

外源硫化氢对加工番茄种子耐盐性及抗氧化酶的影响

郑州元^{1,2}, 林海荣¹, 崔辉梅^{1,2}

(1. 石河子大学农学院, 新疆 石河子 832003; 2. 特色果蔬栽培生理与种质资源利用兵团重点实验室, 新疆 石河子 832003)

摘要: 为明确硫化氢对盐胁迫下加工番茄种子萌发的缓解作用, 用 NaCl 半致死浓度为 $85 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KT-63(耐盐性弱)和半致死浓度为 $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 KT-18(耐盐性强)为材料, 用各自的半致死浓度与不同浓度的 NaHS($0.2, 0.4, 0.6, 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 分别配成混合液处理种子。结果表明, 随着 NaHS 浓度的增加, 种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、SOD、POD、CAT 活性呈先上升后下降的趋势, 其中与盐胁迫单独处理相比, 用 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHS 处理, 种子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、SOD、POD、CAT 活性在 KT-63 中分别提升 70%、250%、120%、130%、6.7%、150% 和 180%, 在 KT-18 中分别提升 50%、250%、60%、80%、4.3%、160% 和 200%, 而 MDA 的含量显著降低, 并且对 KT-63 的缓解效应强于 KT-18。综上所述, H_2S ($0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 有效缓解了加工番茄萌发过程中盐胁迫的抑制作用, 促进了种子的萌发。

关键词: 硫化氢; 盐胁迫; 加工番茄; 种子萌发; 抗氧化酶

中图分类号: S641.2; S603.4 **文献标志码:** A

Effects of exogenous hydrogen sulfide on salt tolerance and antioxidant enzymes of processing tomato seeds

ZHENG Zhou-yuan^{1,2}, LIN Hai-rong¹, CUI Hui-mei^{1,2}

(1. College of Agriculture, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832003, China;

2. Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Special Fruits and Vegetables Cultivation Physiology and Germplasm Resources Utilization, Shihezi, Xinjiang 832003, China)

Abstract: The effects of exogenous hydrogen sulfide on the seed germination of processing tomato under salt stress were investigated. Seeds of two processing tomato cultivars KT-63(salt resistance is weak) and KT-18(stronger salt tolerance) were treatment with semi-lethal concentration of NaCl($85 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, $120 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) and NaHS($0.2, 0.4, 0.6, 1.0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) mixture, respectively. The results showed that: With increasing NaHS level, the germination rate, germination energy, germination index, vigor index, SOD, POD and CAT activities first increased and then decreased. Compared with salt stress, treatments with $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHS significantly increased seed germination rate, germination index, vigor index and the activities of SOD, POD and CAT in KT-63(70%, 250%, 120%, 130%, 6.7%, 150% and 180%, respectively) and KT-18(50%, 250%, 60%, 80%, 4.3%, 160% and 200%, respectively), and the content of MDA was decreased. The mitigation effect of hydrogen sulfide on KT-63 is stronger than KT-18. Results provide evidence that $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ of H_2S may alleviate damage to seeds caused by salt stress, expedition of seed germination.

Keywords: hydrogen sulfide; salt stress; processing tomato; seed germination; antioxidantase

土壤盐渍化和次生盐渍化对农业的威胁已成为一个全球性问题, 土壤中过高的盐分会引起植物生理干旱, 植物感受刺激后通过 Na^+ 受体作用激活 Ca^{2+} 通道以及活性氧, 如过氧化氢 (H_2O_2) 和羟自由

基 ($\text{HO}\cdot$) 在细胞中的积累, 影响植物正常营养吸收, 阻碍植物正常生长发育, 引起植株氧化胁迫, 质膜受损, 最终引起对植物的伤害甚至死亡^[1-2]。在中国绝大部分加工番茄种植在西北地区盐渍土壤中^[3],

而新疆又是我国最大的加工番茄种植和加工基地。新疆地处内陆干旱地区,降水稀少蒸发量大,地表积盐较重,最容易引起土壤盐渍化^[4]。加工番茄是中度耐盐植物,土壤盐渍化严重影响加工番茄种子萌发率、幼苗和根系的生长发育以及果实的产量和品质。因此,研究与加工番茄抗盐性及其调控相关的抗氧化酶活性,对指导加工番茄生产中的抗盐性具有实际意义。

近年来的研究发现 H_2S 是继 NO 、 CO 之后的第三种内源气体信号分子,参与多种植物的生理过程^[5]。已有的结果表明,外源 H_2S 能促进小麦种子在正常情况和 PEG , Cu^{2+} , Cr , Al^{3+} 胁迫下的萌发^[6-10],同时外源 H_2S 能促进盐胁迫下紫花苜蓿种子的萌发^[11],以及根的发生^[12],气孔的运动^[13]。然而,因为气候、地域影响,有关 H_2S 对盐胁迫下新疆加工番茄种子萌发影响以及种子萌发过程中相关抗氧化酶活性及膜质过氧化方面的研究并不清楚。本试验以新疆两种加工番茄为材料,研究外源 H_2S 处理对 $NaCl$ 胁迫下加工番茄种子萌发和相关抗氧化酶(SOD, POD, CAT)活性及丙二醛含量的影响,揭示外源 H_2S 调控 $NaCl$ 胁迫下加工番茄种子萌发特性及抗氧化酶活性机制,以期为提高加工番茄耐盐性及揭示其耐盐性机理提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试番茄材料为:KT-63, KT-18 两个自交品系,由石河子大学农学院实验室提供;外源硫化氢供体为 $NaHS$,购自 sigma 公司(中国)。种子实验在恒温培养箱内进行,实验于 2015 年 8 月在石河子大学农学院生理实验室进行。

