

郭思思,任春梅,李 硕,等. 二氢叶吩铁调控玉米幼苗生长及耐盐性[J]. 江苏农业学报,2025,41(3):485-492.
doi:10.3969/j.issn.1000-4440.2025.03.007

二氢叶吩铁调控玉米幼苗生长及耐盐性

郭思思^{1,2}, 任春梅¹, 李 硕¹, 程兆榜¹, 王海涛¹, 季英华¹

(1.江苏省农业科学院植物保护研究所/江苏省食品质量安全重点实验室,江苏 南京 210014; 2.福建农林大学植物保护学院,福建 福州 350002)

摘要: 研究作物壮苗和耐盐性对于提高产量和增强抗逆性具有重要意义。二氢叶吩铁可以调控多种作物生长,然而关于二氢叶吩铁能否调控玉米幼苗生长及耐盐性尚不明确。本研究发现,玉米种子浸泡在 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 二氢叶吩铁溶液中 24 h,能显著提高玉米幼苗的主根长度、根数和芽长等生长指标;0.050 $\mu\text{g/mL}$ 二氢叶吩铁溶液的最佳浸种时间为 12 h。叶面喷施 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 二氢叶吩铁溶液可显著提高玉米苗期叶片的叶绿素含量。此外,经过二氢叶吩铁浸种处理后,可显著调控耐盐相关基因的表达从而提高玉米幼苗的耐盐性。本研究结果对于二氢叶吩铁在调控玉米幼苗生长方面的应用、提高玉米的耐盐性具有一定的指导意义。

关键词: 二氢叶吩铁; 玉米; 叶绿素含量; 耐盐性; 植物生长调节剂

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2025)03-0485-08

Effect of iron dihydroporphine on the growth and salt resistance of maize seedlings

GUO Sisi^{1,2}, REN Chunmei¹, LI Shuo¹, CHENG Zhaobang¹, WANG Haitao¹, JI Yinghua¹

(1.*Institute of Plant Protection, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences/Key Laboratory of Food Quality and Safety of Jiangsu Province, Nanjing 210014, China*; 2.*College of Plant Protection, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China*)

Abstract: Studies on robust seedlings and salt tolerance of seedlings are crucial for increasing crop yield and enhancing stress resistance. Iron dihydroporphine (ICE6) is a novel plant growth regulator that can modulate the growth of various crops. However, the potential role of ICE6 in regulating maize growth and salt tolerance remains unknown. In this investigation, it was found that by soaking the maize seeds with 0.050 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 solution for 24 hours, growth indices such as length of main root, number of roots and length of bud of maize seedlings could be significantly increased compared to other concentrations tested. The optimal soaking time with 0.050 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 was 12 h. Additionally, leaf surface spraying with 0.200 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 could significantly increase the chlorophyll content in maize leaves in the seedling stage of maize. Furthermore, our findings indicated that ICE6 treatment could substantially improve the salt resistance related genes expression and then promote the salt tolerance of maize seedlings. The study results have certain guiding significance on the regulatory

effects of ICE6 on maize seedling growth and salt tolerance enhancement.

Key words: ICE6 (iron dihydroporphine); maize; chlorophyll content; salt tolerance; plant growth regulator

收稿日期:2024-06-25

基金项目:江苏省农业科技自主创新基金项目[CX(21)1011];国家自然科学基金项目(32001871)

作者简介:郭思思(1999-),女,福建泉州人,硕士研究生,研究方向为植物病理学。(E-mail)547576177@qq.com

通讯作者:季英华,(E-mail)jiyinghua@jaas.ac.cn;王海涛,(E-mail)wanghai1@163.com

玉米是重要的粮食、饲料和工业原料,对国民经

济发展具有巨大影响。提高玉米综合生产能力是保障中国粮食安全、畜牧业发展、农业增效和农民增收的长期战略目标。

高质量的幼苗是作物获得良好生长和高产的基础保障。使用生长调节剂是培育壮苗和提高产量最直接有效的方法。植物生长调节剂可显著促进苗期作物生长,在水稻、玉米、小麦、大豆和花生等作物上应用广泛。如 S-诱抗素浸种处理可显著提高水稻秧苗品质,促进水稻幼苗生长^[1];0.1 mg/L 冠菌素(COR)和海藻酸钠寡糖(AOS)可显著促进玉米、小麦和大豆的生长^[2-5]。最近有研究结果表明,二氢吡吩铁(ICE6)能够调节多种作物(如水稻、小麦、油菜、烟草和葡萄等)生长,实现增产丰收^[6-11]。ICE6 最早从蚕沙中提取,通过抑制叶绿素酶对叶绿素的降解速率,起到提高叶绿素含量和光合效率的作用^[6]。然而 ICE6 是否具有调节玉米幼苗生长的功能目前尚不清楚。

