

## 外源独角金内酯对玉米幼苗盐胁迫的缓解效应

史沉鱼<sup>1,2,3</sup>, 黄祯祯<sup>1</sup>, 梁美<sup>1</sup>, 梁振智<sup>1</sup>, 谢彦军<sup>1,2,3</sup>, 侯青光<sup>4</sup>

- (1. 广西蚕桑生态学与智能化技术应用重点实验室, 河池学院 化学与生物工程学院, 广西 河池 546300;  
2. 广西现代蚕桑丝绸协同创新中心, 河池学院 化学与生物工程学院, 广西 河池 546300;  
3. 微生物及植物资源开发利用广西高校重点实验室, 河池学院 化学与生物工程学院, 广西 河池 546300;  
4. 河池市农业科学研究所, 广西 河池 546300)

**摘要:**为了探讨独角金内酯(SLs)对盐胁迫下玉米幼苗生长生理的影响。本试验以“郑单958”玉米幼苗为材料,用独角金内酯类似物GR24代替独角金内酯进行研究,在河池学院植物生理材料培养室进行土壤盆栽试验,培养室平均温度28℃,平均相对湿度为70.85%。待玉米幼苗至三叶一心时进行相关指标的测定,试验共设4个处理:叶面喷施蒸馏水(CK1)、350 mmol/L NaCl+叶面喷施蒸馏水(CK2)、350 mmol/L NaCl+叶面喷施外源GR24,外源GR24的浓度分为1 μmol/L(T1)、5 μmol/L(T2)、10 μmol/L(T3)和50 μmol/L(T4)。结果表明:350 mmol/L的NaCl溶液胁迫处理,抑制了玉米幼苗的形态正常发育以及生理作用。与盐胁迫相比,外源喷施5 μmol/L玉米幼苗株高、根长显著增加了15.71%、44.78%,相对含水量、叶绿素含量分别上升了36.76%、39.88%,丙二醛(MAD)含量降低了19.35%,POD、SOD活性、O<sub>2</sub><sup>-</sup>积累量降低。综上,当外源喷施5 μmol/L独角金内酯时,对缓解盐胁迫下玉米幼苗的伤害有较好的作用。

**关键词:**独角金内酯;盐胁迫;玉米幼苗;生理效应

中图分类号:S513 文献标识码:A 文章编号:0488-5368(2025)03-0030-07

## Effect of Exogenous Strigolactones on Reducing Salt Stress in Maize Seedlings

SHI Chenyu<sup>1,2,3</sup>, HUANG Zhenzhen<sup>1</sup>, LIANG Mei<sup>1</sup>, LIANG Zhenzhi<sup>1</sup>, XIE Yanjun<sup>1,2,3</sup>, HOU Qingguang<sup>4</sup>

- (1. Guangxi Key Laboratory of Sericulture Ecology and Applied Intelligent Technology, Hechi University, Hechi, Guangxi 546300, China;  
2. Guangxi Collaborative Innovation Center of Modern Sericulture and Silk, Hechi University, Hechi, Guangxi 546300, China;  
3. Guangxi Colleges and Universities Key Laboratory of Exploitation and Utilization of Microbial and Botanical Resources, Hechi University, Hechi, Guangxi 546300, China; 4. Hechi Agricultural Science Research Institute, Hechi, Guangxi 546300, China)

**Abstract:** To investigate the effects of exogenous strigolactones (SLs) on the physiological responses of maize seedlings under salt stress, a soil pot experiment was conducted using ‘Zhengdan 958’ maize seedlings. The study used GR24, a synthetic analog of strigolactones, as the treatment agent. The experiment was conducted in a controlled cultivation chamber at Hechi University, with an average temperature of 28 °C and a relative humidity of 70.85%. Physiological parameters were measured when the seedlings reached the three-leaf stage. Four treatments were applied: foliar spraying with distilled water (CK1), 350 mmol/L NaCl combined with distilled water (CK2), and 350 mmol/L NaCl combined with exogenous GR24 at concentrations of 1 μmol/L (T1), 5 μmol/L (T2), 10 μmol/L (T3), and 50 μmol/L (T4). The results demonstrated that exposure to 350 mmol/L NaCl significantly inhibited the morphological development and physiological functions of maize seedlings. However, compared with the salt stress condition, exogenous application of 5 μmol/L GR24 led to significant increases in plant height (by 15.71%) and root length (by 44.78%). The relative water content and

收稿日期:2024-04-09 修回日期:2024-05-06

基金项目:广西自然科学基金项目(2024GXNSFAA010145);广西教育厅科研项目(2021KY0623);河池学院科研项目(2021GCC023);“桂西北特色植物资源开发与功能研究中心”研究平台。

第一作者简介:史沉鱼(1982-),女,博士,副教授,主要从事植物生理生态研究。

通信作者:侯青光。

chlorophyll content increased by 36.76% and 39.88%, respectively, while malondialdehyde (MDA) content decreased by 19.35%. Moreover, peroxidase (POD) and superoxide dismutase (SOD) activities, along with  $O_2^-$  accumulation were reduced. These results indicate that the exogenous application of 5  $\mu\text{mol/L}$  GR24 effectively mitigates salt stress-induced damage in maize seedlings, which has its potential role in improving plant stress tolerance.

