计划项目(XN2025001011)。

作者简介: 张祥臻(2005—), 男, 河南南阳人, 本科在读, 主要学习方向为玉米水肥高效利用。Email: 3146505200@qq.com。

通信作者: 薛吉全(1964—), 男, 陕西武功人, 教授, 博导, 研究方向为玉米遗传育种及高产高效栽培技术。Email: xjq2934@163.com。

共同通信作者: 秦晓梁(1982—), 男, 河南新乡人, 教授, 博导, 研究方向为玉米水肥高效利用。Email: xiao-liangqin2006@163.com。

特性备受关注^[5]，已有研究证明，氯化胆碱能缓解干旱胁迫对小麦、玉米的伤害^[6-8]，增强黄瓜、菠菜幼苗的耐盐性^[3, 9-10]。在现代农业研究领域，氯化胆碱的应用潜能备受关注，特别是在缓解盐胁迫对玉米幼苗生长抑制方面。本研究以 660 mg/L 氯化胆碱处理盐胁迫下的玉米幼苗，综合分析植株生长及多项生理指标，以期对盐渍土地玉米农业生产提供理论依据和实践指导，推动对氯化胆碱缓解玉米盐胁迫机理机制的认识。

1 材料与方法

1.1 供试材料

指示玉米品种为陕单 650，由杨凌秦丰种业股份有限公司提供，氯化胆碱为分析纯药品，市购。

1.2 试验方法

2025 年 4 月 20 日在西北农林科技大学农学院采用盆栽试验，选择在温室内进行，选取大小均匀，健康饱满的玉米种子，用 75% 乙醇消毒 5 min，然后用蒸馏水冲洗干净。将种子放置盆栽（砂土）中萌发，使用的盆规格为底部直径 25 cm，高 30 cm，播种深度 3~5 cm，覆土压实，置于自然光下生长。每天浇灌自来水保持土壤湿润。

试验设置 3 个处理：清水处理（CK）、盐胁迫处理（SS）、盐胁迫加叶面喷施氯化胆碱处理（SS+CC），其中，盐胁迫中 NaCl 的浓度为 6 g/L，喷施的氯化胆碱浓度为 660 mg/L。每处理 20 盆，每盆留苗 10 株。待幼苗生长至 2 叶 1 心期时开始进行处理，对 CK 组浇灌 Hoagland 营养液^[11]，SS 组和 SS+CC 组浇灌 Hoagland 营养液 +NaCl 溶液，3 组浇灌体积皆为 2 L，在试验第 1 天傍晚对 SS+CC 组进行叶面喷施氯化胆碱，喷至叶面含均匀小水珠且滴水时停止喷施，每隔 3 d 补充 1/2

浓度的 Hoagland 营养液 1 次。在喷后第 5 天、第 10 天、第 15 天、第 20 天分别采样，每期每个处理采集 5 盆，每盆随机取样，测定生长指标，同时再选取 10 株植株鲜样保存于 -40 ℃ 冰箱，用于后续测定生理指标。

1.3 指标测定

1.3.1 生长指标的测定 每处理随机取 5 株长势均匀的植株，分别测定株高、茎粗，然后将地上鲜重和地下鲜重（根系清洗干净）放入烘箱 105 ℃ 烘 24 h，烘干至恒重后称量整株以及地上干重、根干重。然后计算壮苗指数^[5]，壮苗指数=（茎粗 / 株高+根干质量 / 地上部干质量）× 全株干质量 × 10。

1.3.2 SPAD 值、氮含量和生理指标的测定 处理后的第 5 天、10 天、15 天、20 天，采用 SPAD-502 Plus 型叶绿素仪测定叶片的 SPAD 值含量；地上部分烘干后，用粉样机打碎，过 100 目筛，用凯氏法消解测定全氮；2025 年 5 月 25 日将存于 -40 ℃ 冰箱的植株鲜样取出，叶片可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝 G-250 染色法测定^[12]，SOD 活性用氮蓝四唑法测定^[13]，CAT 活性用紫外吸收法测定，丙二醛含量采用硫代巴比妥酸法测定^[14]。