随着全球气候变暖和人类活动的影响,土壤的盐碱化给农业生产带来了严峻挑战。面对中国盐碱地面积不断增加的趋势,如何提高玉米的耐盐性是当前亟待解决的重要问题。相关研究结果表明,生长调节剂作为一种重要的调控因子,在调节植物应对盐胁迫的过程中发挥着关键作用^[12]。例如,在盐胁迫条件下,使用水杨酸调节剂可以改善油菜的代谢能力,并协调渗透调节物质以维持适当的渗透水平^[13]。另外,喷施芸薹素内酯可以增加白腊树幼苗的渗透调节物质含量,从而提高其对盐胁迫的抵抗能力^[14]。目前虽然有一些关于玉米耐盐性的研究,然而,关于植物生长调节剂 ICE6 能否提高玉米对盐胁迫的抵抗能力,目前尚无明确结论。

为了探究 ICE6 是否具有调控玉米幼苗生长和耐盐性的功能,本研究拟采用浸种法明确不同浓度 ICE6 水溶液对玉米发芽率、幼苗主根长度、根数和株高等生长指标的影响,探究最适浸种浓度和浸种时间;利用叶面喷雾法分析 ICE6 水溶液对玉米叶片叶绿素含量的影响;最后利用荧光定量 PCR 分析 ICE6 水溶液浸种处理后玉米盐胁迫相关基因的表达情况。

1 材料与方法

1.1 试验材料和试剂

本研究中供试玉米品种为玉丰捷 688,适宜在

河北以南的夏播玉米种植区种植。供试药剂为 0.02% ICE6 可溶性粉剂(南京百特生物工程有限公司产品)。

1.2 不同质量浓度 ICE6 水溶液浸种处理对玉米苗期生长的影响试验

1.2.1 玉米发芽率统计 随机选取 30 粒玉米种子分别置于 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 、0.050 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 、0.100 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液和蒸馏水(对照)中。在 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中浸种处理 24 h,用蒸馏水冲洗后于 37 $^{\circ}\text{C}$ 催芽 48 h,统计不同处理组玉米发芽率。试验进行 3 次生物学重复。

1.2.2 玉米幼苗生长表型测定 使用不同稀释倍数的 ICE6 水溶液浸种处理后 4 d,测量玉米芽长、根数、主根长度、芽鲜重和根鲜重,分析不同稀释倍数的 ICE6 水溶液对玉米苗期生长的影响,每组 30 粒玉米,试验进行 3 次生物学重复。

随机选取 30 粒玉米种子分别置于 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 、0.050 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 、0.100 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液和蒸馏水中,在 37 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱中浸种处理 24 h,用蒸馏水冲洗后于 37 $^{\circ}\text{C}$ 继续培养 48 h,随机选取 9 粒,播种至含营养土的盆钵内,8 d 后对玉米株高进行测量,试验进行 3 次生物学重复。

1.3 相同质量浓度 ICE6 水溶液不同浸种时间对玉米苗期生长的影响试验

利用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸泡玉米种子 3 h、6 h、12 h、24 h、48 h,处理结束后用蒸馏水清洗,在培养箱内催芽培养 12 h,随机选择 9 粒发芽种子,播种至含营养土的盆钵内,播种 8 d 后测量株高、主根长度和根鲜重,试验进行 3 次生物学重复。

1.4 喷施不同质量浓度 ICE6 水溶液对玉米幼苗生长的影响试验

玉米幼苗生长表型的测定。将蒸馏水浸种处理的玉米种子播种在含营养土的盆钵内,在二叶一心时喷施 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液,以蒸馏水喷施作为对照,8 d 后随机选取 9 株玉米幼苗,测量株高、主根长度、根鲜重和茎秆直径,试验进行 3 次生物学重复。

在玉米二叶一心时喷施 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液,以喷施蒸馏水作为

对照,在玉米三叶一心时随机选取 9 株玉米幼苗,参照 Xie 等^[11]检测叶绿素含量的方法,取相同位置的叶片 0.100 g,研磨后加入 900 μL 丙酮,充分涡旋振荡后静置 5 min,取上清液置于酶标仪(Micro-GCM FLUOstar Omega)中测量 OD_{663} 和 OD_{645} ,代入如下公式:叶绿素含量 = $8.02 \times OD_{663} + 20.21 \times OD_{645}$ 。计算得出各处理组叶绿素含量,试验进行 3 次生物学重复。

1.5 ICE6 对玉米幼苗耐盐性的影响试验

使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种,催芽后将玉米种子播种至含 0.2% NaCl 的营养土内,处理 1:使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种,催芽后将玉米种子播种至不含 NaCl 的营养土内;处理 2:使用蒸馏水浸种,催芽后将玉米种子播种至含 0.2% NaCl 的营养土内;处理 3:使用蒸馏水浸种,催芽后将玉米种子播种至不含 NaCl 的营养土内。将上述处理置于 28 $^{\circ}\text{C}$ 培养箱内培养,7 d 后对玉米茎、叶和根中抗盐相关基因的表达情况进行检测。