**Key words:** Strigolactones; Salt stress; Maize seedlings; Physiological response

盐胁迫是指植物生长环境中含有过量矿物质  $\text{Na}^+$  或  $\text{Cl}^-$ , 对植物生长发育造成不利影响。近年来由于环境污染严重, 社会经济高速发展, 土壤资源被大量开发, 导致土壤盐碱化加剧, 预计到 2050 年, 全球约 50% 的可耕地都可能受到盐碱化的影响<sup>[1]</sup>。盐胁迫可影响植物的正常生长, 如植物种子萌发受阻、降低土壤水势、产生离子毒害以及抑制酶活性<sup>[2-5]</sup>。盐胁迫还会直接或间接影响植物生长发育的各个环节, 会导致植物体内正常代谢受阻, 光合作用产生的有机物积累受阻, 离子失衡, 各种酶活性受到影响<sup>[1,6-8]</sup>。

独角金内酯 (Strigolactones) SLs 是近年来发现的一种全新的植物激素, 也是当前针对植物逆境抗性研究的热点之一。已有多个研究证明了其参与植物生长发育的多种生理活动, 如抑制植物分支、促进种子萌发、促进植物主根发育和伸长、调节植物次生长及叶片衰老<sup>[9,10]</sup>。其中, 独角金内酯可以与信号分子互作促进植物种子的萌发和根系的生长, 抑制侧根和不定根的形成, 同时也可以提高植物对水分及养料的吸收<sup>[10-15]</sup>。外源喷施独角金内酯可减轻叶片的受损害程度, 叶绿素含量下降幅度减小, 相对电导率降低<sup>[16,17]</sup>。王言景等人在外源独角金内酯对两种小麦苗期抗旱性的影响研究中指出, 独角金内酯对干旱胁迫下的小麦光合作用能力、抗氧化能力以及水分含量存在一定的促进作用<sup>[18]</sup>。唐超男在外源独角金内酯调控辣椒幼苗低温耐受性的生理与分子机制中指出, 独角金内酯可以减少低温胁迫下光合色素的损失, 提高低温胁迫下植株的净光合速率、气孔导度和蒸腾速率, 在一定程度上维持了低温胁迫下辣椒叶绿体能量的生产<sup>[19]</sup>。张小花在外源独角金内酯对黄瓜盐胁迫耐受性的影响中指出, 外源独角金内酯能够缓解黄瓜幼苗盐胁迫下导致的膜损伤, 并且提升抗氧化酶的活性, 提高 ROS 的清除能力, 维持细胞渗透压和离子稳态, 以此减缓盐胁迫对黄瓜幼苗造成的影响<sup>[20]</sup>。玉米是中国的主要粮食作物之一<sup>[21]</sup>。土壤盐碱化等逆境胁迫是制约玉米提高产量的重要因素, 每年造成 20%~30% 的玉米产量减少<sup>[22]</sup>。给农民带来巨大生产、生活压力。出于此生产问题

的考虑, 迫切需要一种方式来缓解土地盐渍化对玉米幼苗生长的影响, 从而提高玉米产量。

独角金内酯在植物非生物胁迫下的抗逆性方面有重要作用, 近年来也为广大科研人员以及生产者提供了新的探讨方向。研究表明, 在植物非生物胁迫下独角金内酯能够发挥其抗逆性作用, 植物在干旱胁迫、冷胁迫、水分胁迫、盐胁迫等条件下独角金内酯可以与一些激素互作直接参与耐受性<sup>[17,19,20,23]</sup>, 然而玉米在盐胁迫下外源施加独角金内酯的缓解效应研究尚未见报道。研究外源喷施独角金内酯合成类似物调控盐胁迫下玉米幼苗生长的生理生化及其修复机制, 为盐碱地玉米产量和品质的提高提供理论依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

本研究以购于寿光欣欣园艺有限公司的“郑单 958”玉米种子为试验材料, 以购于柯意哲 (上海) 机电工程有限公司的 GR24 类似物 GR24 (纯度  $\geq 98\%$ ) 进行试验。

### 1.2 试验方法

抽选出颗粒完整饱满且大小一致的“郑单 958”玉米种子, 将其浸在 40℃ 的温水中 3~4 h, 完成浸种后捞出用滤纸擦干, 将浸种处理后的玉米种子置于 1%  $\text{KMnO}_4$  溶液中消毒 10 min, 结束后用蒸馏水冲洗种子上残留的  $\text{KMnO}_4$ , 再用滤纸擦干种子, 最后置于垫有两层滤纸的培养皿中进行催芽处理。每个培养皿中放置 30 粒种子, 种子置于 26℃, 光周期为 16 h/8h (光照/黑暗) 的环境中进行萌发, 萌发期间保持种子湿润。待种子完全萌发后, 根长为 1 cm 左右时将其移至土壤中培养。

待玉米幼苗至三叶一心期时, 将长势一致的玉米分为六组, 每组十盆, 每盆三株, 重复三组试验。试验分组如下: 浇蒸馏水+叶面喷施蒸馏水 (CK1)、浇 350 mmol/L 的  $\text{NaCl}$ +叶面喷施蒸馏水 (CK2)、浇 350 mmol/L 的  $\text{NaCl}$ +叶面喷施外源 SLs 进行试验处理, 外源 SLs 的浓度分为 1  $\mu\text{mol/L}$  (T1)、5  $\mu\text{mol/L}$  (T2)、10  $\mu\text{mol/L}$  (T3) 和 50  $\mu\text{mol/L}$  (T4)。

待玉米幼苗至三叶一心期进行如下试验处理:

