

盐碱复合胁迫对湖南稷子种子萌发的影响

谢小伟,杨天宇,贾晓辉,顾旭东,张朝晖,王彬*

(宁夏大学农学院,宁夏 银川 750021)

摘要:【目的】研究盐碱复合胁迫对湖南稷子种子萌发和幼苗生长的影响。【方法】模拟盐碱地自然状态下盐分组成特点,以2种中性盐(NaCl 、 Na_2SO_4)和2种碱性盐(NaHCO_3 、 Na_2CO_3)分别按1:1:0:0(A)、1:2:1:0(B)、1:9:9:1(C)、1:1:1:1(D)、9:1:1:9(E)的比例混合,以湖南稷子为材料,去离子水为对照(CK),研究盐碱混合胁迫对其萌发指标及幼苗生长的影响。【结果】湖南稷子种子的萌发率随盐分浓度的升高而明显下降($P<0.05$);但是,当盐浓度为150 mmol/L时,湖南稷子种子在第5d的发芽率较对照(97.3%)分别降低了8.5%,16.4%,23.6%,随着盐的浓度增加到250 mmol/L,湖南稷子的萌发率明显降低($P<0.01$);湖南稷子的发芽势、发芽指数、活力指数、根长及苗高等指标变化趋势均与发芽率的相吻合。湖南稷子种子在中性和碱性复合胁迫下的萌发受到了较大的抑制,而在250 mmol/L的中性盐复配下,湖南稷子的所有发芽指数都为0。随着盐分的升高,叶片中 Na^+ 、脯氨酸、MDA的含量逐渐上升, K^+ 的含量则明显降低。【结论】随着盐胁迫浓度增加,对湖南稷子种子萌发的抑制作用越明显。本研究结果可为盐碱地湖南稷子的种植提供理论基础。

关键词:湖南稷子;盐碱复合胁迫;发芽率;发芽指数

中图分类号:S544 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2024)03-0144-09

DOI:10.13817/j.cnki.cyycp.2024.03.018



盐碱地作为一种在地球上普遍分布的重要土地资源,广泛分布在世界干旱地区^[1]。由于气候变化和人为因素的影响,全球每年因盐碱化而弃耕的土地面积达 $3\sim 15\times 10^6\text{ hm}^2$,且这一面积呈现逐年增加趋势^[2-3]。目前,我国盐碱地主要分布在华北、东北、西北等内陆干旱半干旱地区,宁夏银北灌区有近15万 hm^2 的盐碱地,约占总土地面积的三分之一,是一个重要的农业生产基地。盐碱土盐分含量高,其内部渗透压平衡被打破,不仅会使作物难以吸收水分,还会扰乱植物的离子平衡,引起养分缺乏,对作物的生长造成不良的影响^[4-5],进而降低作物产量。

盐渍化对作物的生长、发育及其他生理生态特性都有不同程度的影响,从低到高依次为盐胁迫、碱胁迫、盐碱胁迫。

盐化与碱化是制约作物生长发育的两大重要逆境因素,盐胁迫可导致植物体内水分大量流失、 Na^+ 富集、细胞膜结构不稳定、渗透压失衡等,从而导致作物生长发育受阻^[6]。而碱性条件下,pH值偏高,使养分在土壤中固化,造成养分失衡^[7]。有研究表明,盐胁迫导致种子在土中萌发延迟,而萌发期又是一个非常敏感的时期,也是影响种子生存的重要时期^[8-9]。因此,研究盐碱胁迫对种子发芽具有重要意义。

目前,关于盐碱胁迫对种子发芽的影响试验已有部分研究。例如,贾秀峰等^[10]研究发现,紫花苜蓿(*Medicago sativa*)的发芽率和发芽势随着苏打盐浓度的上升均呈明显下降趋势。王佳文等^[11]研究表明,黑麦草(*Lolium perenne*)种子的发芽率随着盐碱浓度的增加呈降低趋势,其中较低浓度(50 mmol/L)的盐碱胁迫对黑麦草种子萌发具有明显促进作用。杨迎月等^[12]通过研究不同浓度的中性盐(NaCl)和碱性盐(NaHCO_3)对紫花苜蓿、高羊茅(*Festuca arundinacea*)

收稿日期:2023-03-09;**修回日期:**2023-04-12

基金资助:国家重点研发计划(2021YFD1900605)

作者简介:谢小伟(1995-),男,陕西榆林人,硕士研究生。

E-mail:1224745178@qq.com

*通信作者。E-mail:wb_y2004@nxu.edu.cn

等 4 种牧草种子萌发特性的影响,发现牧草种子活力指数随 NaCl 和 NaHCO₃ 浓度的增大呈降低趋势。袁驰等^[13]用不同浓度 NaCl、Na₂SO₄ 处理的水稻种子进行耐盐试验,结果显示,随着盐分的升高,各种子萌发指数均有降低的趋势。湖南稷子 (*Echinochloa frumentacea*) 是一种适应性广、抗逆性强、产草量高的一年生禾本科牧草,是宁夏河套灌区低产、无产盐碱地生物法改良盐碱土壤的先锋草种^[14-15]。因此,研究盐碱胁迫下湖南稷子种子发芽的情况对盐碱地资源化利用和耐盐适生牧草的可持续发展具有重要意义。目前,关于湖南稷子萌发特性的相关研究相对较少。在我国大多数盐碱地上,盐化与碱化通常相生相伴。其协同作用可能比单独任一胁迫的影响对作物生长发育危害更大^[16]。因此,研究盐碱混合胁迫对湖南稷子种子萌发的影响,更贴近于该植物在盐碱地栽培的实际情况,为田间推广种植以及盐碱地土壤改良提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试湖南稷子品种为海子一号,试验材料来自宁夏回族自治区平罗县千叶青农业科技发展有限公司

湖南稷子试验地,选择质地、大小均匀的湖南稷子种子进行发芽试验。本实验中使用的药物 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 都是国药集团生产的分析纯。