1.2 试验设计

挑选大小一致且饱满的加工番茄种子用 $37^{\circ}C \sim 40^{\circ}C$ 的温水浸种 3 h,之后用 10% 的高锰酸钾溶液浸种 10 min,用蒸馏水冲洗 3 次。用前期预实验筛选的 $NaCl$ 半致死浓度为 $85 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 耐盐性弱的 KT-63 和半致死浓度为 $120 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 耐盐性强的 KT-18 用于实验,用各自的半致死浓度 $NaCl$ 和不同浓度 $NaHS$ 配成混合溶液,试验处理分别为蒸馏水处理(CK1), $85 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ 处理(CK2), $0.2 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 85 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (T1), $0.4 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 85 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (T2), $0.6 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 85 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (T3), $1.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 85 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (T4);蒸馏水处理(CKn), $120 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ 处理(CKp), $0.2 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 120 \text{ mmol} \cdot$

$L^{-1} NaCl$ (M1), $0.4 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 120 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (M2), $0.6 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 120 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (M3), $1.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + 120 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaCl$ (M4) 处理。每个处理 3 个重复,每个重复挑选 30 粒种子置于铺有 10 层滤纸含有不同处理液的培养皿中,6 天换一次滤纸。将培养皿置于 $25^{\circ}C$, 16 h/8 h 光暗交替的恒温培养箱中培养 12 d,每天观察种子的萌发情况并记录发芽数,以胚根长度达到种子自身长度一半为发芽标准。

1.3 测试指标及方法

采用常规方法测定发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数,具体参见孟红梅等^[14]的方法。用直尺测定胚轴和胚根长,用称重法测定 10 棵幼苗鲜重。用高俊凤^[15]的硫代巴比妥酸(TBA)比色法测定丙二醛(MDA)含量;用氮蓝四唑(NBT)还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性,以抑制光化还原 50% 为 1 个酶活性单位;用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性;参照 Chance 和 Maehly^[16]的方法测定过氧化氢酶(CAT)活性。

1.4 数据统计分析

数据均取 3 次重复的平均值,采用 Microsoft Excel 处理数据,用 SPSS 19.0 软件对数据进行单因素方差分析,并运用 Duncan's 检验法对显著性差异($P < 0.05$)进行多重比较,结果以平均值 $\pm$ 标准误差(means $\pm$ SD)表示,用 Microsoft Excel 作图。

2 结果与分析

2.1 外源 H_2S 对 $NaCl$ 胁迫下加工番茄种子发芽的影响

不同浓度的 $NaHS$ 处理对 $NaCl$ 胁迫下两种番茄种子的萌发有一定的影响。随着 $NaHS$ 浓度的增加,两种加工番茄品系的发芽相关指标呈现先上升后下降的趋势(表 1)。用 $0.2 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS + NaCl$ 处理较 $NaCl$ 单独处理两个品系发芽率显著增加,在 $0.4 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时达到与空白对照相近的水平,都表现为差异不显著,并且两个品系都在 $0.4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数在胁迫条件下达到最高,在 KT-63 中, $NaHS$ 浓度为 $0.4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数较 CK2 分别提升 0.7 倍、2.5 倍、1.2 倍和 1.3 倍,差异显著。在 KT-18 中, $NaHS$ 浓度为 $0.4 \text{ mmol} \cdot L^{-1}$ 时发芽率、发芽势、发芽指数和活力指数较 CKp 分别提升 0.48 倍、2.5 倍、0.6 倍和 0.8 倍,其中发芽率、发芽指数和活力指数都达到显著水平。结果表明 $0.4 \sim 1.0 \text{ mmol} \cdot L^{-1} NaHS$ 都能缓解 $NaCl$ 胁迫

对番茄种子萌发的抑制作用,其中以 0.4 mmol·L⁻¹效果最好,同时对发芽指标的缓解效果看,0.4 mmol·L⁻¹的 NaHS 对耐盐性弱的 KT-63 缓解效应更强。

2.2 外源 H₂S 处理对 NaCl 胁迫下发芽加工番茄种子生长的影响

由图 1 可以看到 NaCl 胁迫显著降低了 KT-63 和 KT-18 的胚轴长,在添加不同浓度的 NaHS 处理之后,随着 NaHS 浓度增加胚轴长度都呈现由上升到下降的趋势。在 KT-63 中,T2-T4 条件下较 CK2 相比胚轴长度都达到了显著水平,其中 NaHS