CK1:浇灌蒸馏水每 24 小时一次,喷施  $dH_2O$ ,每 24 小时一次,均持续 7 d;CK2:浇灌  $dNaCl$ ,每 24 小时一次,喷施  $dH_2O$ ,每 24 小时一次,均持续 7 d;T1-T4:浇灌  $dNaCl$ ,每 24 小时一次,喷施外源 SLs 每 24 小时一次,均持续 7 d。喷施在玉米幼苗叶片的上、下表面,以叶面湿润不流滴为准。待试验处理结束后检测各项指标,每项指标测定至少 3 次。

### 1.3 测定项目和方法

1.3.1 幼苗的株高和根长 在试验处理 7 d 结束后,从 CK1 到 T4 六个不同处理组的玉米幼苗中随机选取 3 株幼苗,并用卷尺测量其株高和根长,重复 3 次。

1.3.2 幼苗的干重、鲜重和相对含水量测定 将玉米幼苗从花盆中取出,用清水冲洗干净,吸干表面水分称取鲜重,之后将其浸入蒸馏水中,复浸至称取恒重。最后在  $105\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱下杀青 20 min,然后置于  $80\text{ }^\circ\text{C}$  烘箱中烘干至恒重<sup>[24]</sup>。每个处理称量 9 株,重复 3 次。

1.3.3 叶绿素、类胡萝卜素的提取与含量测定 玉米幼苗叶片中的叶绿素、类胡萝卜素的提取用 80%丙酮研磨法<sup>[24]</sup>。将玉米叶片在提取液(80%丙酮)中研磨,研磨后定容至 25 mL 棕色容量瓶中,在 645 nm、663 nm 和 470 nm 波长下测定吸光值。

1.3.4 丙二醛(MDA)含量测定 玉米幼苗中的 MDA 的测定采取硫代巴比妥酸(TBA)法<sup>[24]</sup>。将研磨离心的提取液水浴加热后,在 532 nm、600 nm 和 450 nm 波长下用紫外分光光度计测定的吸光度值。

1.3.5 过氧化物酶(POD)和超氧化物歧化酶(SOD)活性测定 过氧化物酶活性测定采用愈创木酚法<sup>[24]</sup>。低温下研磨玉米幼苗叶片,将研磨液在低温下离心,在 470nm 下记录吸光度值,利用公式计算玉米幼苗的过氧化物酶活性;超氧化物歧化酶活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法<sup>[24]</sup>。低温下研磨玉米幼苗叶片,将研磨液在低温下离心,上清液即为粗提取液,进行显色反应,最后在紫外分光光度计下测定吸光度值,计算活性。

1.3.6 氧自由基  $O_2^-$  积累量测定 氧自由基  $O_2^-$  积累量的测定采用氮蓝四唑(NBT)染色法<sup>[25]</sup>。在试验处理结束后,从 CK1 到 T4 六个不同处理组的玉米幼苗中随机选取同一生长周期的叶片进行染色观察,重复 3 次。

### 1.4 数据处理

运用 SPSS、excel 数据分析软件,运用 IBM SPSS Statistics 23 软件将人工试验操作得到的基础

数据进行整理分析,进行单因素 ANOVA 检验、方差齐性检验、LSD 检验。再通过 Microsoft Excel 将得到数据进行整理和绘制图表。

## 2 结果与分析

### 2.1 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗形态指标的影响

由表 1 可知,采用单一盐胁迫(CK2)的玉米幼苗株高、根长比未进行盐胁迫的正常处理的对照组(CK1)分别降低了 15.68%和 39.5%( $P<0.05$ ),说明盐胁迫导致玉米幼苗株高和根长明显受到抑制。当用  $1\text{ }\mu\text{mol/L}$ 、 $5\text{ }\mu\text{mol/L}$ 、 $10\text{ }\mu\text{mol/L}$ 、 $50\text{ }\mu\text{mol/L}$  四种不同浓度的外源 SLs 喷施处理盐胁迫下的玉米幼苗时,玉米幼苗的株高和根长较 CK2 都呈上升趋势。当外源喷施 SLs 浓度为  $5\text{ }\mu\text{mol/L}$  时,株高最高且根长最长,较 CK2 显著上升了 15.71%、44.78%( $P<0.05$ )。从图 1 可以看出,CK2 与 CK1 相比,根系面积减小、叶片焦黄、茎粗缩短。当在盐胁迫下外源喷施不同浓度的 SLs 时,与 CK2 相比,外源喷施 SLs 的各个浓度的根系长度、面积等参数均上升,叶尖枯萎程度有所缓解,茎粗增大。可知外源喷施 SLs 可减轻盐胁迫对玉米幼苗表观形态的抑制作用。

表 1 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗株高及根长的影响

| 处理  | 株高/cm                     | 根长/cm                    |
|-----|---------------------------|--------------------------|
| CK1 | 50.57±5.82 <sup>a</sup>   | 45±5.64 <sup>a</sup>     |
| CK2 | 42.64±7.17 <sup>c</sup>   | 27.22±5.57 <sup>c</sup>  |
| T1  | 44.18±5.12 <sup>abc</sup> | 36.4±6.98 <sup>b</sup>   |
| T2  | 49.34±3.75 <sup>ab</sup>  | 39.41±7.92 <sup>ab</sup> |
| T3  | 44.91±5.57 <sup>ab</sup>  | 34.59±4.9 <sup>b</sup>   |
| T4  | 43.37±5.93 <sup>bc</sup>  | 33.34±4.93 <sup>bc</sup> |