1.5.1 RNA 提取 取不同处理组玉米幼苗 10 株,用消毒后的剪刀剪碎,利用上海净信磨样仪将液氮冷冻的玉米茎、叶和根研磨成粉,参照 RNA 提取试剂(宝日医生物技术有限公司产品)说明书提取不同处理组玉米样品总 RNA,试验进行 3 次生物学重复。

1.5.2 玉米抗盐相关基因的检测 参考文献[15],设计玉米耐盐正调控基因引物(*HKT1*-qF: 5'-AG-CAGCAAAATGAGGCACAA-3', *HKT1*-qR: 5'-CGAT-GTTGAGGACGCTGAAG-3'),耐盐负调控基因引物(*NSA1*-qF: 5'-GGTCAAGCCTGGGTAATCT-3', *NSA1*-qR: 5'-GCCATGTAGACCTCCTCGAA-3'),内参基因引物(*Actin*-qF: 5'-CTGAGGTTCTATTCCAGCC-3', *Actin*-qR: 5'-CCACCACTGAGGACAACAT-3'),参照荧光定量 PCR 试剂说明书,设置反应体系如下: 10.0 μL 2 \times AceQ qPCR SYBR Green Master Mix (Vazyme, Q111-02)、1.0 μL cDNA、各 0.4 μL 上下游引物和 8.2 μL 无菌水。使用 FX Opus 96 定量仪进行检测,反应程序设置如下:95 $^{\circ}\text{C}$ 预变性 5 min; 95 $^{\circ}\text{C}$ 10 s, 60 $^{\circ}\text{C}$ 30 s, 40 个循环。试验数据采用 $2^{-\Delta\Delta C_t}$ 方法进行计算。

1.6 数据分析方法

使用 SPSS19.0 软件进行数据分析,采用单因素分析和 Student *t* 测验方法进行差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 使用二氢吡吩铁水溶液浸种对玉米苗期发育的影响

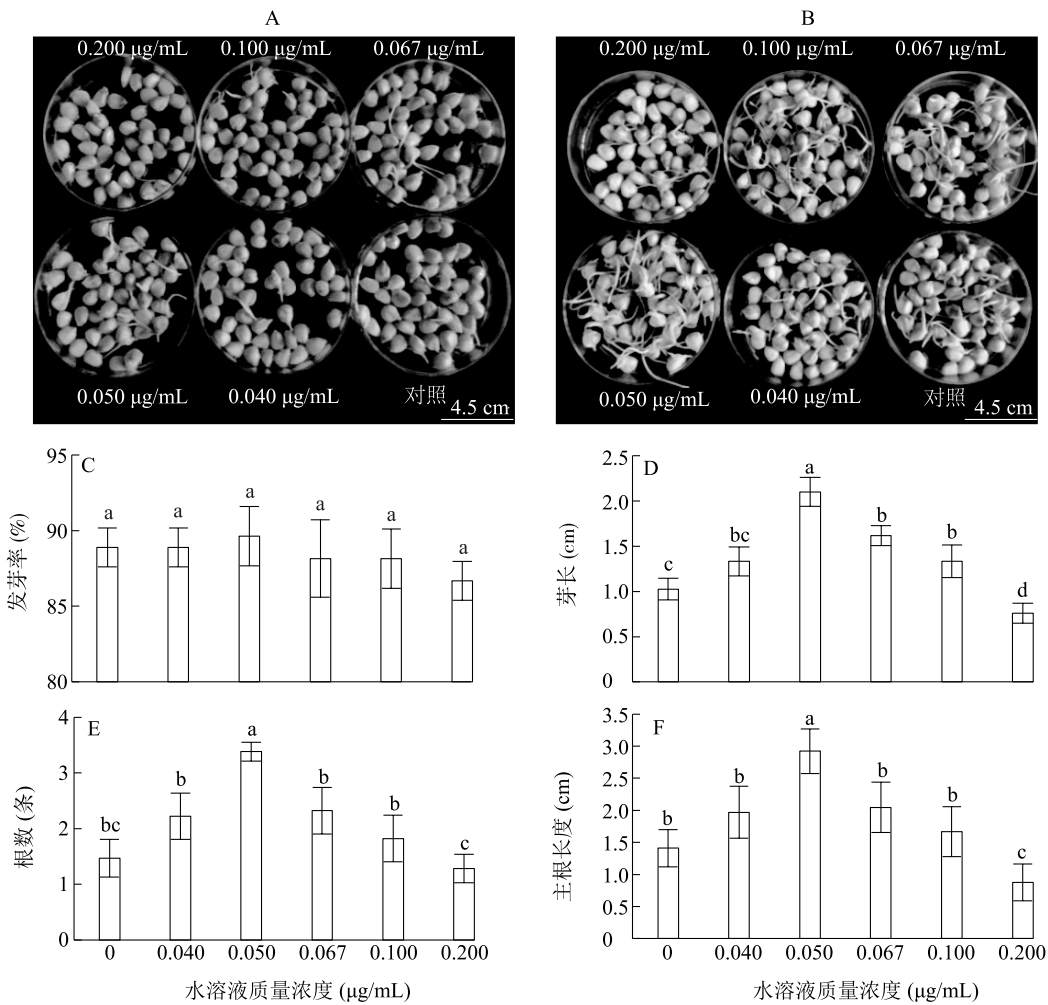
研究发现,与对照相比,使用 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 、0.050 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 、0.100 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米的发芽率没有明显影响(图 1A、1C)。浸种后 4 d 后发现,与其他处理相比,0.050 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 水溶液浸种处理对玉米幼苗生长有明显的促进作用(图 1B)。

