

盐碱胁迫对高羊茅种子萌发和幼苗生长的影响

徐秋蕊¹, 段廷玉¹, 柴琦^{2*}

(1. 兰州大学草地农业科技学院, 草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室, 甘肃 兰州 730020;

2. 兰州大学草地农业科技学院, 农业农村部草牧业创新重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

摘要:【目的】研究不同浓度和不同比例的盐碱溶液对高羊茅种子萌发和幼苗生长的影响。【方法】以高羊茅(*Festuca arundinacea*)为试验材料, 选取中性盐(NaCl、Na₂SO₄)和碱性盐(NaHCO₃、Na₂CO₃)按照NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃的顺序设5个组合:A(1:1:0:0)、B(1:2:1:0)、C(1:9:9:1)、D(1:1:1:1)、E(9:1:1:9), 其混合盐碱处理液总浓度均为100、200 mmol/L, 测定和分析高羊茅种子发芽和幼苗生长指标。【结果】随着中性盐溶液浓度升高, 高羊茅幼苗苗长、叶片总长、叶总表面积先上升后下降, 根长、根系总长度、根总表面积、根尖数下降; 随着混合盐碱溶液浓度的升高, 高羊茅发芽率、发芽势、发芽指数、相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数、苗长、叶片总长、叶总表面积、根长、根系总长度、根总表面积、根尖数均出现下降, 同时相对盐害率升高。200 mmol/L的C、D、E溶液完全抑制高羊茅种子萌发。【结论】5种不同比例盐碱混合对高羊茅种子萌发和幼苗生长均有不同程度的抑制作用, 其胁迫程度由低到高为:A<B<C<D<E, 即混合溶液中碱性盐, 尤其是Na₂CO₃所占比例越大, 则pH值越大, 对高羊茅种子萌发和幼苗根叶生长的胁迫程度越强。

关键词:混合盐碱; 高羊茅; 种子萌发; 幼苗生长; 发芽率; 耐盐性

中图分类号:S688.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1009-5500(2025)02-0091-09

DOI:10.13817/j.cnki.cycp.2025.02.010



高羊茅(*Festuca arundinacea*), 又名苇状羊茅, 禾本科羊茅属草本植物, 丛生型, 叶片较宽, 观赏效果良好^[1]。高羊茅对高温、低温、干旱等逆境适应性较强, 是亚热带常用冷季型草坪草种, 其抗旱性、耐热性和耐粗放管理特点突出, 常与早熟禾搭配用于粗放管理草坪, 如飞机场、赛马场等场地以及公路护坡等^[2-4], 粗放管理下, 植物本身的抗逆性尤为重要。

土地盐渍化是制约植物生长发育的非生物胁迫因子之一, 严重影响农作物生产和生态系统健康。有研究^[1]表明, 盐碱胁迫对植物造成的影响表现在渗透

胁迫、离子毒害、氧化应激等多方面。在碱胁迫下pH值的升高会导致Ca²⁺、Mg²⁺、Fe²⁺等金属离子的沉积, 伴随着无机阴离子数量减少, 植物对矿质营养的吸收受阻, 造成严重营养胁迫; 植物的株高、叶片数、茎长及地上部分干物质重等均减少, 地下部含水量和幼苗根长下降幅度相对较小, 根茎节长度和比根长增加。

目前, 全球有五分之一耕地存在不同程度的盐渍化, 在我国盐碱化土地总面积已达1亿hm², 耕地面积每年都在下降, 直至警戒线边缘^[2]。我国盐碱地, 尤其是内陆盐碱地, 土壤的盐化和碱化常常同时发生, 盐分离子成分复杂且程度各异。盐化以盐度升高为主要特点, 后者则以pH值升高为主, 在我国西北干旱半干旱带的盐碱化土地中, 产生盐害危害的主要盐离子是Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻, 产生碱害危害的主要盐离子是HCO₃⁻、CO₃²⁻、Cl⁻、Na⁺、SO₄²⁻^[3]。不同地区盐碱化程度不同, 盐离子的种类和浓度各有差异, 因此, 本试

收稿日期:2023-11-28; 修回日期:2024-10-12

基金资助:南通市应用基础研究资助项目(MS12017019-2)

作者简介:徐秋蕊(2001-), 女, 山东菏泽人, 硕士研究生。

E-mail:xuqiurui19@163.com

*通信作者, 研究方向为草坪学。

E-mail:chaiqi@lzu.edu.cn

验模拟不同成分、浓度的混合盐碱化条件对植物种子萌发和幼苗生长的影响,旨在为不同类型盐碱地上植物的生长、建植或改良提供理论依据。

土地条件越发严峻的生态背景下,盐碱胁迫下种子能够萌发、幼苗可以繁荣生长是高羊茅草坪草建植成功的前提,因此,采用混合盐碱对高羊茅进行胁迫处理,研究其在不同摩尔比例的混合盐碱胁迫下高羊茅种子萌发、幼苗生长的变化,以期高羊茅在盐碱土壤上利用和建植提供理论依据,也为高羊茅对盐碱胁迫的适应能力和盐碱土地的改良提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