注:表中含有不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

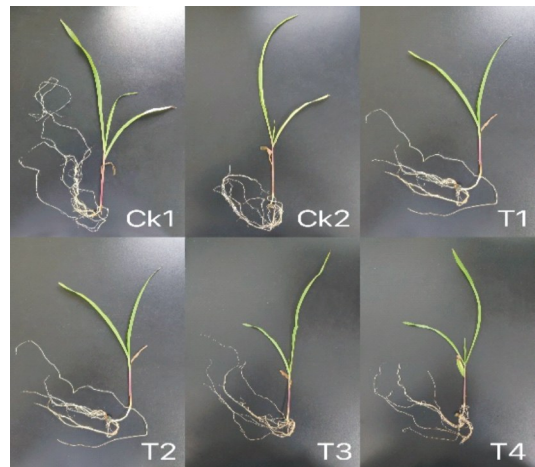


图 1 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗表型的影响

## 2.2 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗干重、鲜重和相对含水量(RWC)的影响

由表 2 可知,盐胁迫(CK2)与正常处理的 CK1 相比,玉米幼苗的干重、鲜重和相对含水量(RWC)显著降低了 16.67%、34.62%、19.05% ( $P<0.05$ )。说明了盐胁迫能够影响玉米幼苗体内保水储水能力。在盐胁迫下外源喷施 SLs,玉米幼苗的干重、鲜重、RWC 都呈现上升趋势。其次外源喷施 SLs

各个浓度处理组的玉米幼苗的鲜重、RWC 较 CK2 均呈现上升趋势,达到显著水平( $P<0.05$ ),干重较 CK2 虽呈现上升趋势,但并不显著( $P<0.05$ )。与 CK2 相比,外源喷施 SLs 浓度为  $5 \mu\text{mol/L}$  时相对含水量显著上升了 36.76% ( $P<0.05$ )。可知在盐胁迫的情况下外源喷施 SLs,对玉米幼苗的干重、鲜重、RWC 起到促进作用。

表 2 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗干重、鲜重和相对含水量的影响

| 处理  | 干重 / g                     | 鲜重/g                       | 相对含水量 / %                 |
|-----|----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| CK1 | 0.24±0.003 9 <sup>ab</sup> | 3.12±0.006 4 <sup>a</sup>  | 0.84±0.030 2 <sup>b</sup> |
| CK2 | 0.2±0.000 7 <sup>c</sup>   | 2.04±0.051 8 <sup>d</sup>  | 0.68±0.021 9 <sup>c</sup> |
| T1  | 0.27±0.009 1 <sup>a</sup>  | 3.17±0.019 3 <sup>a</sup>  | 0.86±0.000 5 <sup>b</sup> |
| T2  | 0.22±0.009 4 <sup>bc</sup> | 3.08±0.045 5 <sup>ab</sup> | 0.93±0.002 1 <sup>a</sup> |
| T3  | 0.22±0.016 8 <sup>bc</sup> | 2.95±0.077 4 <sup>bc</sup> | 0.92±0.002 4 <sup>a</sup> |
| T4  | 0.23±0.018 9 <sup>bc</sup> | 2.84±0.07 9 <sup>c</sup>   | 0.83±0.004 5 <sup>b</sup> |

注:表中含有不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.3 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗叶绿素及类胡萝卜素含量的影响

由表 3 可知,盐胁迫(CK2)下的玉米幼苗与 CK1 相比,其叶绿素 a、总叶绿素含量分别显著下降了 38.76%、40.02% ( $P<0.05$ );CK2 较 CK1 而言,叶绿素 b、类胡萝卜素含量虽有明显下降,但均未达到显著水平。表明盐胁迫能够抑制玉米幼苗叶绿素 a 的含量和总叶绿素的合成。当用浓度不同的外源 SLs 喷施处理盐胁迫下的玉米幼苗时,玉米幼苗的总叶绿素含量显著增加( $P<0.05$ ),其中当外源喷施 SLs 浓度为  $5 \mu\text{mol/L}$  时较 CK2 显著增

加了 39.88% ( $P<0.05$ ),且不同浓度的外源喷施 SLs 组间有显著差异( $P<0.05$ )。表明外源喷施 SLs 可有效缓解盐胁迫造成的总叶绿素含量的降低。外源喷施 SLs 浓度为  $5 \mu\text{mol/L}$  时,叶绿素 a 的含量较 CK2 显著增加了 35.12% ( $P<0.05$ )。而叶绿素 b、类胡萝卜素含量与 CK2 相比虽有提升,但均未达到显著。试验表明,外源喷施 SLs 对玉米幼苗在盐胁迫(CK2)的情况下的叶绿素 a、总叶绿素含量有促进作用,尤其是当外源喷施 SLs 浓度为  $5 \mu\text{mol/L}$  时促进作用最佳。而叶绿素 b、类胡萝卜素含量无显著性影响,基本与盐胁迫(CK2)水平持平。