1.4 数据处理

采用 RStudio 和 SPSS 27 软件进行相关数据处理、分析以及呈现，进行不同处理间的差异显著性检验，用最小显著差数法(LSD)进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 氯化胆碱喷施对盐胁迫玉米幼苗生长的影响

不同处理对玉米幼苗生长的影响有显著差异（表 1）。表中可以看到在第 5 天和第 10 天取样时 SS+CC 处理下的幼苗株高和茎粗在 3 种处理中最

表 1 氯化胆碱缓解盐胁迫对玉米幼苗生长的影响

处理后天数	处理	株高 /cm	茎粗 /mm	总干重 /g	地上干重 /g	根干重 /g	壮苗指数
第 5 天	CK	11.95 b	2.42 b	0.13 b	0.09 a	0.04 b	0.84 b
	SS	12.64 a	2.68 b	0.15 b	0.10 a	0.05 b	1.07 b
	SS+CC	12.68 a	3.08 a	0.18 a	0.10 a	0.08 a	1.88 a
第 10 天	CK	13.06 b	2.37 b	0.20 b	0.11 b	0.09 a	2.00 a
	SS	12.71 c	2.30 b	0.19 b	0.11 b	0.08 a	1.73 b
	SS+CC	13.48 a	3.05 a	0.24 a	0.15 a	0.09 a	1.98 a
第 15 天	CK	17.97 a	2.38 b	0.31 a	0.18 a	0.13 a	2.65 a
	SS	15.48 c	2.38 b	0.25 b	0.15 b	0.10 b	2.05 b
	SS+CC	16.65 b	2.48 a	0.29 a	0.17 a	0.12 b	2.48 a
第 20 天	CK	18.82 a	3.13 a	0.43 a	0.25 a	0.18 a	3.81 a
	SS	16.40 b	2.95 ab	0.29 c	0.18 b	0.11 c	2.29 c
	SS+CC	17.75 a	2.60 b	0.34 b	0.20 b	0.14 b	2.88 b

高,且显著高于CK,在第10天、第15天、第20天取样SS处理的株高和茎粗均低于CK。与CK相比,在第5和10天取样SS处理下的玉米总干重、地上干重和根系干重与对照没有显著差异,在第15天和第20天显著低于对照;SS+CC处理后第5天和第10天的玉米幼苗的总干重、地上干重在3种处理中最高,SS+CC处理下在第15天和第20天的玉米幼苗的总干重、根干重显著高于SS处理。对于壮苗指数,在第10天、第15天和第20天均表现为CK>SS+CC处理>SS处理,且SS处理下的玉米壮苗指数显著低于CK和SS+CC处理。

由图1可知,在第5天和第10天取样的3种处理间幼苗根总长度无显著差异,但从4次采样来看,CK和SS+CC处理下玉米根系长度呈逐渐上升趋势,SS处理下却呈先增后降趋势。第15天、第20天取样时,SS处理与CK和SS+CC处理间差异显著($P<0.05$),整体表现为CK>SS+CC处理>SS处理,在第15天CK、SS+CC处理的根系总长度较SS处理分别高32.31%、27.37%,处理第20天CK、SS+CC处理的根系总长度较SS处理分别高84.34%、67.83%,CK与SS+CC处理间无显著

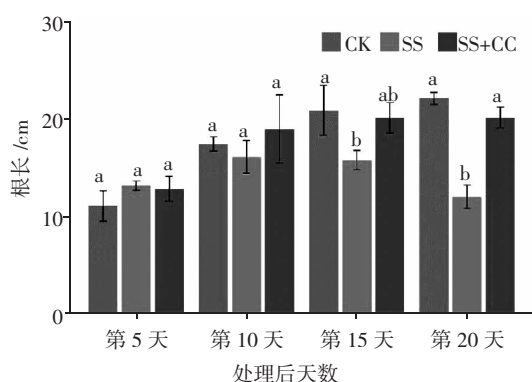
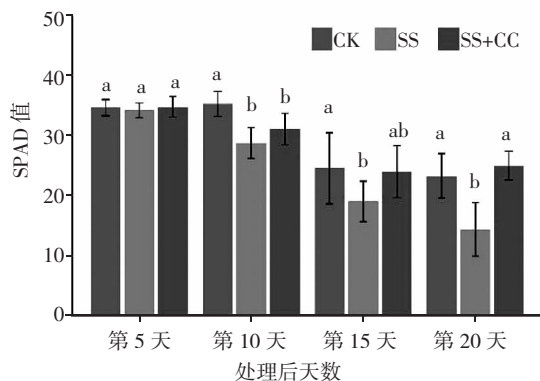