供试高羊茅品种火凤凰2号(phoenix No. 2)由北京克劳沃生态科技有限公司提供,分析纯 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃试剂由天津市致远化学试剂有限公司生产。

1.2 试验设计

试验选取中性盐(NaCl、Na₂SO₄)和碱性盐(NaHCO₃、Na₂CO₃)按照表1所示的一定摩尔浓度比例,配置10种混合盐碱溶液,设置0 mmol/L为对照组。

表1 各处理的成分及盐分浓度

Table 1 The composition and salt concentration of each

处理编号	treatment			
	NaCl	Na ₂ SO ₄	NaHCO ₃	Na ₂ CO ₃
A1	50	50	0	0
A2	100	100	0	0
B1	25	50	25	0
B2	50	100	50	0
C1	5	45	45	5
C2	10	90	90	10
D1	25	25	25	25
D2	50	50	50	50
E1	45	5	5	45
E2	90	10	10	90
CK	0	0	0	0

1.3 试验地点

试验在兰州大学草种创新与草地农业生态系统全国重点实验室进行,于2022年9月11日开始,2022

年10月8日停止试验,共计28 d。

1.4 试验方法

试验采用纸上发芽法,选择成熟、饱满且健康的种子,用75%的酒精溶液消毒30 s,再用蒸馏水漂洗3遍。向铺有两层滤纸的培养皿中分别加入不同浓度、比例的处理液5 mL,然后选取大小均一的种子50粒,置于培养皿中。将培养皿放入恒温光照培养箱中培养,设置光照14 h,温度25℃;黑暗10 h,温度20℃。试验期间每天18:00时以恒重法补充水分,维持盐溶液的浓度,观察并记录种子发芽和幼苗生长情况。试验采用完全随机试验设计,以蒸馏水处理为对照(CK),共11个处理,每个处理重复4次。

1.5 测定指标与方法

(1)萌发指标测定:以胚芽突破种皮且超过种子本身长度1/2时作为萌发标准,每天观察并记录种子发芽数,第7天后统计种子发芽势;第28天后统计种子发芽率。各个指标计算公式如下^[5]:

$$\text{发芽率(GR)} = \frac{\text{发芽种子总数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽势(GP)} = \frac{\text{规定时间内发芽种子数}}{\text{供试种子数}} \times 100\%$$

$$\text{发芽指数(GI)} = \sum G_t / D_t$$

式中: G_t 为在第 t 日的发芽数, D_t 为发芽天数。

$$\text{相对发芽率} = \frac{\text{处理种子发芽率}}{\text{对照种子发芽率}} \times 100\%$$

$$\text{相对发芽势} = \frac{\text{规定天数内处理种子发芽数}}{\text{规定天数内对照种子发芽数}} \times 100\%$$

$$\text{相对发芽指数} = \frac{\text{处理种子发芽指数}}{\text{对照种子发芽指数}}$$

$$\text{相对盐害率} = \frac{(\text{对照发芽率} - \text{处理发芽率})}{\text{对照发芽率}} \times 100\%$$

(2)生长指标测定:在试验第28天,每个培养皿选取具有代表性的10株生长均匀一致的叶片用直尺测量其苗长、根长。

根系扫描:先用0.075 mg/mL的亚甲基蓝溶液将根系浸泡染色10 min,再用Delta-TSCAN根系分析系统(HP. C7717, Singaporean)扫描根系,测定根系总长、直径、总表面积和根尖数。

叶片扫描:用Delta-TSCAN分析系统(HP. C7717, Singaporean)扫描叶片,测定叶片总长、叶宽和

总表面积。

1.6 数据分析

所有数据用 Microoft Excel 2010 录入,并作图。采用 IBM SPSS Statistics 26 统计软件进行差异显著性(LSD)分析。

2 结果与分析

2.1 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅种子萌发的影响

2.1.1 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅种子发芽率和相对发芽率的影响 随着混合盐碱溶液浓度升高,高羊茅种子发芽率逐渐降低,不同盐碱比例处理下种子发芽率有差异。在相同比例的混合盐碱溶液下,对照组高羊茅种子发芽率均高于 100、200

mmol/L 浓度处理下高羊茅种子,并且 100 mmol/L 浓度处理下高羊茅种子发芽率高于 200 mmol/L 浓度处理。200 mmol/L 浓度,C、D、E 比例混合盐碱种子未萌发。在 100 mmol/L 的总浓度条件下,处理 A、B 种子发芽率显著高于 C、D 和 E 处理($P<0.05$),C、D 和 E 发芽率比对照组分别降低了 44.1%、71.8% 和 94.9%;在 200 mmol/L 的总浓度条件下,B 比例下的发芽率比 A 比例降低了 67.9%(表 2),降低趋势明显高于 100 mmol/L 的总浓度条件下,也说明浓度影响了发芽率。相对发芽率与发芽率整体趋势一致,A、B 比例处理下的高羊茅种子相对发芽率显著高于 C、D 和 E 比例处理($P<0.05$),相较于 A 比例处理,C、D 和 E 比例处理的高羊茅种子相对发芽率分别降低了 42.6%、71.0% 和 94.7%(表 2)。