表 3 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗叶绿素及类胡萝卜素含量的影响

| 处理  | 叶绿素 a (mg/L)            | 叶绿素 b (mg/L)            | 总叶绿素 (mg/L)             | 类胡萝卜素 (mg/L)            |
|-----|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CK1 | 9.16±0.74 <sup>a</sup>  | 1.96±0.47 <sup>a</sup>  | 11.12±0.77 <sup>a</sup> | 2.16±0.16 <sup>a</sup>  |
| CK2 | 5.61±0.14 <sup>d</sup>  | 1.06±0.41 <sup>b</sup>  | 6.67±0.54 <sup>d</sup>  | 1.71±0.19 <sup>b</sup>  |
| T1  | 6.83±0.36 <sup>bc</sup> | 1.44±0.17 <sup>ab</sup> | 8.27±0.3 <sup>c</sup>   | 2.07±0.08 <sup>a</sup>  |
| T2  | 7.58±0.65 <sup>b</sup>  | 1.75±0.23 <sup>ab</sup> | 9.33±0.43 <sup>b</sup>  | 2.15±0.17 <sup>a</sup>  |
| T3  | 6.52±0.22 <sup>cd</sup> | 1.44±0.39 <sup>ab</sup> | 7.96±0.41 <sup>c</sup>  | 2.04±0.15 <sup>ab</sup> |
| T4  | 6.33±0.49 <sup>cd</sup> | 1.38±0.42 <sup>ab</sup> | 7.71±0.51 <sup>c</sup>  | 1.94±0.21 <sup>ab</sup> |

注:表中含有不同字母表示差异显著( $P<0.05$ )。

## 2.4 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗丙二醛(MDA)含量的影响

由图 2 可以看出,单独盐胁迫(CK2)处理下玉米幼苗的丙二醛(MDA)含量与 CK1 相比显著增加了 31.86% ( $P<0.05$ ),说明盐胁迫能够使玉米幼苗的 MDA 含量增多。外源喷施不同浓度的 SLs 与单独盐胁迫(CK2)相比,MDA 含量均呈现下降趋势,达到显著水平( $P<0.05$ ),其中  $5 \mu\text{mol/LSLs}$  处理浓度下缓解作用最明显,MDA 含量较 CK2 显著下降了 19.35% ( $P<0.05$ )。表明外源喷施 SLs 能够缓解盐胁迫对玉米幼苗的抑制作用,且在外源喷施

SLs 的浓度为  $5 \mu\text{mol/L}$  时缓解效果最佳。

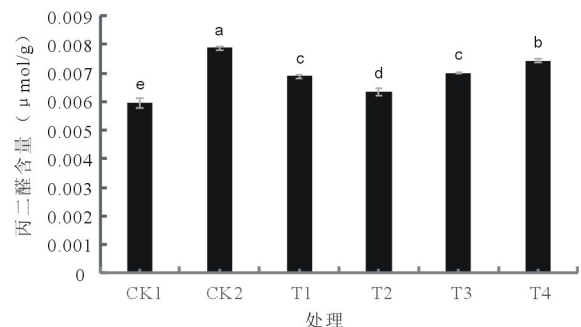


图 2 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗丙二醛含量的影响

## 2.5 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗 POD 活性和 SOD 活性的影响

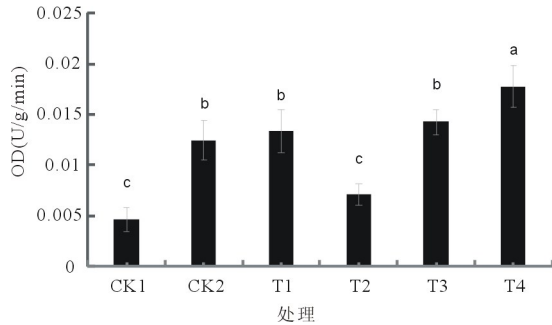


图3 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗过氧化物酶(POD)活性的影响

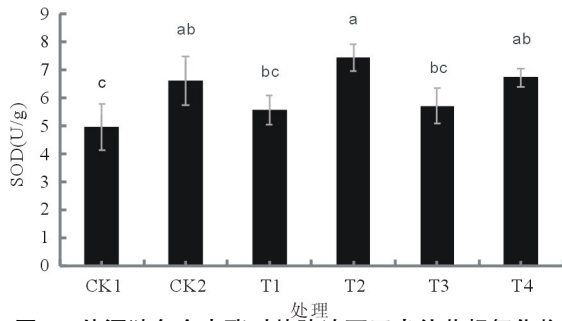


图4 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗超氧化物歧化酶(SOD)活性的影响

由图3可以看出,单独盐胁迫(CK2)与CK1正常处理的玉米幼苗的过氧化物酶活性(POD)相比显著升高( $P < 0.05$ ),表明盐胁迫能够促进玉米幼苗POD活性升高。当外源喷施 $1 \mu\text{mol/L}$ 和 $10 \mu\text{mol/LSLs}$ 时,盐胁迫下玉米幼苗POD活性均有提高,但较CK2相比无显著差异( $P < 0.05$ );当外源喷施 $50 \mu\text{mol/L}$ SLs时,玉米幼苗的POD活性则显著提升了 $42.75\%$ ( $P < 0.05$ );当外源喷施 $5 \mu\text{mol/L}$ 的SLs时,盐胁迫下玉米幼苗的POD活性显著下降了 $43.08\%$ ( $P < 0.05$ ),与CK2相比有显著差异( $P < 0.05$ )。