浓度为 0.4 mmol·L⁻¹胚轴最长,较 CK2 相比提升了 12.2%。在 KT-18 中,M1-M3 比起 CKp 胚轴长度显著增加,在 NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时达到最大,较 CKp 增加了 6.0%,其中 M4 比 CKp 显著降低。说明低浓度的 NaHS 能促进盐胁迫下加工番茄萌发期幼苗胚轴的伸长,在耐盐性不同的两个品系中,NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时处理效果最好,对耐盐性强的 KT-18 而言,1.0 mmol·L⁻¹的浓度抑制了胚轴伸长。

表 1 NaHS 对 NaCl 胁迫下加工番茄种子萌发的影响					
Table 1 Effect of exogenous NaHS on seed germination of processing tomato under NaCl stress					
品种 Varieties	处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination energy/%	发芽指数 Germination index	活力指数 Vigor index
KT-63	CK1	98.89 ± 1.11a	98.89 ± 1.11a	10.73 ± 0.34a	89.24 ± 2.52a
	CK2	54.44 ± 2.94c	15.56 ± 4.84c	2.20 ± 0.12c	16.70 ± 1.05e
	T1	90.00 ± 1.92b	46.67 ± 8.39b	4.49 ± 0.19b	30.65 ± 1.30d
	T2	96.67 ± 2.22ab	55.56 ± 1.11b	4.89 ± 0.13b	38.34 ± 0.86b
	T3	94.45 ± 1.93ab	46.67 ± 1.93b	4.65 ± 0.21b	36.69 ± 3.06bc
	T4	93.33 ± 1.93ab	46.67 ± 3.33b	4.61 ± 0.18b	32.30 ± 1.17cd
KT-18	CKn	74.44 ± 2.94a	73.33 ± 3.33a	7.80 ± 0.36a	64.23 ± 1.63a
	CKp	45.55 ± 4.01c	2.22 ± 1.11b	1.56 ± 0.15c	9.34 ± 1.11c
	M1	60.00 ± 3.85b	6.66 ± 3.33b	2.19 ± 0.24bc	14.68 ± 1.31b
	M2	67.78 ± 1.11ab	7.78 ± 2.94b	2.50 ± 0.06b	16.77 ± 0.74b
	M3	63.33 ± 1.93ab	7.78 ± 1.11b	2.38 ± 0.08b	16.01 ± 0.75b
	M4	62.22 ± 6.19ab	5.56 ± 2.94b	2.11 ± 0.21bc	13.57 ± 1.67b

注:同列不同字母表示同一品种不同处理间差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different letters in the same column mean significant differences among treatments at 0.05 level. The same as below.

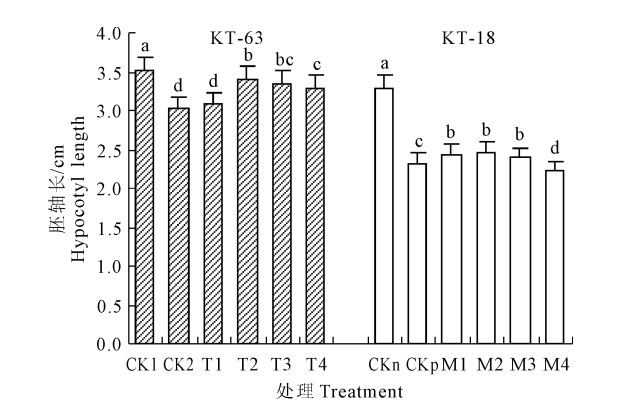


图 1 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗胚轴长的影响
Fig.1 Effect of exogenous NaHS on hypocotyl length of tomato seedlings under NaCl stress

不同浓度的 NaHS 处理对 NaCl 胁迫下加工番茄的胚根长有一定影响。图 2 表明,与空白对照相比,NaCl 胁迫使两种番茄胚根长都显著降低。随着 NaHS 处理浓度的增加总体上胚根长呈现先升后降

的趋势,在 KT-63 中,T1-T3 较 CK2 处理有明显的促进作用,当浓度为 1.0 mmol·L⁻¹时迅速下降。在 KT-18 中,NaHS 处理也促进了盐胁迫下胚根的伸长,但没有达到显著水平,在 M3-M4 时缓慢下降。当 NaHS 浓度为 1.0 mmol·L⁻¹时较 0.6 mmol·L⁻¹时胚根长在 KT-63 和 KT-18 中分别下降 11.4%和 3.0%。这个结果说明低浓度的 NaHS 可以促进盐胁迫下加工番茄萌发期胚根的伸长,缓解盐胁迫对胚根伸长的抑制作用,当浓度为 1.0 mmol·L⁻¹时,缓解效应下降,对于耐盐性强的 KT-18,NaHS 的效应随浓度的变化较缓慢。