表 2 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅种子的发芽率和相对发芽率(%)

Table2 Germination rate and relative germination rate of *Festuca arundinacea* seeds under different concentrations and different proportions of saline-alkali stress

浓度/(mmol·L ⁻¹)	发芽率/%				
	A	B	C	D	E
0	97.50±0.50 ^{AA}				
100	95.00±1.29 ^{AA}	96.00±0.82 ^{AA}	54.50±1.50 ^{BB}	27.50±1.71 ^{BC}	5.00±1.00 ^{BD}
200	81.00±1.73 ^{BA}	26.00±6.48 ^{BB}	0.00±0.00 ^{CC}	0.00±0.00 ^{CC}	0.00±0.00 ^{CC}
	相对发芽率/%				
100	97.44±1.32 ^{AA}	98.46±0.84 ^{AA}	55.90±1.54 ^{BB}	28.21±1.75 ^{CC}	5.13±1.03 ^{DD}
200	83.08±1.77 ^{BA}	26.67±6.65 ^{BB}	0.00±0.00 ^{CC}	0.00±0.00 ^{CC}	0.00±0.00 ^{CC}

注:不同小写字母表示同列不同浓度间差异显著,不同大写字母表示同行不同比例间差异显著,下同。

2.1.2 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅种子发芽势和相对发芽势的影响 随着混合盐碱溶液浓度升高,高羊茅种子的发芽势逐渐降低,在混合盐碱 A、B 比例下,高羊茅种子发芽势随着浓度升高显著降低($P<0.05$),而且浓度越大,在混合盐碱 C、D、E 比例下,高羊茅种子发芽势在 100 mmol/L 浓度下大幅下降,在 200 mmol/L 浓度下被完全抑制。在 100 mmol/L 的总浓度条件下,处理 A、B 显著高于 C、D 和 E 比例下的种子发芽率($P<0.05$),C、D 和 E 发芽率依次降低(表 3),而 A、B、C、D、E 比例中碱性盐占比逐渐升高,说明碱性越高对发芽率的抑制作用越强。相对发芽势与发芽势变化趋势一致,各混合处理下 200 mmol/L 相较于 100 mmol/L 处理相对发芽势降低了 64.1%~100%(表 3)。

2.1.3 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅种子发芽指数和相对发芽指数的影响 随着混合盐碱溶液浓度升高,高羊茅种子的发芽指数逐渐降低,相同混合盐碱配比下,浓度分别设为 0、100 和 200 mmol/L 处理下的发芽指数显著降低($P<0.05$)。100 mmol/L 总浓度下,不同比例对高羊茅种子发芽指数的抑制程度由低到高为 A<B<C<D<E,200 mmol/L 总浓度下,A 比例下高羊茅种子的发芽指数显著高于 B 比例处理($P<0.05$),B 比例处理的种子发芽指数又显著高于 C、D 和 E 比例处理($P<0.05$)。A、B、C、D 比例盐碱胁迫组高羊茅种子的相对发芽指数均为 100 mmol/L 处理组显著高于 200 mmol/L 处理($P<0.05$)。浓度 100 mmol/L 处理中,各比例盐碱胁迫下高羊茅种子的相对发芽指数有显著差异($P<0.05$),

表3 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅种子的发芽势和相对发芽势

浓度/(mmol·L ⁻¹)	发芽势/%				
	A	B	C	D	E
0	88.50±0.96 ^{aA}				
100	78.00±0.82 ^{bA}	75.50±0.96 ^{bA}	28.50±3.86 ^{bB}	15.50±1.50 ^{bC}	5.00±1.00 ^{bD}
200	28.00±2.45 ^{cA}	9.00±4.12 ^{cB}	0.00±0.00 ^{cC}	0.00±0.00 ^{cC}	0.00±0.00 ^{cC}
	相对发芽势/%				
100	88.14±0.92 ^{aA}	85.31±1.08 ^{aA}	32.20±4.36 ^{aB}	17.51±1.69 ^{aC}	5.65±1.13 ^{aD}
200	31.64±2.77 ^{bA}	10.17±4.66 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bC}	0.00±0.00 ^{bC}	0.00±0.00 ^{bC}