由图4可知,单独盐胁迫(CK2)与CK1相比,玉米幼苗中的超氧化物歧化酶活性(SOD)显著上升了 $33.74\%$ ( $P < 0.05$ ),表明盐胁迫能够促进玉米幼苗SOD活性增加。当外源喷施 $1 \mu\text{mol/L}$ 和 $10 \mu\text{mol/L}$ 的SLs时,盐胁迫下玉米幼苗的SOD活性降低,但较CK2相比无显著差异( $P < 0.05$ );当外源喷施 $5 \mu\text{mol/L}$ 和 $50 \mu\text{mol/L}$ SLs时,玉米幼苗的SOD活性反而提升了 $12.33\%$ 和 $1.64\%$ ,其SOD活性较CK2虽有增加,但都没有显著差异( $P < 0.05$ )。

结果说明,玉米幼苗在盐胁迫的情况下其POD活性和SOD活性显著增加,表明盐胁迫下玉米幼苗通过增加POD和SOD活性来缓解盐胁迫

导致的活性氧毒害。外源喷施 $1 \mu\text{mol/L}$ 和 $10 \mu\text{mol/L}$ SLs时,玉米幼苗主要通过提高POD活性来减缓ROS的伤害;外源喷施 $5 \mu\text{mol/L}$ SLs时,玉米幼苗主要通过提高SOD活性来维持植物正常生理;当外源喷施 $50 \mu\text{mol/L}$ SLs时,玉米幼苗通过增加POD和SOD活性来消灭体内的活性氧,减缓活性氧对玉米幼苗的损伤。

## 2.6 外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗氧自由基 $\text{O}_2^-$ 积累量的影响

进入植物体内的氧分子,在接受一个电子之后转变为超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^-$ )。当机体受到胁迫时,就会产生氧自由基的积累。因此检测氧自由基 $\text{O}_2^-$ 积累量可以判断植物叶片质膜的损伤程度。



图5 外源独角金内酯对盐胁迫下玉米幼苗氧自由基  $\text{O}_2^-$  积累量的影响

由图5可看出,单独盐胁迫(CK2)与CK1相比,经过NBT染色的玉米幼苗叶片颜色较深,蓝色斑点多。表明盐胁迫能够增加玉米幼苗叶片的 $\text{O}_2^-$ 活力。当外源喷施不同浓度的SLs时,玉米幼苗叶片的蓝色斑点与CK2相比数量减少,其中当SLs浓度为 $5 \mu\text{mol/L}$ 时,蓝色斑点数量最少,几乎与正常处理对照组(CK1)一致。表明外源喷施SLs能够缓解在盐胁迫下玉米幼苗的损伤程度,且在SLs的浓度为 $5 \mu\text{mol/L}$ 时缓解效果达到最佳。

## 3 讨论

盐胁迫对植物正常的生长发育过程有明显的抑制作用,植株个体通常矮化、根系面积减小、叶片枯黄卷曲,甚至干枯焦化<sup>[7,26]</sup>,因此盐胁迫对植物的影响表现就能够直观呈现。独角金内酯修复处理的生理效应试验,对玉米幼苗的株高、根长、植株根系、植株外观的形态指标的测定能最直观、基础和快捷地检测外源喷施SLs对玉米幼苗盐胁迫的缓解效应。在本试验中,当外源喷施SLs的浓度增加时,其缓解效果表现出了先是增加,然后逐渐降低的趋势。当外源喷施SLs的浓度达到 $5 \mu\text{mol/L}$ 时,其缓解效果达到了最佳,较单一盐胁迫下株高、根长显著上升了 $15.71\%$ 、 $44.78\%$ ,达到显著水平,

与正常生理下的玉米幼苗的株高、根长情况基本一致。当外源喷施 SLs 时可以有效缓解盐胁迫导致的玉米幼苗的形态抑制,增大了玉米幼苗的根系面积和长度,以及茎粗,缓解了叶片焦黄情况。赵玉欢等人指出的外源施加 SLs 能够显著促进黄芪幼苗主根的生长<sup>[27]</sup>;杜娟等人研究也指出,外源施加独角金内酯能够对主根起到正调控作用,增加不定根数量<sup>[11]</sup>;庄晔指出叶片喷施 SLs 使烤烟幼苗株高高于单纯干旱处理<sup>[28]</sup>;李润宇提出外源施加独角金内酯能够缓解葡萄幼苗叶片变黄、萎蔫的程度,且使株高和茎粗升高<sup>[29]</sup>。试验结果也表明,外源喷施 SLs 能够有效缓解受到盐胁迫的玉米幼苗的形态抑制作用。

盐胁迫下,植物细胞大量失水,渗透压变化,最终导致植物体内水分供应不足,代谢受阻<sup>[15]</sup>。盐胁迫下还会影响植物呼吸作用,阻碍植物有机物的积累。干物质的积累量是衡量玉米等粮食作物有机物积累以及营养物质含量的重要指标<sup>[30]</sup>。通过探究植物干重、鲜重以及 RWC 可以判断外源喷施 SLs 对玉米幼苗是否具有缓解效应。通过本试验可证实,盐胁迫能够显著降低玉米幼苗的干重、鲜重、RWC。而在盐胁迫的条件上外源喷施 SLs,能够增加玉米幼苗的干重、鲜重、RWC。当外源喷施 SLs 浓度为  $5\mu\text{mol/L}$  时,较单一盐胁迫下的玉米幼苗 RWC 上升了 36.76%,达到显著水平。本试验结果表明,外源喷施 SLs 可在一定程度上缓解玉米幼苗的盐胁迫,对玉米幼苗的干重、鲜重和 RWC 有促进作用。这与先前研究报道的外源施加 SLs 可以缓解非生物胁迫导致的干物质以及相对含水量降低的结果<sup>[20,28-29]</sup>一致。