1.2 试验设计

试验模拟盐碱地自然状态下盐分组成特点,2 种中性盐 (NaCl、Na₂SO₄) 与 2 种碱性盐 (NaHCO₃、Na₂CO₃) 为研究对象,分别按 1:1:0:0、1:2:1:0、1:9:9:1、1:1:1:1、9:1:1:9 的比例混合,并依次记为 A、B、C、D、E。每组盐碱混合比设置 100、150、200、250 mmol/L 4 个盐浓度梯度^[4],总共 20 种盐碱混合胁迫环境(表 1),以去离子水为对照(CK)。试验前,以 15% NaClO 灭菌湖南稷子种子 15 min,再用蒸馏水清洗 6 次,将种子然后将其均匀地置于铺有 2 层过滤纸的平板上,每处理 10 mL 胁迫溶液,每盘 50 颗种子,设 3 次重复。将平板放入恒温培养箱(30 ℃,光照 24 h,光强 5 000 lx)培养。

1.3 测定指标及方法

采用 pH 计测定各处理的酸碱度。从播种 24 h 起,对发芽率、发芽势和发芽指数进行统计,并以胚根显著破种为基准,每日记录发芽数。以 24 h 为单位,对湖南稷子的发芽数进行统计,并在第 10 天计算发芽

表 1 各处理盐碱组成及 pH

Table 1 Saline composition and pH of each treatment

处理	总盐浓度/(mmol·L ⁻¹)	盐分浓度/(mmol·L ⁻¹)				pH
		NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃	
CK	0	0.0	0.0	0.0	0.0	6.41
A	100	50.0	50.0	0.0	0.0	6.49
	150	75.0	75.0	0.0	0.0	6.59
	200	100.0	100.0	0.0	0.0	6.61
	250	125.0	125.0	0.0	0.0	7.02
B	100	25.0	50.0	25.0	0.0	8.17
	150	37.5	75.0	37.5	0.0	8.19
	200	50.0	100.0	50.0	0.0	8.22
	250	62.5	125.0	62.5	0.0	8.25
C	100	5.0	45.0	45.0	5.0	8.88
	150	7.5	67.5	67.5	7.5	8.90
	200	10.0	90.0	90.0	10.0	8.93
	250	12.5	112.5	112.5	12.5	9.04
D	100	25.0	25.0	25.0	25.0	9.74
	150	37.5	37.5	37.5	37.5	9.79
	200	50.0	50.0	50.0	50.0	9.87
	250	62.5	62.5	62.5	62.5	9.99
E	100	45.0	5.0	5.0	45.0	10.66
	150	67.5	7.5	7.5	67.5	10.70
	200	90.0	10.0	10.0	90.0	10.72
	250	112.5	12.5	12.5	112.5	10.74

率。每个培养皿随机选择 10 株,测量苗长(胚芽长 GL)和根长(胚根长 RL)。将未发芽的种子用蒸馏水冲洗 6 次,在蒸馏水中培养。

发芽率 $\%(GR)=(\text{第 } 10 \text{ d 种子发芽个数}/\text{供试种子总数})\times 100\%$

发芽势 $\%(GP)=(\text{培养第 } 4 \text{ d 种子的发芽个数}/\text{供试种子数})\times 100\%$

发芽指数 $^{[8]}(G_i)=\sum G_t/D_t$

式中: G_t 为发芽种子个数, D_t 为发芽的天数

活力指数 $(V_i)=\text{发芽指数}(G_i)\times \text{胚芽长}(GL)$

无机渗透调节物质:用去离子水将叶面冲洗干净,接着用吸水纸将叶面吸干,将新鲜原料按一定比例干燥,研磨,称重,置于马伏炉($500\text{ }^{\circ}\text{C}$)灰化。以浓硝酸来溶解灰分,用无离子水定容,用(日立 Z-8000 型)原子吸收分光光谱仪测定 Na^+ 、 K^+ 的浓度 $^{[17]}$ 。

渗透调节物质测定:脯氨酸(Pro)含量的测定采用茚三酮比色法 $^{[18]}$;丙二醛(MDA)含量的测定采用硫代巴比妥酸法 $^{[19]}$ 。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 对所得数据进行处理,采用 SPSS 26.0 对试验数据进行方差分析及 Duncan 多项比较,显著性水平为 0.05,采用 Canoco 5.5 软件对数据进行冗余分析(RDA),并用 Origin 2021 进行绘图。

2 结果与分析

2.1 盐碱混合胁迫对湖南稷子种子发芽率的影响

不同浓度盐碱混合胁迫对湖南稷子种子发芽率的影响曲线变化趋势相似,且随着碱性盐含量的增加,对湖南稷子种子发芽率的抑制作用越强(图 1-A~图 1-F)。当盐浓度为 100 mmol/L 时,A-E 处理湖南稷子在第 5 天的发芽率较 CK 无显著下降,发芽率均大于 93%。当盐浓度为 150 mmol/L 时,A-E 处理湖南稷子第 5 天的发芽率分别为 94.3%、95.3%、89.0%、81.3% 和 74.3%,随着碱性盐的加入,湖南稷子发芽率显著降低($P<0.05$);盐浓度在 100、150、200 和 250 mmol/L 时,处理 A 中湖南稷子第 5 天的发芽率分别为 97.0%、94.3%、94.3% 和 63.0%(图 1-A),随着盐溶液浓度的增加,湖南稷子发芽率显著降低($P<0.05$);而在与 2 种碱性盐(NaHCO_3 、 Na_2CO_3)混合胁迫(图 1-C、图 1-D 和图 1-E),在 150 mmol/L 的盐胁迫条件下,

湖南稷子种子在第 5 天的发芽率较对照(97.3%)分别降低了 8.5%、16.4%、23.6%,而当盐浓度增加到 250 mmol/L 时,发芽率明显降低($P<0.01$),其中 E 组湖南稷子种子发芽率为 0。