图 3 表明,T2-T3 和 M1-M3 处理与盐胁迫单独处理相比,分别显著增加了 KT-63 和 KT-18 在盐胁迫下的侧根数目,但在 T4 和 M4 时侧根数目又迅速减少了,KT-63 和 KT-18 两品系侧根数目都在 NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时达到了最多。说明 NaHS 可以促进盐胁迫下侧根的形成,但高浓度的 NaHS 可能还会抑制侧根的形成。

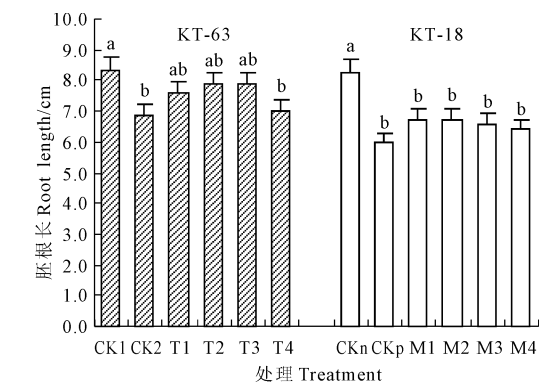


图 2 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗胚根长的影响
Fig.2 Effect of exogenous NaHS on root length of tomato seedlings under NaCl stress

图 4 表明,在 T2 - T4 和 M2 - M4 分别能显著增加 KT - 63 和 KT - 18 在盐胁迫下胚轴鲜重,并且 NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时两种在盐胁迫下的加工番茄胚轴鲜重达到最重,分别较 CK2 和 CKp 增加了 20.7% 和 23.5%。在 KT - 18 中,M4 胚轴鲜重与 CKp 相比有所下降。说明因耐盐性不同,NaHS 对两个品系胚轴鲜重的影响程度也不一样,对于 KT - 18 来说高浓度的 NaHS 没有缓解作用还加剧了胁迫。

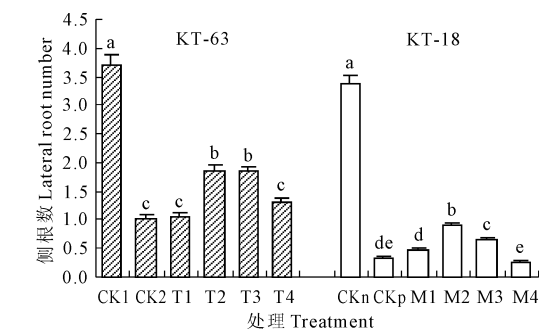


图 3 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗侧根数的影响
Fig.3 Effect of exogenous NaHS on lateral root number of tomato seedlings under NaCl stress

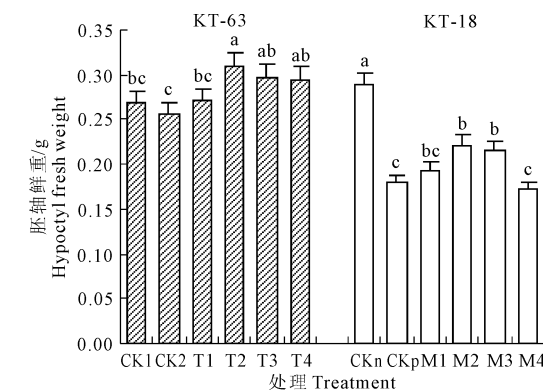


图 4 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗胚轴鲜重的影响
Fig.4 Effect of exogenous NaHS on hypocotyl fresh weight of tomato seedlings under NaCl stress

图 5 表示,T1 - T4 处理显著增加了 KT - 63 在盐胁迫下胚根的鲜重,但是在 KT - 18 中 NaHS 处理使盐胁迫下胚根鲜重有所增加却没有达到显著水平,两个加工番茄品系都是在 NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时对胚根鲜重的作用效果最好,分别比 CK2 和 CKp 增加了 40.9% 和 13.3%。以上结果表明,NaHS 缓解盐胁迫抑制胚轴鲜重增加的效应在耐盐性弱的品系中更加明显,表现为对盐敏感对缓解物质 NaHS 的作用效果也敏感。

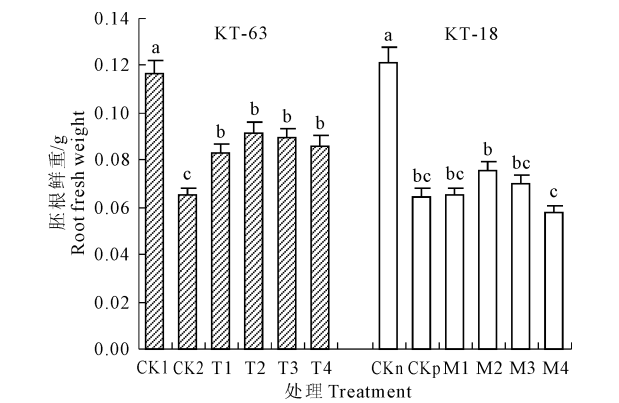


图 5 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗胚根鲜重的影响
Fig.5 Effect of exogenous NaHS on root fresh weight of tomato seedlings under NaCl stress