为了明确不同质量浓度 ICE6 水溶液浸种对玉米的生长调节作用,研究发现,与对照相比,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.100 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米芽长增加有显著的促进作用,其中使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种相较于其他质量浓度稀释液更能促进玉米芽长的增加(图 1D);与对照相比,使用 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米芽长的影响不显著(图 1D),而使用 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米芽长有显著的抑制作用(图 1D)。

为了明确 ICE6 是否调控玉米根的发育,通过统计发现,相较于对照和其他质量浓度的 ICE6 溶液,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种可有效增加玉米根数和根长,而使用 0.100 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种与对照相比,对玉米根数和根长增加没有显著的促进作用,但显著优于 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液处理后的玉米根数和主根长度(图 1E、1F);此外,使用 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种处理与对照相比,对玉米根数没有显著影响,但显著抑制玉米主根根长(图 1E、1F)。

为了探究 ICE6 是否有利于玉米芽鲜重和根鲜重的增加,研究发现,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米根鲜重和芽鲜重的促进效果显著优于其他处理(表 1),使用 0.100 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米根鲜重和芽鲜重的增加没有明显影响,但显著优于对照组和 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液处理组(表 1)。

综上所述,使用 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 、0.050 $\mu\text{g/mL}$ 、0.067 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.100 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种 24 h 对玉米发芽率没有明显影响,但可以在一定程度上促进芽长、根数和主根长度,其中以 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液对玉米芽长、根数和主根长度的促进效果最好。



A:ICE6 水溶液浸种后 2 d,玉米芽生长状态;B:ICE6 水溶液浸种后 4 d,玉米芽生长状态;C:ICE6 水溶液浸种后 2 d 玉米发芽率;D:ICE6 水溶液浸种后 4 d 玉米芽长;E:ICE6 水溶液浸种后 4 d 玉米发芽根数;F:ICE6 水溶液浸种后 4 d 玉米主根长度。图上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P<0.05$)。标尺:4.5 cm。

图 1 不同质量浓度二氢吡吩铁 (ICE6) 水溶液浸种对玉米发芽率、芽长、根数和主根长度的影响

Fig.1 Influence of seed soaking with solutions of different iron dihydroporphine (ICE6) mass concentrations on maize germination rate, bud length, root number and main root length

表 1 不同质量浓度二氢吡吩铁 (ICE6) 水溶液浸种处理后播种 4 d 时的玉米幼苗芽鲜重和根鲜重

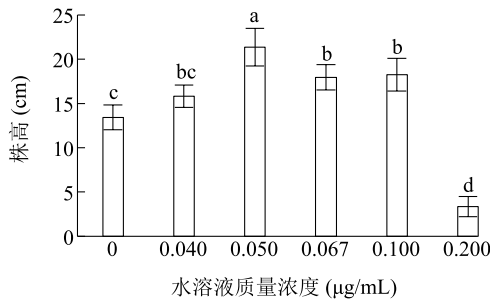
Table 1 Maize bud fresh weight and root fresh weight on the fourth day after iron dihydroporphine (ICE6) treatment with solutions of different mass concentrations

ICE6 水溶液质量 浓度 ($\mu\text{g/mL}$)	芽鲜重 (g, 40 粒)	根鲜重 (g, 40 粒)
0	$0.44\pm0.04\text{c}$	$0.43\pm0.04\text{c}$
0.200	$0.34\pm0.01\text{c}$	$0.32\pm0.06\text{c}$
0.100	$0.95\pm0.08\text{b}$	$0.98\pm0.14\text{b}$
0.067	$0.99\pm0.04\text{b}$	$1.08\pm0.04\text{b}$
0.050	$1.73\pm0.09\text{a}$	$1.67\pm0.09\text{a}$
0.040	$0.83\pm0.11\text{b}$	$0.96\pm0.12\text{b}$

同一列数据后不同小写字母表示差异显著 ($P<0.05$)。

2.2 使用 ICE6 水溶液浸种对玉米苗期生长的影响

为了明确 ICE6 对玉米后续生长是否具有调控作用,本研究对播种后 8 d 的玉米幼苗株高进行统计,结果表明,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种 24 h,对玉米幼苗的株高有明显的促进作用,使用 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种 24 h 对玉米株高有明显的抑制作用(图 2)。而使用 0.100 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.067 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种对玉米幼苗株高的促进效果略高于使用 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种作用,但三者间没有明显的统计学差异(图 2),使用 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种处理的玉米幼苗株高略高于对照,但二者在统计学上没有差异(图 2)。