2.2 盐碱混合胁迫对湖南稷子种子发芽特性的影响

2.2.1 盐碱混合胁迫对发芽势的影响 湖南稷子在不同浓度的盐胁迫条件下发芽势的影响见图 2,在所有的处理中,除了 B 组 150 mmol/L 的胁迫下,湖南稷子的发芽势有所升高,其余处理均有显著的降低。当盐浓度为 100 mmol/L 时,A-E 各处理与 CK 相比,湖南稷子种子发芽势的降幅分别为 0.34%、5.15%、2.75%、2.06%、2.41%。当盐浓度为 150 mmol/L 时,A-E 各处理湖南稷子种子发芽势相较 CK,分别下降 4.12%、2.06%、10.31%、17.18%、26.12%。盐浓度为 200 mmol/L 时,A-E 各处理湖南稷子种子的发芽势较 CK 分别降低 8.93%、26.12%、52.92%、77.66%、89.69%。当盐碱液浓度增至 250 mmol/L 时,B-E 处理湖南稷子种子发芽势较 CK 降幅接近 100.00%,其中在 E 处理下,湖南稷子发芽势为 0。湖南稷子种子发芽势随混合盐浓度的增加及 NaCl 和 Na_2CO_3 在混合盐中比例的增加呈下降趋势。

2.2.2 盐碱混合胁迫对发芽指数和活力指数的影响 湖南稷子的发芽指数随着 A-E 的碱性盐浓度的升高而降低(图 3)。在所有处理中,随着溶液盐含量的增加,湖南稷子的发芽指数逐渐降低。当盐浓度为 100 mmol/L 时,所有处理的发芽指数明显低于对照。在 150 mmol/L 的盐浓度下,所有的胁迫处理较对照的降低幅度更大。胁迫溶液浓度为 200、 250 mmol/L 时,A-E 处理相较 CK,湖南稷子种子的发芽指数下降幅度为 35.06%~92.75%、60.95%~100.00%。

湖南稷子在 B-E 处理中,随盐浓度的增加,其种子活力指数呈下降趋势(图 3)。此外,湖南稷子种子的活力指数随着碱盐浓度的升高而降低(图 3)。在 100 mmol/L 盐胁迫下,所有处理的活力指数较对照分别下降了 38.79%、54.20%、65.92%、68.32%、71.22%。在 150 mmol/L 的盐胁迫下,所有处理的活力指数下降幅度明显高于对照。在 200 mmol/L 和 250 mmol/L 盐胁迫条件下,A-E 和 CK 的湖南稷子活力指数下降幅度分别为 84.14%~100.00%,

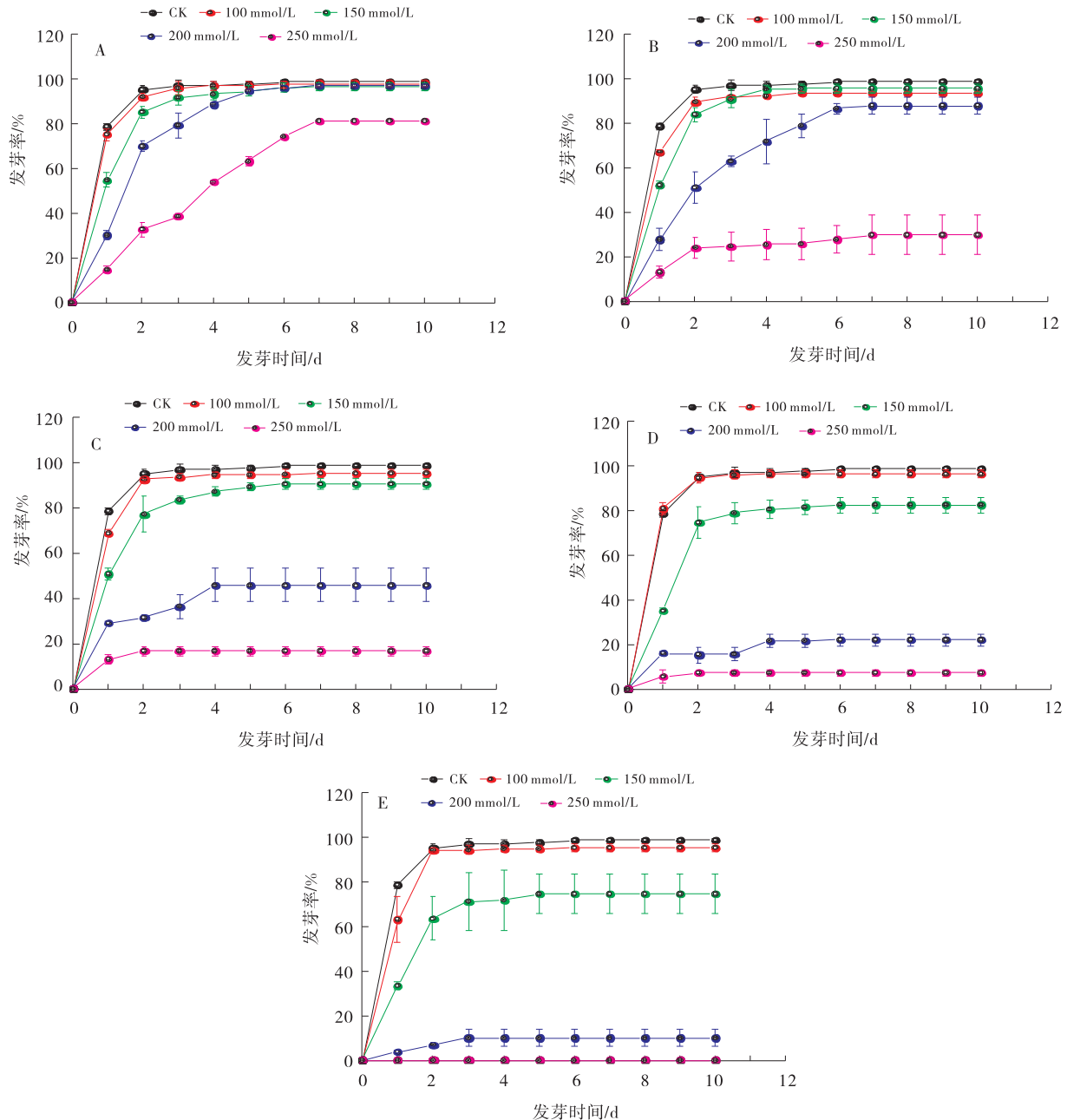


图1 不同浓度盐碱混合胁迫对发芽率的影响

Fig. 1 Effect of mixed saline and alkaline stresses at different concentrations on germination rates