2.3 外源 H₂S 处理对 NaCl 胁迫下加工番茄种子发芽抗氧化酶活性的影响

图 6 表明,两个品系加工番茄种子在 NaCl 胁迫 (CK2, CKp) 下较空白对照 (CK1, CKn) 相比 SOD 活性显著下降。而外源 NaHS 处理有效缓解了 NaCl 对番茄种子发芽过程中 SOD 活性的降低,盐胁迫下随着 NaHS 处理浓度的增加,SOD 活性呈现先上升后下降的趋势。在盐胁迫下两个品系中 SOD 活性都在 NaHS 浓度为 0.4 mmol·L⁻¹时达到了最高,SOD 活性分别比 CK2 和 CKp 提高了 6.7% 和 4.3%。以上结果说明,在这两个品系中 0.4 mmol·L⁻¹的 NaHS 浓度为缓解 NaCl 胁迫下 SOD 活性降低的最适宜浓度,并且 NaHS 对耐盐性弱的 KT - 63 缓解效应表现的更强。

由图 7 可以看出,在两个番茄品系中盐胁迫显著降低了萌发过程中幼苗中 POD 的活性。加入外源 NaHS 后,随 NaHS 浓度的增加,POD 活性总体呈先升后降的趋势。在 KT - 63 中,T2 与 CK2 相比 POD 活性显著增加,活性提升了 1.5 倍,而 T4 时 POD 活性比 CK2 还要低。在 KT - 18 中,从 M1 - M4,与 CKp 相比 POD 活性都显著增加,并且在 M2 时达到最高,比 CKp 增加 1.6 倍。以上结果表明,

NaHS 对幼苗 NaCl 胁迫下 POD 活性的影响效果与浓度和品系有关,耐盐性弱的 KT-63 对不同浓度的 NaHS 也较为敏感,高浓度的 NaHS 还会进一步降低 POD 的活性,而对于耐盐性较强的 KT-18,POD 活性随 NaHS 浓度增加变化相对较为缓和,但这两个品系中最佳 NaHS 作用浓度都是 $0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

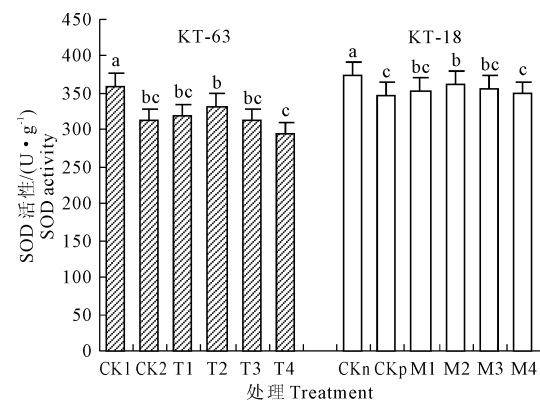


图 6 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗 SOD 活性影响

Fig.6 Effect of exogenous NaHS on SOD activity of tomato seedlings under NaCl stress

如图 8 所示,在各处理中,CAT 活性表现出与 POD 相似的变化趋势。在 KT-63 中,T1-T3 较 CK2 的 CAT 活性都显著增加,并且在 T2 和 T3 时 CAT 活性比 CK1 还要高,都达到显著水平,分别是 CK2 的 1.77 倍和 1.78 倍。在 KT-18 中,M2-M4 水平下 CAT 活性与 CKp 相比显著升高,并且在 M2 时 CAT 活性最高,是 CKp 的 2 倍。结果表明,在加入 NaHS 后,对 CAT 活性影响效应在两个品系中不完全一样,在 KT-63 中 NaHS 处理后较空白对照相比 CAT 活性显著提升,但在 KT-18 中没有这样明显的效应。说明 NaHS 效应在这两个抗盐性不同品系间有差异,表现为盐胁迫下 KT-63 对 NaHS 的作用效果更敏感。

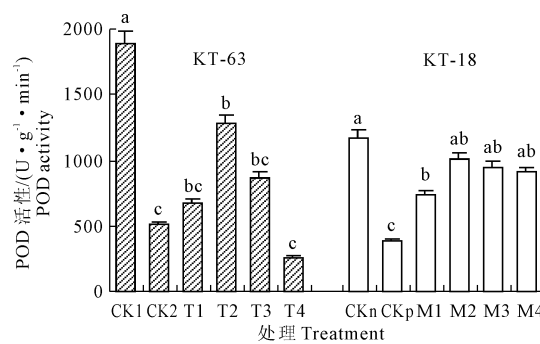


图 7 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗 POD 活性影响

Fig.7 Effect of exogenous NaHS on POD activity of tomato seedlings under NaCl stress