图1 不同处理对玉米幼苗根系总长度的影响



差异。盐胁迫显著影响玉米幼苗的根系总长度,喷施氯化胆碱对玉米受到盐胁迫的缓解作用在幼苗生长后期逐渐变大。

2.2 氯化胆碱喷施对盐胁迫玉米幼苗 SPAD 值及氮素含量的影响

不同处理对玉米幼苗叶片 SPAD 值和氮素含量的影响有显著差异(图2)。处理后的第5天取样,3个处理间的玉米幼苗叶片的 SPAD 值和氮素含量均未表现出差异($P>0.05$),但是从第10天取样开始,SS处理下玉米叶片的 SPAD 值和氮素含量显著低于CK和SS+CC处理($P<0.05$),而CK和SS+CC处理间除第10天取样外均无显著差异。处理后第15天,CK、SS+CC处理的 SPAD 值较SS处理分别高29.10%、25.95%;处理后第20天CK、SS+CC处理的 SPAD 值较SS处理分别高61.86%、73.83%。处理后第15天,CK、SS+CC处理的氮素含量较SS处理分别高26.61%、23.73%;处理后第20天CK、SS+CC处理的氮素含量较SS分别高25.43%、32.60%。

从4次取样来看,SS+CC处理下叶片的叶绿素含量和氮素含量相比SS处理维持在较高水平,在处理后的第20天SS+CC处理下玉米幼苗的 SPAD 值和氮素含量较CK分别高7.39%和5.72%。

2.3 氯化胆碱喷施对盐胁迫玉米幼苗可溶性蛋白含量和丙二醛含量的影响

不同处理对玉米幼苗的可溶性蛋白含量和丙二醛含量的影响有显著差异(图3)。在4次取样中,可以看出,CK和SS+CC处理下玉米幼苗的可溶性蛋白含量表现为先上升后趋于稳定,而SS处理下的玉米幼苗可溶性蛋白含量先增加后下降。对于玉米幼苗可溶性蛋白,在第5天和第10天取

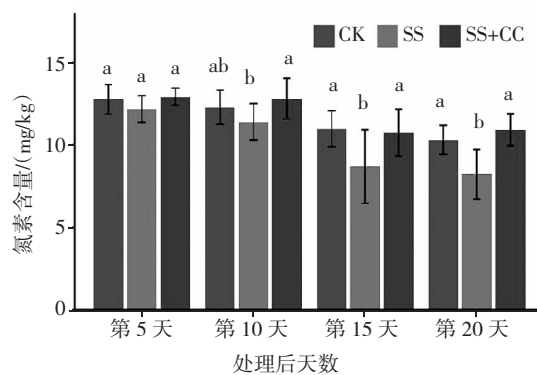


图2 不同处理对玉米幼苗叶片SPAD值和氮素含量的影响

样 3 种处理没有显著差异, 3 种处理下的可溶性蛋白含量在第 15 天和第 20 天取样表现出显著差异 ($P<0.05$), 其中第 15 天取样的 CK、SS+CC 处理较 SS 处理分别高 38.10%、30.16%, 第 20 天取样的 CK、SS+CC 处理较 SS 处理分别高 41.74%、42.61%。

从 4 次取样来看, CK 处理下玉米幼苗的丙二醛含量处于稳定水平, SS+CC 处理下丙二醛含量逐渐下降, 而 SS 处理下丙二醛的含量始终处于较高水平。除第 5 天取样 SS、SS+CC 处理下的丙二醛含量显著高于 CK, 在处理后的第 10 天、第 15 天和第 20 天取样 SS 处理下的丙二醛含量均显著大于 CK 和 SS+CC 处理 ($P<0.05$)。植株在 SS 处理下细胞膜结构稳定性遭到破坏, 导致丙二醛含量的上升, 在第 20 天取样时丙二醛含量最高, 分别显著高于 CK、SS+CC 处理 58.13%、45.31%。