注:A、B、C、D、E分别代表2种中性盐(NaCl 、 Na_2SO_4)和2种碱性盐(NaHCO_3 、 Na_2CO_3)1:1:0:0、1:2:1:0、1:9:9:1、1:1:1:1、9:1:1:9的混合比例。

95.16~100.00%。

2.2.3 盐碱混合胁迫对根长和苗长的影响 湖南稷子的苗长和根长均受到溶液浓度和pH的共同影响(图5,图6)。随溶液浓度的增加,A-E处理相较CK,苗长降幅分别为36.16%~87.60%、49.30%~91.00%、63.42%~100.00%、66.09%~100.00%、68.02%~100.00%,根长降幅分别为73.40%~93.28%、73.19%~100.00%、81.87%~100.00%、

88.99%~100.00%、90.76%~100.00%。同一溶液浓度下,中性盐和碱性的混合(B-E)与中性盐混合(A)相比,苗长降幅分别为20.58%~49.91%、25.16%~53.67%、43.71%~100.00%、27.39%~100.00%,根长降幅分别为0.77%~65.27%、43.61%~100.00%、89.90%~100.00%、90.76%~100.00%。

2.2.4 盐碱混合胁迫对湖南稷子幼苗离子含量的影响 盐碱混合胁迫对湖南稷子幼苗 Na^+ 、 K^+ 含量有

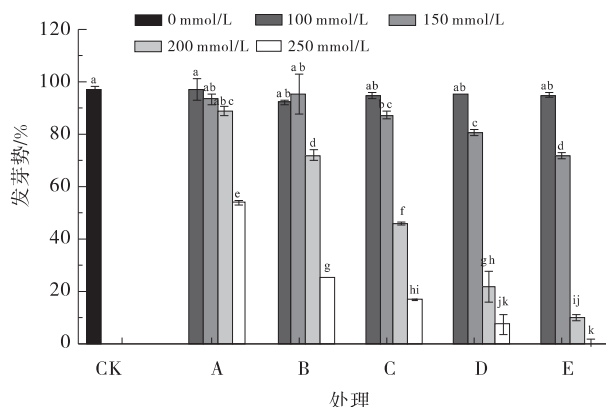


图2 不同浓度混合盐碱胁迫对发芽率的影响

Fig. 2 Effect of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on germination rate

注:图中对所有组别进行比较,不同小写字母表示不同组别间差异显著($P < 0.05$),下同。

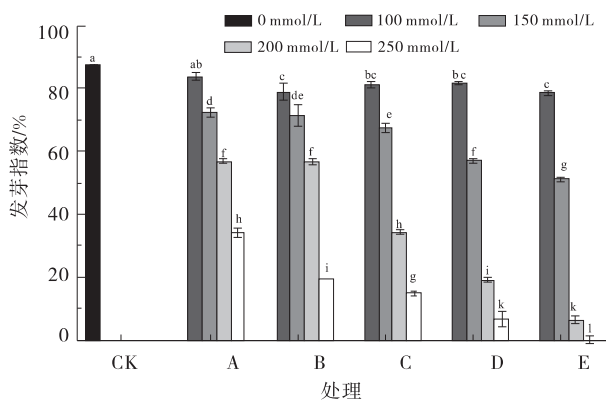


图3 不同浓度混合盐碱胁迫对发芽指数的影响

Fig. 3 Effect of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on germination index

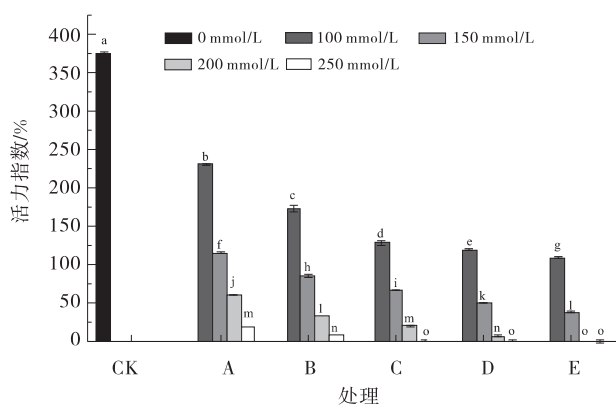


图4 不同浓度混合盐碱胁迫对活力指数的影响

Fig. 4 Effect of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on vigor index

显著影响($P < 0.05$)。随A—E处理碱性盐含量增加, Na^+ 含量显著增高,而 K^+ 含量显著下降($P < 0.05$)(图7-A)。此外,A—E处理中,随着盐浓度的增加,钠离

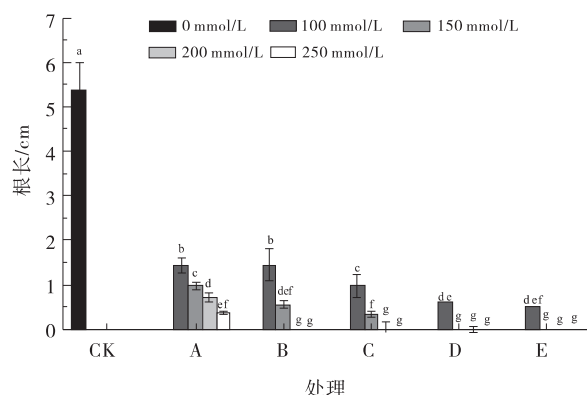


图5 不同浓度混合盐碱胁迫对根长的影响

Fig. 5 Effect of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on root length