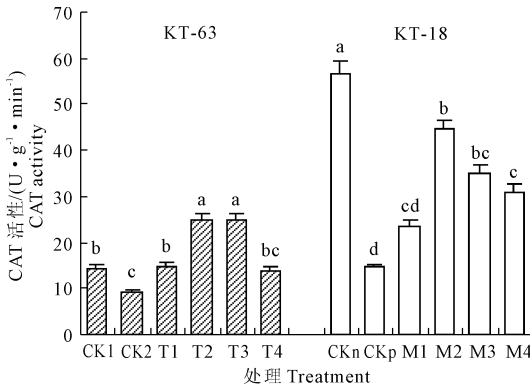


图 8 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗 CAT 活性影响

Fig.8 Effect of exogenous NaHS on CAT activity of tomato seedlings under NaCl stress

2.4 外源 H₂S 处理对 NaCl 胁迫下加工番茄种子发芽丙二醛含量的影响

由图 9 可知,CK2 与 CK1 相比,CKp 与 CKn 相比丙二醛(MDA)含量均显著升高。添加 NaHS 后,随着 NaHS 浓度的升高 MDA 含量在两个番茄品系中都表现先降低后升高的趋势。在 KT-63 中,从 T1-T4 的 MDA 含量都显著比 CK2 低,并且在 T3 降到最低。在 KT-18 中,NaHS 处理组中 MDA 含量较 CKp 也显著降低,在 M2 降到了最低。这说明用 NaHS 处理盐胁迫下加工番茄可以缓解萌发期由盐胁迫所引起的 MDA 的积累。在不同浓度 NaHS 处理中, $0.6\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $0.4\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHS 可以使盐胁迫下 KT-63 和 KT-18 中 MDA 含量分别降到最低,比 CK2 和 CKp 分别下降 36.0%和 26.0%。说明 NaHS 可以显著缓解萌发期两种耐盐性不同番茄幼苗的膜脂过氧化程度。

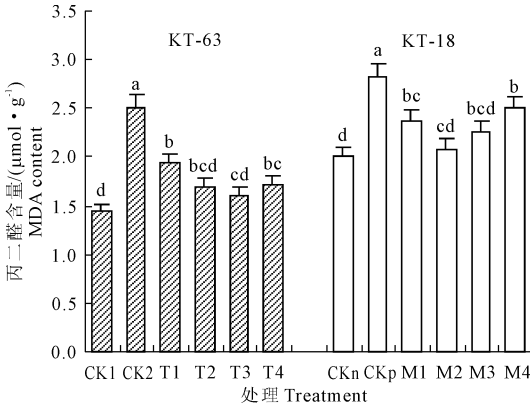


图 9 NaHS 对 NaCl 胁迫下番茄幼苗 MDA 含量影响

Fig.9 Effect of exogenous NaHS on MDA content of tomato seedlings under NaCl stress

3 讨论与结论

种子萌发是植物生长发育的重要阶段,但是近

年来的研究表明盐胁迫对种子的萌发具有显著的抑制作用。由于高浓度的盐胁迫使水势降低,造成种子吸水困难,同时还会破坏细胞质膜的完整性,进而影响芽和根的伸长。在植物生育期中,种子萌发期是对盐胁迫较为敏感的时期,利用外源物质提高种子萌发期的抗盐性是很重要的方法。

外源物质 H_2S 被报道参与植物的生长发育以及胁迫耐性的获得^[17]。NaHS 处理能改善幼苗的生长状况,可以提高能源植物小桐子种子的发芽率和发芽势^[18]。本实验中 H_2S 供体 NaHS 可以提高盐胁迫下两种耐盐性不同加工番茄种子发芽指标,说明 H_2S 能缓解盐胁迫对加工番茄种子萌发的抑制,这个结果与 Wang 等^[11] H_2S 可以缓解盐胁迫对紫花苜蓿种子萌发的抑制相一致。NaHS 处理对盐胁迫下萌发期幼苗胚轴的影响,说明 NaHS 能促进盐胁迫下加工番茄萌发期幼苗胚轴和胚根的伸长,胚轴和胚根鲜重的增加,还能促进侧根的形成,这个结果与 Li 等^[19] 的一致。不同浓度的 NaHS 处理对 NaCl 胁迫下加工番茄种子发芽和生长的影响说明低浓度的 NaHS 能促进盐胁迫下加工番茄种子的萌发,而高浓度的 NaHS 对胁迫的缓解作用降低,甚至加重胁迫作用,这种表现在耐盐性弱的 KT-63 中更为明显。这可能与高浓度的 NaHS 产生的渗透胁迫有关,同时对于环境变化感受较为明显的品系来说,是不是因为品系间基因型存在差异进而对环境的感受也存在差异,有待进一步研究。

SOD, POD, CAT 在清除超氧自由基、过氧化物、过氧化氢等方面具有重要作用^[20]。在本实验中 NaHS 处理使盐胁迫下 SOD, POD, CAT 活性在两种番茄中都有所增加,这个结果与何庆元^[21] 在大豆中的结论相似。在正常环境下植物体内活性氧的产生与清除是处于动态平衡的,当植物遭受逆境胁迫时,这种动态平衡就会被打破,使 SOD、POD、CAT 活性发生变化^[22]。本实验中耐盐性弱的 KT-63 对 NaHS 的作用效果也相对敏感,而耐盐性强的 KT-18 对 NaHS 浓度的变化表现迟钝。说明 NaHS 对番茄萌发过程中盐胁迫产生的氧化损伤具有一定的缓解效应,番茄幼苗盐胁迫的缓解作用可能与品系有关,同时这三种抗氧化酶在耐盐性不同的两个品系中的升降幅度不同,可能是 NaHS 对不同品系的作用效应或在这三种酶活性的调节存在差异,这有待于进一步研究。