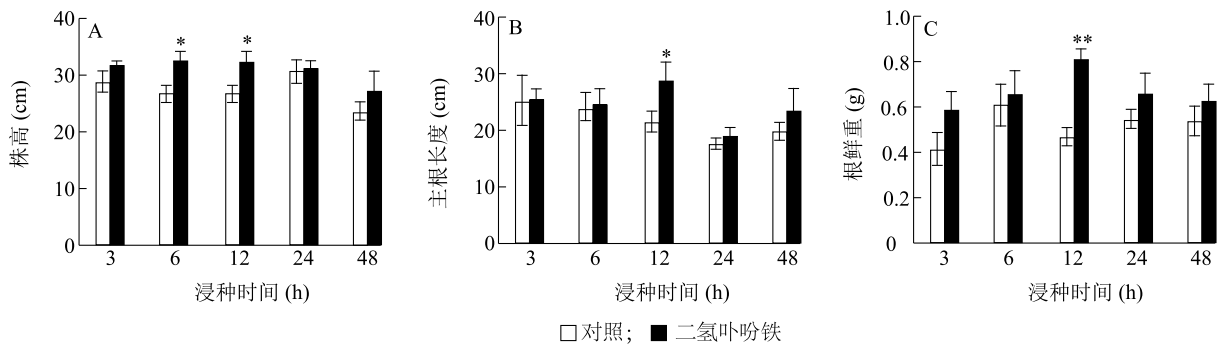
图上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图2 使用不同质量浓度二氢吡吩铁 (ICE6) 水溶液浸种对播种 8 d 后玉米生长的影响

Fig.2 Influence of iron dihydroporphine (ICE6) solutions with different mass concentrations on maize growth eight days post sowing

2.3 使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种不同时间对玉米生长的影响

为了进一步明确 0.050 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 水溶液调



图上 * 表示处理间差异显著 ($P < 0.05$); ** 表示处理间差异极显著 ($P < 0.01$)。

图3 使用二氢吡吩铁 (ICE6) 水溶液浸种不同时间对播种 8 d 后玉米生长的影响

Fig.3 Influence of iron dihydroporphine (ICE6) solutions with different mass concentrations on maize growth eight days after sowing

2.4 叶面喷施 ICE6 水溶液对玉米苗期生长的影响

为了明确喷施 ICE6 是否具有调控玉米苗期生长的能力,本研究对播种 4 d 的玉米喷施 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 和 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液,7 d 后发现,喷施 ICE6 水溶液与对照相比,对玉米株高没有明显的促进或抑制作用(图 4A)。进一步分析发现,喷施 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 、0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液后,对玉米株高、主根长度、根鲜重和茎秆直径没有显著影响(图 4B~4E)。为了进一步揭示叶面喷施 ICE6 水溶液能否调节叶绿素的合成,本研究对使用 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 、0.040 $\mu\text{g/mL}$ ICE6 水溶液喷施的玉米叶片叶绿素含量进行分析发现,使用 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液喷施后 7 d 可显著提高玉米叶片叶绿

素含量,但 0.040 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液与对照相比,对玉米叶绿素含量没有明显影响(图 4F)。