叶绿体中含有叶绿素和类胡萝卜素等光合色素,其含量可作为表示光合作用强度的重要指标。同时盐碱环境可引起植物的光合作用发生变化<sup>[7]</sup>。从试验结果可以看出,盐胁迫使玉米幼苗叶绿素 a 和总叶绿素含量下降( $P < 0.05$ ),而叶绿素 b 和类胡萝卜素的含量也有不同程度的下降,但未达到显著水平( $P > 0.05$ ),这与先前的研究指出的盐胁迫抑制了玉米幼苗叶绿素 a、总叶绿素的合成结论<sup>[7,31]</sup>一致。外源喷施 SLs 对盐胁迫下的玉米幼苗的叶绿素 b、类胡萝卜素含量虽也呈增加趋势,但并不显著。但在盐胁迫的基础上外源喷施 SLs 能够促进玉米幼苗的叶绿素 a、总叶绿素含量上升( $P < 0.05$ ),当外源喷施 SLs 的浓度为  $5\mu\text{mol/L}$  时,叶绿素 a、总叶绿素含量较盐胁迫的玉米幼苗显著升高了 35.12%、39.88%,达到显著水平。李润宇等人研究表明喷施 SLs 处理有利于

维持干旱胁迫下葡萄幼苗叶片的光合色素含量<sup>[29]</sup>;张小花指出外源 SLs 可以缓解盐胁迫造成的光合色素含量降低<sup>[20]</sup>;程新生研究发现喷施外源独角金内酯可以显著提高干旱下辽东栎的叶绿素含量<sup>[32]</sup>;本试验结论也表明外源喷施 SLs 能够有效缓解玉米幼苗盐胁迫导致的叶绿素 a、总叶绿素含量的降低,对于玉米幼苗的光合作用有积极的影响。

盐胁迫逆境下,植物体受到渗透胁迫,生物膜稳定性降低,导致膜脂过氧化,而 MDA 则是膜脂过氧化的终产物,其含量反映植物体对逆境的响应程度。本试验探究发现,盐胁迫下玉米幼苗的丙二醛含量显著增加。这与前人研究指出的盐胁迫可以抑制植物的正常生长的结果<sup>[6,7]</sup>一致。外源喷施 SLs 能够降低盐胁迫下玉米幼苗的 MDA 含量,达到显著水平( $P < 0.05$ ),不同浓度的 SLs 均能缓解玉米幼苗受到盐胁迫的抑制作用,外源喷施 SLs 浓度为  $5\mu\text{mol/L}$  时,缓解效果最佳。张小花在外源独角金内酯对黄瓜盐胁迫耐性的影响中指出黄瓜幼苗在盐胁迫下外源施加 SLs 能够使 MDA 含量增加,缓解盐胁迫的损伤<sup>[20]</sup>,与本研究结论一致。本研究表明,外源喷施 SLs 对盐胁迫下玉米幼苗的抑制作用有一定的缓解作用,暗示外源 SLs 在一定程度上可以维持盐胁迫下细胞膜的稳定性。

正常情况下植物体活性氧和抗氧化酶维持动态平衡,当植物体受到盐胁迫时候,会影响植物体的酶活性,导致活性氧增多,激活植物体内抗氧化酶(POD、SOD等)<sup>[6]</sup>。SOD 是植物体内一种能够清除植物体内超氧阴离子自由基的含金属辅基的酶;POD 是植物体内一种与植物光合作用、呼吸作用和生长素的氧化相关的活性较强的酶<sup>[7]</sup>。田晓艳等人指出,盐胁迫会导致景天三七 SOD 活性、POD 活性显著增加,景天三七通过增加 SOD、POD 活性提高其耐盐性<sup>[33]</sup>;张小花研究发现,盐胁迫下外源施加独角金内酯能够使黄瓜 SOD、POD 活性增加<sup>[20]</sup>。研究表明,在盐胁迫下,可以通过外源喷施 SLs 来增加玉米幼苗的 POD、SOD 活性,从而提高玉米幼苗清除 ROS 的能力,缓解盐胁迫对玉米幼苗的抑制作用,维持玉米幼苗的正常生理生长。

ROS 含量在植物体内是处于相对稳定的,当植物受到逆境胁迫时,ROS 快速产生,过量的 ROS 会造成质膜损伤,导致植物产生毒性作用<sup>[6]</sup>。张小花指出,盐胁迫下外源施加独角金内酯能够使黄瓜幼苗叶片的超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^-$ )以及 $\cdot\text{OH}$ 含量,较盐胁迫呈现下降趋势<sup>[20]</sup>。在该试验中与正常处理相比,盐胁迫会导致玉米幼苗叶片 NBT

染色后,产生大量蓝色斑点,且颜色较深。说明盐胁迫对玉米幼苗叶片造成质膜损伤。当在盐胁迫的条件下外源喷施不同浓度的 SLs,玉米幼苗叶片的蓝色斑点均减少,且颜色更淡。当外源喷施 SLs 的浓度为  $5\mu\text{mol/L}$  时,玉米幼苗叶片的蓝色斑点最少,几乎与正常处理的对照组(CK1)一致。本研究表明,外源喷施 SLs 可在一定程度上缓解玉米幼苗的盐胁迫症状,对玉米幼苗叶片的超氧阴离子自由基( $\text{O}_2^-$ )损伤有一定的抑制作用,够缓解盐胁迫造成的活性氧过量积累,维持植物在干旱胁迫条件下的活性氧稳态。