2.4 氯化胆碱喷施对盐胁迫玉米幼苗 SOD 和 CAT 活性的影响

不同处理对玉米幼苗 SOD 和 CAT 活性的影响有显著差异 (图4)。除处理后第 5 天取样外, CK 和 SS+CC 处理下玉米幼苗的 SOD 活性均显著大于

SS处理 ($P<0.05$), 但是 SS+CC 处理下的 SOD 活性在 4 次取样中都略低于 CK。随时间变化 3 种处理下玉米幼苗的 SOD 活性呈先上升后下降趋势。对于 CAT 活性随时间的变化与 SOD 活性变化不同, CK 和 SS+CC 处理下玉米幼苗的 CAT 含量随时间呈上升趋势, 而 SS 处理下呈先上升后下降趋势。4 次取样都表现为 SS+CC 处理下玉米幼苗的 CAT 活性最高, 其中在处理后的第 15 天取样, SS+CC 处理下玉米幼苗的 CAT 活性较 CK、SS 处理分别显著高 25.06%、55.94%; 在处理后的第 20 天取样 SS+CC 处理的玉米幼苗的 CAT 活性较 CK、SS 处理分别显著高 25.14%、93.98%。

3 讨论与结论

用氯化胆碱浸种或喷洒幼苗, 能促进作物生根、发芽和培育壮苗^[3, 15], 并能提高产量^[16]、改善品质^[17]。与本研究结果一致, 喷施氯化胆碱能够促进盐胁迫下玉米幼苗的生长, 提高壮苗指数。在盐胁迫初期第 5 天取样, 喷施氯化胆碱下的玉米株高、茎粗、干重和壮苗指数均明显高于清水对照。在后期, 喷施氯化胆碱后的玉米株高、干重和壮苗指数均高于盐胁迫处理, 且叶面喷施氯