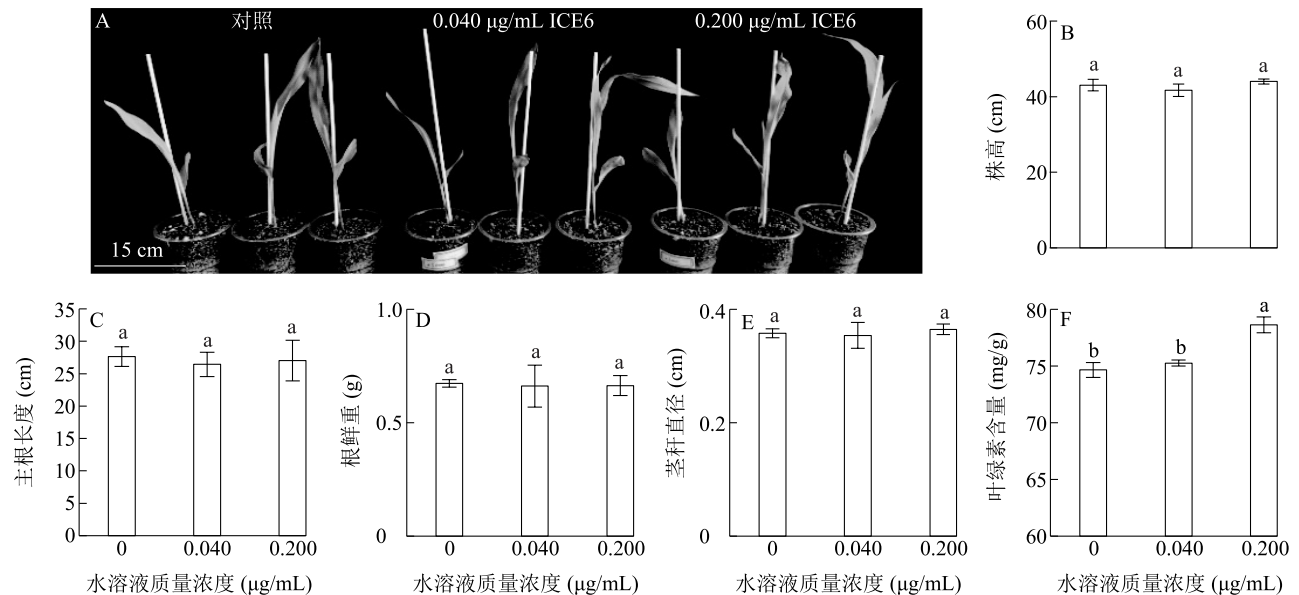
2.5 使用 ICE6 水溶液浸种对玉米抗盐相关基因表达的影响

为了分析 ICE6 能否调控玉米的抗盐性,本研究对正调控抗盐基因 (*ZmHKT1*)、负调控抗盐基因 (*ZmNSA1*)^[15] 进行研究。研究发现,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种处理催芽后,将玉米种子播种至不含 0.2% NaCl 的营养土内,ICE6 水溶液处理后的种子,其幼苗茎叶、根中 *ZmHKT1* 基因的相对表达量显著高于对照(图 5A、5B);将玉米种子播种至含 0.2% NaCl 的营养土内,发现在茎叶、根中 *ZmHKT1* 基因的相对表达量均增加,其中经过 ICE6

水溶液处理后的种子,与对照组相比,玉米根中 *ZmHKT1* 基因的相对表达量极显著增加(图 5B)。该结果表明,ICE6 显著诱导玉米 *ZmHKT1* 基因的相对表达量的增加。

为了分析 ICE6 能否调控玉米抗盐负调控基因的表达,本研究对玉米耐盐负调控基因 *ZmNSA1* 的表达进行研究,结果表明,经过 ICE6 水溶液处理后

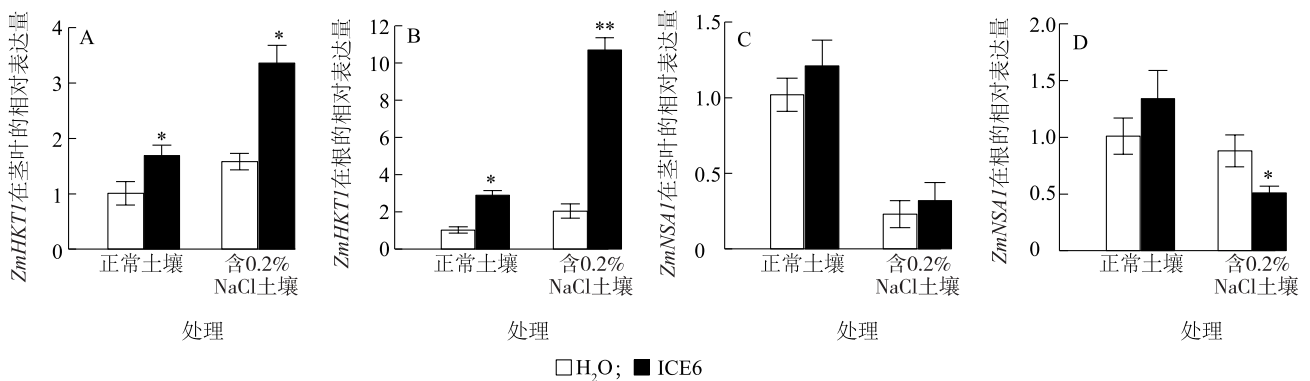
的种子,在不含 0.2% NaCl 的条件下,其幼苗茎叶和根中 *ZmNSA1* 基因的相对表达量与对照差异不显著(图 5C、5D);而在含 0.2% NaCl 的条件下,茎叶和根中 *ZmNSA1* 基因的相对表达量较低,与对照相比,经过 ICE6 水溶液处理后的种子的幼苗根中的 *ZmNSA1* 基因相对表达量显著下降。该结果显示,ICE6 抑制 *ZmNSA1* 基因的表达。



A: 喷施 ICE6 水溶液后玉米生长状态; B~F: 喷施 ICE6 水溶液后对玉米株高 (B)、主根长度 (C)、根鲜重 (D)、茎秆直径 (E) 和叶绿素含量 (F) 的影响。图上不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)。

图 4 二氢卟吩铁 (ICE6) 水溶液叶面喷施处理 7 d 后对玉米生长的影响

Fig.4 Influence of iron dihydroporphine (ICE6) solution on maize growth seven days after foliar treatment



* 表示差异显著; ** 表示差异极显著。

图 5 二氢卟吩铁 (ICE6) 调控玉米抗盐基因的表达

Fig.5 Iron dihydroporphine (ICE6) regulated expression of salt resistant genes in maize