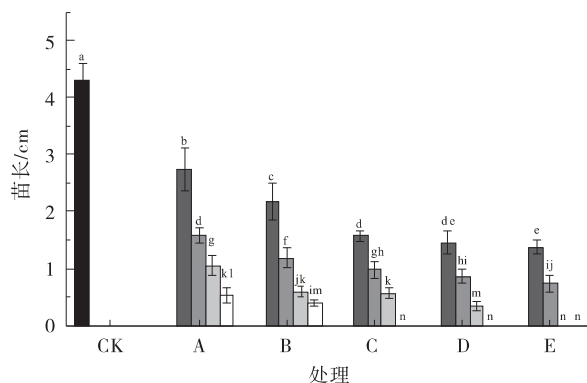


图6 不同浓度混合盐碱胁迫对苗长的影响

Fig. 6 Effect of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on seedling length

子含量呈不断升高趋势,在250 mmol/L盐溶液处理下达到最大,各处理组间差异显著($P < 0.05$);E处理下100 mmol/L盐浓度下相比于CK处理湖南稷子叶片中的 Na^+ 含量提高了307.58%。湖南稷子幼苗钾离子含量随盐碱混合浓度的增加而逐渐下降,即使在最低浓度(100 mmol/L)下,相较于CK也达到了显著水平($P < 0.05$);在中性盐A处理100 mmol/L浓度下,较CK处理 K^+ 含量降低了7.66%(图7-B)。

2.2.5 盐碱混合胁迫对湖南稷子幼苗脯氨酸和丙二醛含量的影响 在盐碱混合胁迫下脯氨酸和丙二醛含量随盐浓度的增加而增加,各处理间存在显著差异($P < 0.05$)(图8-A,图8-B)。当盐浓度100 mmol/L时,所有处理相较于CK,脯氨酸含量增幅分别为9.60%、21.21%、33.61%、50.60%、70.30%。盐浓度为150 mmol/L时,A—E处理与CK相比,脯氨酸含量增幅分别为17.77%、29.64%、42.26%、57.66%、77.31%。胁迫液浓度为200、250 mmol/L时,A—E

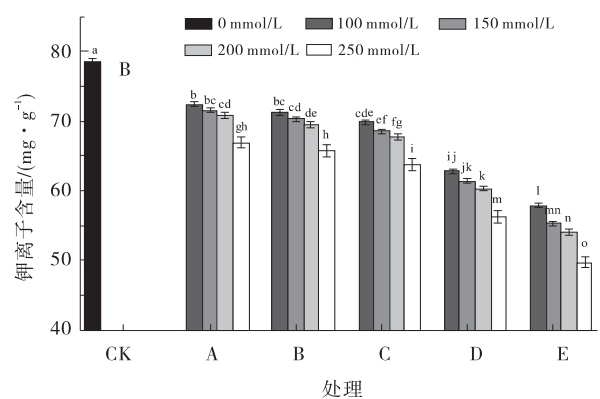
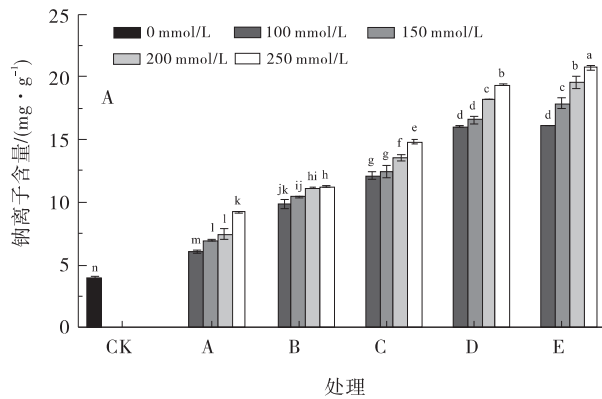


图 7 不同浓度混合盐碱胁迫对湖南稷子幼苗离子含量的影响

Fig. 7 Effects of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on the ion content of Hunan Jizi seedlings

组相较 CK, 脯氨酸含量增幅分别为 24.65%~85.16%、36.25%~98.55%。随着盐溶液浓度的升高, 丙二醛含量呈上升趋势, 其中在 E 处理下, 盐溶液

浓度为 250 mmol/L 时, 丙二醛含量达到最高值, 为 25.29 mg/g, 相比 CK 升高了 76.53%, 差异显著 ($P < 0.05$)。

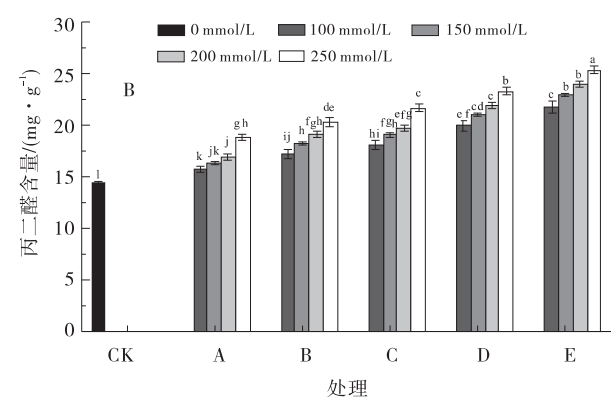
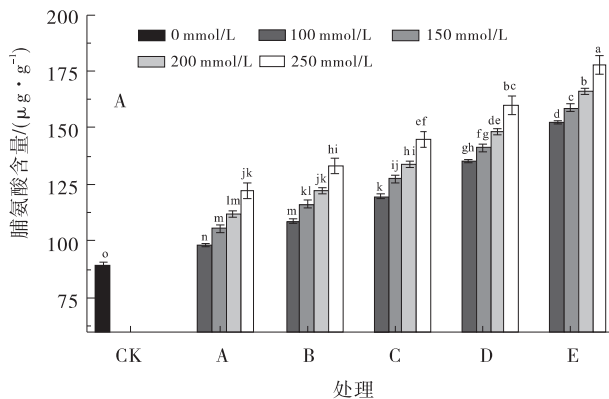