MDA 含量是衡量膜质过氧化的一个重要指标,其含量的多少与植物遭受的氧化胁迫成正比^[23]。本实验中盐胁迫显著增加了两种加工番茄萌发过程

MDA 的含量,这个结果与刘文瑜等^[24] 的研究结果一致。用不同浓度的 NaHS 处理后 MDA 含量发生不同程度的降低。说明 NaHS 能降低番茄种子在盐胁迫下萌发过程中 MDA 的积累,能够通过缓解质膜受损程度来促进幼苗的生长,但是在两品系中 MDA 含量最低时的 NaHS 浓度不同,可能是不同浓度 NaHS 处理对 MDA 含量的调节在品系间存在差异。

综上,本文中 H_2S 对盐胁迫下两个耐盐性不同加工番茄品系种子耐盐性及抗氧化酶影响的研究表明,外源 NaHS 能不同程度增加两种加工番茄品系的发芽相关指标,当 NaHS 浓度为 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时种子发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、胚轴长、胚根长、侧根数、胚轴鲜重、根鲜重在盐胁迫下都达到了最大。同样的,低浓度的 NaHS 增强了种子萌发过程中的抗氧化酶活性,其中 NaHS 浓度为 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时 SOD、POD、CAT 活性在盐胁迫下最强。种子在盐胁迫萌发过程中 MDA 含量在 KT-63 和 KT-18 中分别在 NaHS 浓度为 $0.6 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $0.4 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时降到了最低。整体表现为低浓度的 NaHS 缓解了盐胁迫下加工番茄种子的萌发,增强了抗氧化酶的活性,降低了丙二醛含量的积累,并且 NaHS 对耐盐性弱的 KT-63 缓解效应表现得更强。

参 考 文 献:

- [1] Deinlein U, Stephan A B, Horie T, et al. Plant salt-tolerance mechanisms[J]. Trends in plant Science, 2014, 19(6): 371-379.
- [2] 王 聪, 朱月林, 杨立飞, 等. NaCl 胁迫对菜用大豆种子膨大过程中抗氧化系统及渗透调节物质的影响[J]. 西北植物学报, 2012, 32(2): 297-305.
- [3] Mao R, Fitzpatrick R, Liu X, et al. Chemical properties of selected soils from the North China Plain[C]//Mevicar T R, Li R, Walker J, et al. Regional water and soil assessment for managing sustainable agriculture in China and Australia. Canberra: Australian Centre for International Agricultural Research, 2002.
- [4] 曾幼玲, 蔡忠贞, 马 纪, 等. 盐分和水分胁迫对两种盐生植物盐爪爪和盐穗木种子萌发的影响[J]. 生态学杂志, 2006, 25(9): 1014-1018.
- [5] WANG R. Physiological implications of hydrogen sulfide: a whiff exploration that blossomed[J]. Physiol Rev, 2012, 92(2): 791-896.
- [6] Zhang H, Hu L Y, Hu K D, et al. Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination and alleviates oxidative damage against copper stress [J]. Integr Plant Biol, 2008, 50(12): 1518-1529.
- [7] Zhang H, Hu LY, Li P, et al. Hydrogen sulfide alleviated chromium toxicity in wheat[J]. Biol Plant, 2010, 54(4): 743-747.
- [8] Zhang H, Jiao H, Jiang C X, et al. Hydrogen sulfide protects soybean seedlings against drought-induced oxidative stress[J]. Acta Physiol Plant, 2010, 32(5): 849-857.

22.5 mm 的灌水定额;从增产的角度出发,建议采用 30.0 mm 的灌水定额;灌水周期均为 5~7 d。

参 考 文 献:

[1] 山 仑,邓西平,康绍忠.我国半干旱地区农业用水现状及发展方向[J].水利学报,2002,33(9):0027-0031.

[2] 孙洪仁,刘国荣,张英俊,等.紫花苜蓿的需水量、耗水量、需水强度、耗水强度和水分利用效率研究[J].草业科学,2005,22(12):24-30.

[3] 曹雪松,李和平,郑和祥,等.地埋滴灌紫花苜蓿灌水均匀性研究[J].灌溉排水学报,2015,34(4):72-74.

[4] 康绍忠,蔡焕杰,冯绍元.现代农业与生态节水的技术创新与未来研究重点[J].农业工程学报,2004,20(1):1-6.

[5] 李道西,罗金耀.地下滴灌技术的研究及其进展[J].中国农村水利水电,2003,(7):15-18.