3 讨论

探究如何促进苗期作物生长,对于后续保障作

物稳产增产具有重要意义。有研究结果表明,新型植物生长调节剂 ICE6 对于多种作物的生长、结实等具有显著的促进作用^[7-11],但该生长调节剂是否具

有促进玉米种子萌发及苗期生长的功能尚不明确。种子萌发率是评判种子质量最重要的指标^[16],本研究发现,与对照相比,不同浓度的二氢吡吩铁浸种对玉米种子发芽率没有明显影响,表明本研究使用的玉米种子对于试验药剂水溶液的耐受性高,种子品质较好。

玉米根系是吸收和运输养分、水分的重要器官,根系发达在一定程度上表明抗根倒能力强^[17]。根系生长活力是反映植物生长发育状况最直接的指标。外施生长调节剂在一定程度上可以促进植物根系生长。有研究结果表明,20 $\mu\text{g/mL}$ 的 ABT(主要成分为萘乙酸和吡啶乙酸)或 GGR(主要成分为吡啶乙酸)可以有效促进烟草的根系活力的提高,增加根鲜重和根长度等^[18]。本研究发现 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种处理可以有效促进玉米根数和主根长度增加,表明一定浓度的 ICE6 水溶液可以有效促进玉米苗期根的生长。

叶绿素含量是植物健康的重要生化指标^[19-21]。本研究发现,喷施 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液,可以显著提高玉米幼苗叶片的叶绿素含量,虽然喷施高浓度二氢吡吩铁对于玉米株高、主根长度、根鲜重和茎秆直径没有明显的促进作用,但叶绿素含量增加对于玉米后续的生物合成、能量转化具有十分重要的意义,从长远来看,叶绿素含量增加对于玉米后期生长及稳产、增产具有潜在价值。关于二氢吡吩铁是否能够提高光合速率,促进玉米增产,需要结合田间试验进一步研究明确。

盐碱地广泛分布于世界各地,高盐胁迫是限制植物在盐碱地正常生长和发育的主要因素之一^[22-24]。近年来,随着分子生物学和遗传学研究的不断进展,越来越多的基因被发现与玉米耐盐性密切相关。有研究结果表明,过表达玉米基因 *Zm-Di19-1* 有助于脯氨酸的积累,提高玉米耐盐性^[25];玉米转录因子 *ZmWRKY20* 与 *ZmWRKY115* 在细胞核内互作,抑制了 *ZmZIP111* 的表达,增强了玉米对盐的抗性^[26]; *ZmSTL1* 编码 dirigent 家族蛋白 *ZmESBL*,参与调控内皮层凯氏带的形成和对盐胁迫应答^[27]。

玉米 *ZmHKT1* 基因主要在根的中柱和周围薄壁细胞中表达,该基因通过促进 Na^+ 外排,从而降低玉米地上部组织对盐胁迫的敏感度^[28]。本研究发现,经 ICE6 处理后, *ZmHKT1* 基因在根部的相对表

达量显著增加,表明 ICE6 可以通过上调 *ZmHKT1* 基因的表达来降低玉米地上部的抗盐性,提高玉米对盐胁迫的抗性。此外,本研究还发现,ICE6 水溶液浸种处理可显著抑制 *ZmNSA1* 基因在玉米根部的表达。有研究结果表明,盐碱胁迫会导致胞内 Ca^{2+} 浓度升高,促使 *ZmNSA1* 通过 26S 蛋白酶体途径降解,导致质膜氢离子-三磷酸腺苷酶(H^+ -ATPase)基因(*MHA2* 和 *MHA4*)的转录水平增加,从而增强质膜 H^+ -ATP 酶的功能,加强质膜 Na^+/H^+ 反向转运体的功能,促进 Na^+ 外排,最终增强玉米对盐碱的耐受能力^[29]。

4 结论

本研究以新型植物生长调节剂 ICE6 和玉米为研究对象,探究了 ICE6 调控玉米幼苗生长的功能。研究发现,使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液处理玉米种子 24 h,对玉米幼苗主根长度、根数、芽长等具有显著的促进作用,0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液处理玉米种子对玉米幼苗生长有显著抑制作用。为了进一步明确最适浸种浓度下最优浸种时间,研究发现使用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种 12 h,可显著或极显著提高玉米幼苗株高、主根长度和根鲜重。此外,本研究发现喷施 0.200 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液可显著提高玉米幼苗叶片的叶绿素含量。最后,本研究发现利用 0.050 $\mu\text{g/mL}$ 的 ICE6 水溶液浸种后可显著提高玉米的抗盐胁迫能力。

参考文献:

- [1] 周金龙,邹少丰,吴江长. S-诱抗素在水稻生产上的应用[J]. 福建农业,2014(10):89.
- [2] 王庆燕,李建民,段留生,等. 冠菌素对玉米苗期植株形态建成的调控效应[J]. 农药学报,2015,17(4):401-408.
- [3] 周 繁. 基于 Pyrabactin 的 ABA 功能类似物设计、合成及其生物活性[D]. 北京:中国农业大学,2013.
- [4] 张运红,和爱玲,姚 健,等. 海藻酸钠寡糖灌根处理对小麦根际土壤特性和养分吸收利用的影响[J]. 江西农业大学学报,2019,41(6):1054-1060.
- [5] 鱼海跃,闫 岩,张钰石,等. 不同灌溉条件下冠菌素对大豆光合特性与产量的调控效应[J]. 作物学报,2019,45(12):1851-1858.
- [6] 陈 洋,王乐天,李文珂,等. 二氢吡吩铁溶液的基本性质初探[J]. 南京师大学报(自然科学版),2020,43(1):143-148.
- [7] 王一凡,张列峰,蒋 慧,等. 不同肥力条件下小麦施用叶绿酸铁的效果[J]. 江苏农业科学,2012,40(6):78-79.