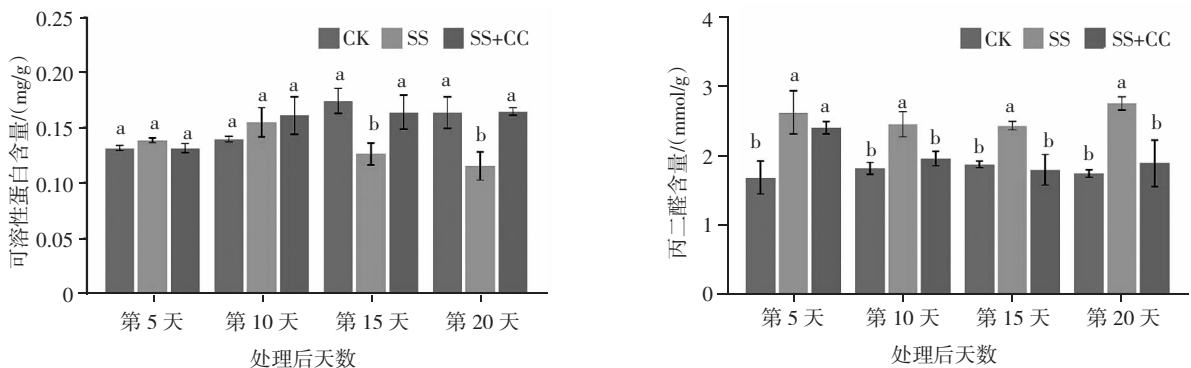


图3 不同处理对玉米幼苗叶片可溶性蛋白含量和丙二醛含量的影响

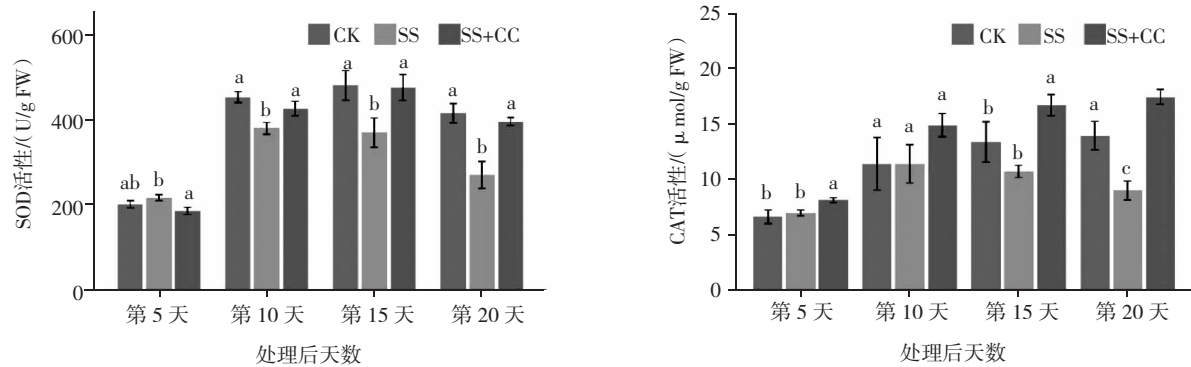


图4 不同处理对玉米幼苗叶片SOD和CAT活性的影响

化胆碱对玉米根系受到盐胁迫的缓解作用也逐渐变大。随时间延长,盐胁迫处理下 SPAD 值和氮素含量下降,可能是盐分破坏了类囊体膜结构,抑制叶绿素合成酶活性,使叶绿素含量和氮素降低,而喷施氯化胆碱处理下叶片的 SPAD 值和氮素含量仍维持在较高水平,体现出叶面喷施氯化胆碱有效缓解植株因盐胁迫造成的伤害,使植株在盐胁迫下保持较好的生长状态。

植物体内具有一套清除活性氧基团的保护酶系统,其中包括 SOD、CAT^[18-20]。试验中不同处理下 SOD、CAT 等抗氧化酶活性随胁迫时间延长变化趋势不同,但都表现为随胁迫时间延长盐胁迫处理下的 SOD 和 CAT 活性先上升后下降,盐胁迫中后期喷施氯化胆碱后玉米的酶活性显著高于盐胁迫处理,其 CAT 活性在后期也显著高于对照处理。叶面喷施氯化胆碱能够使幼苗在盐胁迫下依然提高这些保护酶活性,甚至显著高于正常环境下的酶活性,这说明氯化胆碱显著增强了幼苗的抗氧化防御能力,有助于清除膜脂过氧化作用中产生的丙二醛,从而对玉米幼苗起到保护作用^[21-23],在玉米幼苗喷施氯化胆碱后,植株内的丙二醛含量逐渐下降,显著低于盐胁迫处理。此外,可溶性蛋白既可作为渗透调节物质,又可能参与抗氧化防御,其含量增加有助于维持细胞渗透平衡和稳态,使玉米幼苗抗逆性增加^[24-25],本试验在中后期喷施氯化胆碱处理下的玉米幼苗叶片可溶性蛋白含量维持稳定且略显上升,与清水对照无显著差异。这表明通过对玉米幼苗喷施氯化胆碱,从抑制植株内过氧化物有害物质的产生和促进植株内渗透调节有益物质的生成两方面提高玉米抗逆性,从而达到壮苗目的。

综上,本研究表明喷施氯化胆碱能有效缓解盐胁迫对玉米幼苗的不利影响。其通过增强幼苗的生长势、改善渗透调节能力、减轻氧化损伤,显著提高植株的抗逆性。氯化胆碱可优化盐胁迫下玉米幼苗的生理代谢和生长状态,达到壮苗目的。未来应继续在田间条件下验证氯化胆碱对玉米生长、产量和品质的综合效应,以推动其在农业生产中的应用推广。

参考文献:

[1] 匡朴. 盐胁迫对不同耐盐性玉米品种萌发、苗期生

长及产量的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2018.