#### 4 结论

在盐胁迫下,玉米幼苗的株高、根长降低,根系面积减小、叶片干枯焦黄、茎粗减小,干重、鲜重降低、相对含水量、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量减小,丙二醛含量、POD、SOD 活性以及  $\text{O}_2^-$  积累量上升。当玉米幼苗受到盐胁迫时外源喷施不同浓度的 SLs,玉米幼苗的株高、根长、茎粗、根系面积增大,叶片焦黄干枯现象有所缓解,干重、鲜重、相对含水量、叶绿素 a 含量、总叶绿素含量有所提高,丙二醛含量、POD、SOD 活性以及  $\text{O}_2^-$  积累含量则减小。说明外源喷施 SLs 可以有效减轻盐胁迫下的玉米幼苗的生长发育上的伤害,当外源喷施 SLs 浓度为  $5\mu\text{mol/L}$  时,对在盐胁迫下的玉米幼苗的缓解效应达到最佳。

总之,通过对在盐胁迫条件下对玉米幼苗外源喷施 SLs,能够显著缓解盐胁迫对玉米幼苗的抑制作用,这一结论为在盐碱地培育优质粮食作物玉米提供了理论依据。

#### 参 考 文 献:

[1] 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):2 030-2 044.

[2] 樊怀福,郭世荣,焦彦生,等. 外源一氧化氮对 NaCl 胁迫下黄瓜幼苗生长、活性氧代谢和光合特性的影响[J]. 生态学报,2007(2):546-553.

[3] 杨秀玲,郁继华,李雅佳,等. NaCl 胁迫对黄瓜种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 甘肃农业大学学报,2004(01):6-9+17.

[4] 费伟,陈火英,曹忠,等. 盐胁迫对番茄幼苗生理特性的影响[J]. 上海交通大学学报(农业科学版),2005(1):5-9+30.

[5] 孙小芳,郑青松,刘友良. NaCl 胁迫对棉花种子萌发和幼苗生长的伤害[J]. 植物资源与环境学报,2000(3):22-25.

[6] 齐琪,马书荣,徐维东. 盐胁迫对植物生长的影响及耐盐生理机制研究进展[J]. 分子植物育种,2020,18(8):2 741-2 746.

[7] 岩学斌,袁金海. 盐胁迫对植物生长的影响[J]. 安徽农业科学,2019,47(4):30-33.

[8] 谷俊,耿贵,李冬雪,等. 盐胁迫对植物各营养器官形态结构影响的研究进展[J]. 中国农学通报,2017,33(24):62-67.

[9] 曹艺颖,陈虞超,郭生虎,等. 独角金内酯研究进展及其在药用植物的应用展望[J/OL]. 中国中药杂志,2023(5):1-10.

[10] 郑晨. 新型植物生长调节剂独角金内酯生物学功能及应用[J]. 湖北农业科学,2020,59(2):9-13.

[11] 杜娟,黄晓宇,孙伊南,等. 独角金内酯调控植物根系发育的分子机制研究的进展[J]. 中国细胞生物学学报,2022,44(7):1 377-1 385.

[12] 贾竣淇. 外源独角金内酯及其抑制剂对苹果根系生长发育和养分吸收的影响[D]. 泰安:山东农业大学,2022.

[13] 刘颖. 微根窗技术在独角金内酯增加青海草地早熟禾根系深度研究中的应用[J]. 青海畜牧兽医杂志,2022,52(5):39-42.

[14] 史盼盼,杨磊,周善民,等. 独角金内酯通过 PLT 途径调控拟南芥根尖干细胞生长[J/OL]. 植物生理学报,2023(5):1-12.

[15] 刘淑兰,李进,马永慧,等. 独角金内酯对干旱胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生理变化的影响[J]. 草地学报,2023,31(1):130-139.

[16] 朱思雅,段建维,许彬,等. 独角金内酯对盐胁迫下月季植株生长的影响[J]. 现代园艺,2022,45(1):13-15+20.

[17] 万林,李张开,李素,等. 外源独角金内酯对油菜苗期干旱胁迫的缓解效应[J]. 中国油料作物学报,2020,42(3):461-471.

[18] 王言景,张鹏,郑东方,等. 外源独角金内酯对两种小麦苗期抗旱性的影响[J]. 河南农业,2022(28):48-49.

[19] 唐超男. 外源独角金内酯调控辣椒幼苗低温耐受性的生理与分子机制[D]. 兰州:甘肃农业大学,2021.

[20] 张小花. 外源独角金内酯对黄瓜盐胁迫耐受性的影响[D]. 兰州:西北师范大学,2021.

[21] 魏改红. 浅谈玉米在农业结构调整中的地位、现状与发展[J]. 河南农业,2022(20):62-64.

[22] 王芳,周娟,黄兴华,等. 外源 MeJA 对盐胁迫下玉米幼苗生长及抗氧化酶基因表达的影响[J]. 玉米科学,2022,30(2):75-81.

[23] 洪林,杨蕾,杨海健,等. 独角金内酯调控植物非生物胁迫响应的研究进展[J]. 植物生理学报,2020,56(6):1 097-1 108.

[24] 刘新,刘洪庆. 植物生理学实验[M]. 北京:高等教育出版社,2019.