- [8] 郭丽华,唐为爱,李万梅. 0.02%二氢卟吩铁 DP 调节油菜生长的药效试验[J]. 上海蔬菜,2016(2):53-54.
- [9] 高艾兰,李万梅. 新型生长调节剂在油菜上应用效果试验[J]. 农业开发与装备,2016(3):68.
- [10] 邢宇俊,陈黎明,孟东峰,等. 0.02%二氢卟吩铁可溶粉剂在烟草上的应用效果[J]. 江苏农业科学,2020,48(24):91-94.
- [11] XIE Y L, WEI L H, JI Y H, et al. Seed treatment with iron chlorine E6 enhances germination and seedling growth of rice[J]. Agriculture,2022,12(2):218.
- [12] 张 敏. 三种植物生长调节剂对密胡杨盐胁迫的缓解效应[D]. 阿拉尔:塔里木大学,2022.
- [13] 彭新盛. 叶面喷施植物生长调节剂对油茶盐胁迫适应性的影响[J]. 特种经济动植物,2023,26(4):43-45.
- [14] 牛京京,牛丛丛. 不同植物生长调节剂对盐碱胁迫下白蜡树幼苗生长及生理特性的影响[J]. 乡村科技,2023,14(5):114-116.
- [15] 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.
- [16] PAPARELLA S, ARAÚJO S S, ROSSI G, et al. Seed priming: state of the art and new perspectives[J]. Plant Cell Reports,2015,34(8):1281-1293.
- [17] 张 勇,徐田军,吕天放,等. 种植密度对夏播玉米茎秆质量和根系表型性状的影响[J]. 生物技术通报,2023,39(8):70-79.
- [18] 李 钊,雷 晓,肖雨沁,等. 两种植物生长调节剂及用量对烟草幼苗根系发育的影响[J]. 山东农业大学学报(自然科学版),2022,53(1):123-130.
- [19] XU J, VOLK T A, QUACKENBUSH L J, et al. Estimation of shrub willow leaf chlorophyll concentration across different growth stages using a hand-held chlorophyll meter to monitor plant health and production[J]. Biomass and Bioenergy,2021,150:106132.
- [20] 安露昌,李豪杰,郑梦瑶,等. 缺氮胁迫对不同小麦品种幼苗根系和光合荧光特性的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(9):106-111.
- [21] 郑立津,赖慧捷,范辉华,等. 氮沉降对闽楠幼苗生长和生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2024,52(2):152-158.
- [22] 田浩天,方晶莹,闵炜芳,等. 宁夏盐碱地水稻根系形态和生理指标与产量的相关分析及综合评价[J]. 南方农业学报,2024,55(6):1619-1627.
- [23] 赵文举,曹 伟,吴克倩,等. 盐碱地水肥耦合对基质栽培番茄生长与产量品质的影响[J]. 排灌机械工程学报,2024,42(6):619-626.
- [24] 金明姬,周妍宏,文波龙,等. 石膏改良盐碱土研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版),2023,47(2):1-8.
- [25] ZHANG X G, CAI H L, LU M, et al. A maize stress-responsive Di19 transcription factor, ZmDi19-1, confers enhanced tolerance to salt in transgenic *Arabidopsis* [J]. Plant Cell Reports, 2019, 38(12):1563-1578.
- [26] BO C, CAI R H, FANG X, et al. Transcription factor ZmWRKY20 interacts with ZmWRKY115 to repress expression of Zm bZIP111 for salt tolerance in maize[J]. Plant Journal, 2022, 111(6):1660-1675.
- [27] WANG Y Y, CAO Y B, LIANG X Y, et al. A dirigent family protein confers variation of Casparian strip thickness and salt tolerance in maize[J]. Nature Communications, 2022, 13(1):2222.
- [28] ZHANG M, CAO Y B, WANG Z P, et al. A retrotransposon in an HKT1 family sodium transporter causes variation of leaf Na⁺ exclusion and salt tolerance in maize[J]. New Phytologist, 2018, 217(3):1161-1176.
- [29] CAO Y B, ZHANG M, LIANG X Y, et al. Natural variation of an EF-hand Ca²⁺-binding-protein coding gene confers saline-alkaline tolerance in maize[J]. Nature Communications, 2020, 11(1):186.

(责任编辑:陈海霞)