图 8 不同浓度混合盐碱胁迫对湖南稷子幼苗脯氨酸和丙二醛含量的影响

Fig. 8 Effects of different concentrations of mixed saline and alkaline stress on proline and malondialdehyde contents of Hunan jizi seedlings

2.3 湖南稷子种子发芽指标与胁迫因子相关性分析

冗余分析 RDA 结果如图 9 所示, 第 1 维与第 2 维的解释度分别为 84.31%、7.93%, 湖南稷子种子的发芽指标与胁迫因子之间关联度较高。湖南稷子的发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数、苗长及根长与 pH、 Na^+ 、 SO_4^{2-} 等均呈负相关 ($P < 0.05$), 且胁迫因子对湖南稷子发芽指标的抑制作用, 由高到低依次为 Na^+ ($P = 0.004$, $F = 140$)、pH ($P = 0.003$, $F = 48.5$)、 SO_4^{2-} ($P = 0.018$, $F = 23.2$)、 HCO_3^- ($P = 0.003$, $F = 33$)、 CO_3^{2-} ($P = 0.002$, $F = 0.8$)。结果表明, Na^+ 和 pH 是影响湖南稷子种子发芽最大的胁迫因子。

3 讨论

种子萌发期是作物生长发育过程中最敏感和脆弱的阶段, 作物成功建植与该时期密切相关^[20]。在非生物胁迫下, 尤其是在种子萌发和幼苗生长阶段, 盐

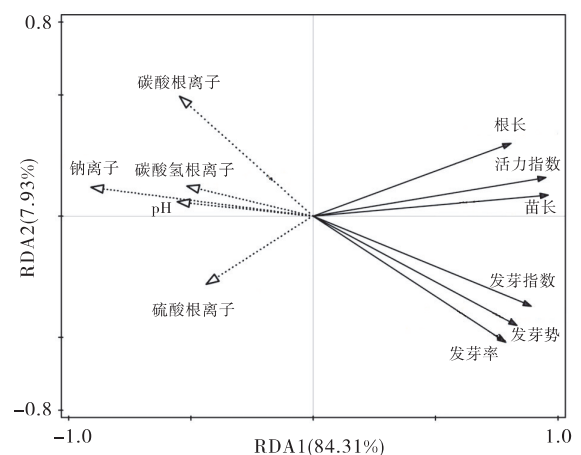


图 9 湖南稷子种子发芽指标和胁迫因子 RDA 分析

Fig. 9 RDA analysis of germination index and stress factor of *Echinochloa frumentacea* seeds

胁迫对作物的伤害更为常见, 会严重损害作物细胞的正常生长代谢和生理过程。有学者研究表明, 盐浓度造成的低水势环境是抑制种子萌发的主要因素^[21]。

在本试验中,湖南稷子的种子发芽率随着盐浓度的升高呈降低趋势,同时在盐碱混合胁迫下的湖南稷子发芽率比中性盐胁迫下降低的更明显,说明除盐浓度影响外,pH对湖南稷子种子发芽也有重要影响。此外,有研究也表明,种子发芽受到抑制是因为渗透作用的影响,随着渗透效应的消除,种子发芽能力就会恢复^[5]。而在本试验中,将未发芽的种子用蒸馏水反复冲洗后继续培育,未发现有恢复发芽的迹象,这表明盐碱胁迫下湖南稷子种子的萌发不仅受到渗透作用的抑制,而且还受到离子毒性作用和其他不可逆损伤。Zhang等^[22]研究认为高浓度的 Na^+ 、 Cl^- 会抑制细胞分裂和新陈代谢,延缓发芽甚至导致种子死亡。滕祥勇等^[23]在盐胁迫下通过对苗期水稻根部与叶片的离子分配与转移进行研究,发现盐胁迫会导致植物体内的离子平衡发生紊乱,植物体内地上部 Na^+ 的浓度明显升高, K^+ 浓度下降。本研究中,也发现了类似现象,在盐碱胁迫下湖南稷子叶片 Na^+ 呈增加趋势, K^+ 含量呈下降趋势,结果表明,在盐胁迫下, Na^+ 可经非选择性的阳离子通道转位至胞质,引起细胞膜的去极化,并激活外向的钾通道,促进钾离子的流出。盐碱胁迫对种子发芽起促进或抑制作用,经常因盐组分和作物种类的不同而存在一定差异^[24]。毛培春等^[25]研究表明,低浓度条件下的盐或盐碱混合液能够促进种子发芽。而本研究表明,在A-E处理低盐浓度(100 mmol/L)条件下,湖南稷子种子发芽率与CK相比无促进作用,湖南稷子种子的发芽率随盐分浓度的增大而降低;这与杨迎月等^[12]的研究结果一致。Zhang等^[26]研究发现在高pH、低浓度碱胁迫条件下种子发芽会受到抑制。本研究表明,湖南稷子在较低盐浓度(100 mmol/L)条件下,中性盐胁迫和盐碱混合胁迫处理的发芽率无显著变化。而在低盐条件下,高pH不会抑制湖南稷子种子发芽,这与赵力兴等^[27]研究结果相似,其原因主要是在低碱胁迫下,高pH的有害影响通过根部外的pH调节而抵抗,因此细胞内环境不受影响。当盐浓度大于一定浓度(150 mmol/L)时,B-E处理随着胁迫液pH的增加湖南稷子种子发芽率呈显著下降趋势,且在同等盐浓度下,pH越高,湖南稷子发芽率下降幅度越大。这说明当盐溶液大于一定浓度时,高pH产生的离子不均衡对湖南稷子种子所造