[6] 胡笑涛,康绍忠,马孝义.地下滴灌灌水均匀度研究现状及展望[J].干旱地区农业研究,2000,18(2):113-117.

[7] 程先军,许 迪,张 昊.地下滴灌技术发展及应用现状综述[J].节水灌溉,1999,(4):13-15.

[8] 张国祥.地下滴灌(渗灌)的技术状况与建议[J].地下水,1996,18(2):51-54.

[9] 黄兴法,李光永.地下滴灌技术的研究现状与发展[J].农业工程学报,2002,18(2):176-181.

[10] Hutmacher RB, Phene CJ, Mead RM, et al. Subsurface Drip and Furrow Irrigation Comparison with Alfalfa in the Imperial Valley [C.]//California Alfalfa & Forage Symposium. Modesto: Proc, 2001.

[11] Godoy AC, Pérez GA, Torres ECA, et al. Water use, forage production and water relations in alfalfa with subsurface drip irrigation[J]. Agrobiencia, 2003,37(2):107-115.

[12] Alam M, Troien TP, Dumlér TJ, et al. Using subsurface drip irrigation for alfalfa[J]. J. Am. Water Resour. Assoc, 2002,38(6):1715-1721.

[13] 徐胜利.以紫花苜蓿为典型的牧草节水灌溉制度研究[J].节水灌溉,2007,(8):67-70.

[14] 夏玉慧,汪有科,王 江,等.陕北风沙滩地区紫花苜蓿地下滴灌带埋设深度初步研究[J].水土保持通报,2008,28(4):100-104.

[15] 佟长福,李和平,白巴特尔,等.锡林河流域紫花苜蓿需水规律与灌溉定额优化研究[J].中国农学通报,2014,30(29):188-191.

[16] 寇 丹,苏德荣,吴 迪,等.地下调亏滴灌对紫花苜蓿耗水、产量和品质的影响[J].农业工程学报,2014,30(2):116-123.

(上接第 241 页)

[9] Zhang H, Tan Z Q, Hu L Y, et al. Hydrogen sulfide alleviates aluminum toxicity in germinating wheat seedlings[J]. Integr Plant Biol, 2010,52(6):556-567.

[10] Zhang H, Wang M F, Hua L Y, et al. Hydrogen sulfide promotes wheat seed germination under osmotic stress[J]. Russ J Plant Physiol, 2010,57(4):532-539.

[11] Wang Y Q, Li L, Cui W T, et al. Hydrogen sulfide enhances alfalfa (Medicago sativa) tolerance against salinity during seed germination by nitric oxide pathway[J]. Plant Soil, 2012,351(1-2):107-119.

[12] Zhang H, Tang J, Liu X P, et al. Hydrogen sulfide promotes root organogenesis in Ipomoea batatas, Salix matsudana and Glycine max [J]. Integr Plant Biol, 2009,51(12):1084-1092.

[13] 王兰香,侯智慧,侯丽霞,等.H₂O₂介导的 H₂S 产生参与干旱诱导的拟南芥气孔关闭[J].植物学报,2012,47(3):217-225.

[14] 孟红梅,韩多红,李彩霞,等.NaCl 胁迫对板蓝根种子萌发的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(1):213-216.

[15] 高俊凤.植物生理学实验指导[M].北京:高等教育出版社,2006.

[16] Chance B, Maehly A C. Assay of catalase and peroxidase[J]. Methods in Enzymology,1995,764(2):775.

[17] Lisjak M, Teklic T, Wilson I D, et al. Hydrogen sulfide: Environ-

mental factor or signaling molecule[J]. Plant cell Environ, 2013,36(9):1607-1616.

[18] Li Z G, Gong M, Liu P. Hydrogen sulfide is a mediator in H₂O₂-induced seed germination in Jatropha curcas[J]. Acta Physiol Plant, 2012,34(6):2207-2213.

[19] Li Y J, Chen J, Xian M, et al. In Site Bioimaging of Hydrogen Sulfide Uncovers Its Pivotal Role in Regulating Nitric Oxide - Induced Lateral Root Formation[J]. PLoS ONE, 2014,9(2): e90340. doi: 10.1371/journal.pone.0090340.

[20] Bowler C, Van M, Inzc D. Superoxide dismutase and stress tolerance [J]. Annual Review plant Physiology and Plant Molecular Biology, 1992,(43):83-116.

[21] 何庆元,向仕华,吴 萍,等.硫化氢对盐胁迫条件下大豆抗氧化酶活性的影响[J].大豆科学,2015,34(3):427-431.

[22] 赵可夫,卢元芳,张宝泽,等.Ca²⁺离子对小麦幼苗降低盐害效应的研究[J].植物学报,1993,35(1):51-56.

[23] 李合生.植物生理生化实验原理和技术[M].北京:高等教育出版社,2000:267-268.

[24] 刘文瑜,杨宏伟,魏小红,等.外源 NO 调控盐胁迫下蒺藜苜蓿种子萌发生理特性及抗氧化酶的研究[J].草业学报,2015,24(2):85-95.