- [2] 曹宏, 王玺, 王晓丽, 等. 低温逆境下氯化胆碱包衣对玉米种子萌发及幼苗生理生化指标的影响[J]. 玉米科学, 2011, 19(3): 102-104; 109.
- [3] ULLAH A, BANO A, KHAN N. Climate change and salinity effects on crops and chemical communication between plants and plant growth-promoting microorganisms under stress[J]. *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 2021, 5.
- [4] FAN S, CHEN J, YANG R. Candidate genes for salt tolerance in forage sorghum under saline conditions from germination to harvest maturity[J]. *Genes*, 2023, 14(2): 293.
- [5] 陈丽丽, 杨森林, 宋世威, 等. 氯化胆碱浸种对番茄幼苗生长及生理性状的影响[J]. 河南农业科学, 2017, 46(12): 91-94.
- [6] 陈楚, 张云芳, 荆小燕. 氯化胆碱浸种处理对盐胁迫下小麦种子萌发以及幼苗生长的影响[J]. 麦类作物学报, 2013, 33(5): 1030-1034.
- [7] CHEN X, HAO R, CHEN W, et al. Effect of choline amino acid ionic liquids on maize seed germination and endogenous plant hormone levels[J]. *RSC Advances*, 2024, 14(1): 382-389.
- [8] WANG Y, GU W, MENG Y, et al. γ -Aminobutyric acid imparts partial protection from salt stress injury to maize seedlings by improving photosynthesis and upregulating osmoprotectants and antioxidants[J]. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 43609.
- [9] 张永平. 氯化胆碱对盐胁迫黄瓜幼苗渗透调节物质及活性氧代谢系统的影响[J]. 西北植物学报, 2011, 31(1): 137-143.
- [10] 周峰, 张边江, 华春, 等. 氯化胆碱对低盐处理下菠菜光合生理和抗氧化酶的效应[J]. 华北农学报, 2012, 27(1): 164-167.
- [11] 耿梦瑶, 程文聪, 陈丽红, 等. 胆碱脂肪酸/氨基酸对 PEG 模拟干旱胁迫下玉米萌发的影响[J]. 核农学报, 2021, 35(8): 1916-1922.
- [12] 蒋大程, 高珊, 高海伦, 等. 考马斯亮蓝法测定蛋白质含量中的细节问题[J]. 实验科学与技术, 2018, 16(4): 143-147.
- [13] 杨明, 刘晓辉, 麦汉伦. 雪莲果 SOD 不同环境下活性研究[J]. 佛山科学技术学院学报(自然科学版), 2016, 34(2): 32-34.
- [14] 孙鹏程. 盐胁迫下玉米种子萌发机理的新探索[D]. 泰安: 山东农业大学, 2020.

- [15] 张 燕, 方 力, 李天飞, 等. 氯化胆碱浸种对烟草幼苗某些生理特性的影响[J]. 植物生理学通讯, 2004(2): 164–166.
- [16] 侍瑞高, 赵慧云, 戚名扬, 等. 外源氯化胆碱和氯化钙对盐胁迫下小麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(14): 22–26.
- [17] 高 倩, 冯 棣, 刘 杰, 等. 外源物缓解植物盐分胁迫的作用机理及其分类[J]. 植物营养与肥料学报, 2021, 27(11): 2030–2044.
- [18] D AMATO R, DEL BUONO D. Use of a biostimulant to mitigate salt stress in maize plants[J]. Agronomy, 2021, 11(9): 1755.
- [19] ABHISHEK KUMAR K J M K. Assessment of NaCl-induced stress in tomato (*Lycopersicon esculentum* L) [J]. European Journal of Medicinal Plants, 2021, 32(3): 41–47.
- [20] 姜佩弦, 张 凯, 王艺桥, 等. 玉米耐盐分子机制研究进展[J]. 植物遗传资源学报, 2022, 23(1): 49–60.
- [21] ZEENAT MUSHTAQ S F B G. Salt stress, its impacts on plants and the strategies plants are employing against it: A review[J]. Journal of Applied Biology & Biotechnology, 2020, 8(3): 81–91.
- [22] WEI L, ZHAO H, WANG B, et al. Exogenous melatonin improves the growth of rice seedlings by regulating redox balance and ion homeostasis under salt stress[J]. Journal of Plant Growth Regulation, 2022, 41(6): 2108–2121.
- [23] 马菁平. 卵磷脂和氯化胆碱对玉米萌发、幼苗生长及抗冷性的影响[D]. 南京: 南京农业大学, 2008.
- [24] 党根友, 杨国虎, 朱永兴, 等. 玉米自交系成熟期耐盐碱性分析[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(11): 1031–1037.
- [25] 郭瑞红, 杨国华, 张正洁. 玉米种质资源观测筛选试验[J]. 寒旱农业科学, 2023, 2(2): 123–127.