成的损害远大于仅使用中性盐的危害^[28]。

盐碱土中的可溶性盐,除了引起渗透胁迫、离子毒害外,还会引起养分的损失,影响作物的生理代谢和活力^[29-30]。发芽指数和活力指数是表征种子活性的重要指标。张旗等^[31]研究表明,种子发芽指数、活力指数均随盐分水平的提高而先上升后下降。然而,湖南稷子的种子发芽率、活力却随着盐分的升高而降低,且这种离子毒害作用对湖南稷子种子活性造成的损害是不可逆的,与前人研究结果有差异,原因可能是参试种子类型不同所致。此外,杨春武等^[32]通过研究盐碱胁迫对小冰麦(*Triticum aestivum*-*Agropyron intermedium*)的影响,认为高pH会直接损害根系细胞结构,破坏细胞内离子稳态,进而影响幼苗植株形态的建成。本试验研究结果支持这一观点,在同盐浓度下,不同pH胁迫处理间湖南稷子苗长和根长差异显著,同时,湖南稷子幼苗生长发育过程中,由于土壤酸碱度的变化,导致营养物质的有效利用减少,导致土壤结构的不稳定,从而对苗木的发育产生不利影响。

盐胁迫下,植物体内的活性氧代谢稳态被打破,致使细胞中丙二醛含量升高,丙二醛(MDA)可引起细胞膜脂质过氧化反应,进而影响细胞膜的稳定性^[33]。已有研究表明,随着盐浓度的升高,醉马草(*Achnatherum inebrians*)幼苗的丙二醛含量逐渐升高,并且在碱性条件下,对植物细胞膜脂的损害要比中性盐严重得多^[34]。本研究发现,湖南稷子的丙二醛含量随着盐浓度的升高呈降低趋势,同时盐碱混合胁迫的丙二醛含量比中性盐胁迫下降更低更明显,说明盐碱混合对膜脂的损伤程度大于中性盐。植物在逆境条件下会分泌渗透调节因子,而脯氨酸作为一种重要的渗透调控因子,其含量的累积能增强植物的抗逆能力。余淑艳等^[35]研究表明,在盐胁迫下沙芦草(*Agropyron mongolicum*)叶片的脯氨酸含量较对照显著提高了25.33%。在本试验中,盐碱胁迫处理的湖南稷子脯氨酸含量较对照组显著提高,说明湖南稷子在盐碱胁迫下能够尽可能保持合成有机物的部位和途径不被破坏,通过调节胶质细胞和细胞的新陈代谢,降低盐对细胞的渗透伤害。

4 结论

盐碱复合胁迫对湖南稷子种子发芽试验表明,湖

南稷子种子在高盐环境下的萌发受盐胁迫的影响大于单盐处理。且随胁迫液浓度的增大湖南稷子种子的累积发芽率、发芽势、发芽指数、活力指数,根长及苗长均有降低的趋势。 Na^+ 、脯氨酸和丙二醛含量随盐浓度的增加呈升高趋势,而 K^+ 含量显著下降。湖南稷子种子的发芽率、发芽势和发芽指数受pH的影响最大。结果表明,湖南稷子种子在中性盐和碱性盐共存的胁迫条件下,盐浓度超过250 mmol/L,其萌发率为0。

参考文献:

- [1] 杨劲松,姚荣江,王相平等. 中国盐渍土研究:历程、现状与展望[J]. 土壤学报,2022,59(1):10—27.
- [2] Singh A. Soil salinity: A global threat to sustainable development [J]. Soil Use and Management, 2022, 38 (1) : 39—67.
- [3] 张译尹,李雪颖,王斌,等. 盐胁迫对不同种质小黑麦幼苗水分利用效率和渗透调节的影响[J]. 草业学报,2024,33(4):87—98.
- [4] 金梦野,李小华,李昉泽,等. 盐碱复合胁迫对水稻种子发芽的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文),2020,28(4):566—574.
- [5] Effects of salt, alkali and salt-alkali mixed stresses on seed germination of the halophyte *Salsola ferganica* (Chenopodiaceae) [J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33 (6) : 354—360.
- [6] 陆安桥. 湖南稷子耐盐碱特性及生物改良效果研究[D]. 银川:宁夏大学,2022.
- [7] 朱健康,倪建平. 植物非生物胁迫信号转导及应答[J]. 中国稻米,2016,22(6):52—60.
- [8] 李雪颖. 25份小黑麦种质材料耐盐性评价与筛选[D]. 银川:宁夏大学,2022.
- [9] 李天永,严子柱,姜生秀. 两种独苣菜种子萌发对不同浓度NaCl胁迫的响应[J]. 草地学报,2021,29(1):88—94.
- [10] 贾秀峰. 苏打盐碱胁迫对两种苜蓿种子萌发影响及品种耐性综合分析[J]. 草地学报,2019,27(6):1511—1517.
- [11] 王佳文,杨新宇,刘晗,等. 盐碱胁迫对黑麦草种子萌发的影响[J]. 东北农业科学,2023,48(1):60—62.
- [12] 杨迎月,毛桂莲,麻冬梅,等. 四种牧草种子在不同浓度NaCl或 NaHCO_3 胁迫下的萌发特性[J]. 草地学报,2022,30(3):637—645.
- [13] 袁驰,梁永霞,刘静,等. 复盐胁迫对不同水稻品种种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 种子,2018,37(6):78—81.
- [14] 陆安桥,张峰举,许兴,等. 盐胁迫对湖南稷子苗期生长及生理特性的影响[J]. 草业学报,2021,30(5):84—93.
- [15] 牛伊宁,南志标. 陇东黄土高原饲草作物生产力研究[J]. 草业科学,2012,29(9):1422—1427.
- [16] 殷秀杰,燕昌江,李凤兰,等. 混合盐碱胁迫对白三叶种子萌发的影响[J]. 东北农业大学学报,2009,40(12):58—61.
- [17] 王宝山,赵可夫. 小麦叶片中Na、K提取方法的比较[J]. 植物生理学通讯,1995(1):50—52.
- [18] Wang S, Wan C, Wang Y, *et al.* The characteristics of Na^+ , K^+ and free proline distribution in several drought-resistant plants of the Alxa Desert, China [J]. Journal of Arid Environments, 2004, 56(3):525—539.
- [19] 李子芳,吴锡冬. 植物丙二醛含量测定试验设计方案[J]. 天津农业科学,2016,22(9):49—51.
- [20] Li, Ruili, Shi, *et al.* Effects of salt and alkali stresses on germination, growth, photosynthesis and ion accumulation in alfalfa (*Medicago sativa* L.) (Plant Nutrition) [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2010.
- [21] Debez A, Hamed K B, Grignon C, *et al.* Salinity effects on germination, growth, and seed production of the halophyte *Cakile maritima* [J]. Plant and Soil, 2004, 262(1):179—189.
- [22] Zhang H, Irving L J, McGill C, *et al.* The effects of salinity and osmotic stress on barley germination rate: sodium as an osmotic regulator [J]. Annals of Botany, 2010, 106(6):1027.
- [23] 滕祥勇,李鹏志,林秀云,等. 碱性盐胁迫对水稻苗期矿质离子吸收与分配的影响[J]. 东北农业科学,2022,47(1):11—16.
- [24] 纪荣花,于磊,鲁为华,等. 盐碱胁迫对芨芨草种子萌发的影响[J]. 草业科学,2011,28(2):245—250.
- [25] 毛培春,王勇. 不同禾本科牧草材料种子萌发的耐盐性试验[J]. 内蒙古农业大学学报(自然科学版),2004(2):115—118.
- [26] Ji—Tao, Zhang, Chun—Sheng, *et al.* Effects of saline and alkaline stresses on the germination, growth, photosynthesis, ionic balance and anti-oxidant system in an alkali-tolerant leguminous forage *Lathyrus quinquenervius* [J]. Soil Science & Plant Nutrition, 2009.
- [27] 赵力兴,王琳,温丽,等. 盐碱地紫花苜蓿的适应机制与栽培策略[J]. 草原与草坪,2022,42(1):142—149.
- [28] 张朝辉,张邦彦,谢小伟,等. 盐碱地甜高粱间作大豆对作物生产性能和光合特性的影响[J]. 草地学报,2024,32(1):219—228.
- [29] 巫利梅,聂必林,如马南木·尼合买提,等. 混合盐碱胁迫

- 下外源茉莉酸甲酯对黑果枸杞种子萌发特性的影响[J]. 草原与草坪, 2022, 42(6): 110—121.
- [30] 赵广兴, 李王成, 贾振江, 等. 盐碱复合胁迫对白茎盐生草种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2021, 38(8): 1469—1476.
- [31] 张旗, 陶梦慧, 李丹, 等. 盐碱胁迫对野生大豆种子萌发的影响[J]. 畜牧与饲料科学, 2022, 43(4): 104—108.
- [32] 杨春武, 李长有, 张美丽, 等. 盐、碱胁迫下小冰麦体内的pH及离子平衡[J]. 应用生态学报, 2008(5): 1000—1005.
- [33] Tang X, Mu X, Shao H, *et al.* Global plant—responding mechanisms to salt stress: physiological and molecular levels and implications in biotechnology [J]. Critical Reviews in Biotechnology, 2014.
- [34] 陈雅琦, 苏楷淇, 陈泰祥, 等. 混合盐碱胁迫对醉马草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2021, 30(3): 137—157.
- [35] 余淑艳, 周燕飞, 黄薇, 等. 干旱、盐及旱盐复合胁迫对沙芦草光合和生理特性的影响[J]. 草地学报, 2021, 29(11): 2399—2406.

Effects of combined saline and alkaline stresses on seed germination of jizi in Hunan province

XIE Xiao-wei, YANG Tian-yu, JIA Xiao-hui, GU Xu-dong, ZHANG Chao-hui,
WANG Bin*

(College of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China)

Abstract: 【Objective】 To study the effects of saline and alkaline compound stresses on seed germination and seedling of Jizi in Hunan. 【Method】 The experiment simulated the characteristics of salt composition in the natural state of saline and alkaline land. Two neutral salts (NaCl , Na_2SO_4) and two alkaline salts (NaHCO_3 , Na_2CO_3) were mixed in the ratios of 1:1:0:0, 1:2:1:0, 1:9:9:1, 1:1:1:1, and 9:1:1:9, which were labeled as A, B, C, D, and E treatments, respectively, with deionized water as control (CK). This research investigated the effects of mixed saline and alkaline stresses on their germination indexes and seedling growth of Hunan Jizi. 【Result】 The germination rate of Hunan jizi seeds decreased significantly ($P < 0.05$) with the increase of salt concentration. On the 5th day, the germination rates of Hunan jizi seeds were 8.5%, 16.4%, and 23.6% lower than that of the control (97.3%) when the salt concentration was 150 mmol/L, and salt concentrations increased up to 250 mmol/L. The significant decrease ($P < 0.01$) of Hunan jizi seeds' germination rate indicates that the mixed stresses of salinity and alkalinity had a strong inhibitory effect on the germination of Hunan Jizi. The changes of germination potential, germination index, vigor index, root length and seedling length of Hunan Jizi were all in line with the germination rate. The germination of Hunan Jizi seeds under neutral and alkaline compound stresses was greatly inhibited, while all germination indices of Hunan Jizi under neutral salt compound of 250 mmol/L were 0. With the increase of salinity, the contents of Na^+ , proline, and MDA in the leaves increased gradually, while the content of K^+ decreased significantly. 【Conclusion】 The increase in salt concentration inhibited the germination of Hunan Jizi. The results of this study provide a theoretical basis for the cultivation of Hunan Jizi in saline soil.

Key words: *Echinochloa frumentacea*; salt alkali compound stress; germination rate; germination index

(责任编辑 靳奇峰)