并且呈现递减趋势,浓度 200 mmol/L 处理中,A 处理 0.05),B 处理下高羊茅种子的相对发芽指数显著高于下高羊茅种子的相对发芽指数显著高于 B 处理($P < 0.05$) C、D 和 E 处理($P < 0.05$)(表 4)。

表4 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅种子的发芽指数和相对发芽指数

浓度/(mmol·L ⁻¹)	发芽指数/%				
	A	B	C	D	E
0	0.69±0.005 ^{aA}				
100	0.59±0.003 ^{bA}	0.56±0.005 ^{bB}	0.26±0.009 ^{bC}	0.14±0.008 ^{bD}	0.03±0.006 ^{bE}
200	0.33±0.009 ^{cA}	0.10±0.003 ^{cB}	0.00±0.00 ^{cC}	0.00±0.00 ^{cC}	0.00±0.00 ^{cC}
	相对发芽指数/%				
100	85.04±0.72 ^{aA}	80.95±0.96 ^{aB}	37.91±1.07 ^{aC}	19.82±1.19 ^{aD}	4.59±0.72 ^{aE}
200	47.25±1.01 ^b	14.17±3.26 ^b	0.00±0.00 ^{bC}	0.00±0.00 ^{bC}	0.00±0.00 ^{bC}

2.1.4 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅种子相对盐害率的影响 相同比例下,浓度升高羊茅种子相对盐害率随之升高,A、B、C、D、E 比例下 200 mmol/L 浓度盐碱胁迫较 100 mmol/L 浓度处理下分别升高了 560.9%、4661.7%、126.8%、39.3%、5.4%。100 mmol/L 浓度,A、B 比例盐碱胁迫下高羊茅种子的相

对盐害率显著低于 C、D 和 E 比例($P < 0.05$),C、D 和 E 比例的高羊茅种子相对盐害率依次升高;200 mmol/L 浓度,B 比例盐碱胁迫下高羊茅种子相对盐害率相较于 A 比例盐碱胁迫升高了 333.3%,与 C、D 和 E 比例盐碱胁迫下高羊茅种子相对盐害率相比,均差异显著($P < 0.05$)(表 5)。

表5 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅种子的相对盐害率

浓度/(mmol·L ⁻¹)	A	B	C	D	E
100	2.56±1.32 ^{bD}	1.54±0.84 ^{bD}	44.10±1.54 ^{bC}	71.79±1.75 ^{bB}	94.87±1.03 ^{bA}
200	16.92±1.78 ^{aC}	73.33±6.65 ^{aB}	100.00±0.00 ^{aA}	100.00±0.00 ^{aA}	100.00±0.00 ^{aA}

2.2 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅幼苗生长的影响

2.2.1 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅幼苗地上部分的影响 除 A 比例,在相同比例下,其他比例盐碱溶液处理均呈现随浓度升高,高羊茅幼苗苗长显著降低的趋势,A 比例混合盐碱溶液处理下,高羊茅

幼苗苗长随着浓度增加先上升后下降。100 mmol/L 浓度下,高羊茅幼苗苗长按 A、B、C、D、E 比例而显著降低($P < 0.05$);200 mmol/L 浓度下,A 比例盐碱胁迫高羊茅幼苗生长显著高于 B 比例($P < 0.05$),而 C、D 和 E 比例下高羊茅未生长幼苗,综合 100、200 mmol/L 浓度,表明不同比例盐碱溶液对高羊茅幼苗生长胁迫

程度由低到高为A<B<C<D<E。

叶片总长度、叶片总表面积与苗长整体趋势一致。随浓度升高,B、C、D、E比例盐碱溶液处理的叶片总长度均呈现随浓度升高的趋势,而A比例混合盐碱溶液处理下,叶片总长度、叶片总表面积随着浓度增加先上升后下降,100 mmol/L浓度下,高羊茅幼苗叶片总长度受胁迫程度由低到高为A<B<C<D<E,200 mmol/L浓度下,A比例盐碱胁迫高羊茅幼苗叶片总长度显著高于B比例($P<0.05$),而C、D和E比例下高羊茅未生长幼苗。

在相同比例下,100 mmol/L浓度盐碱胁迫高羊茅幼苗叶片总表面积均高于200 mmol/L浓度处理,200 mmol/L浓度盐碱胁迫下高羊茅幼苗叶片总表面积相较于100 mmol/L浓度处理在A、B、C、D、E比例下分别降低了11.4%、51.7%、100%、100%、100%,除A比例差异不显著外,其他处理均呈现随浓度升高,高羊茅幼苗叶片总表面积显著降低的趋势($P<0.05$),A

比例混合盐碱溶液处理下,高羊茅幼苗叶片总表面积随着浓度增加先上升后下降。100 mmol/L浓度下,高羊茅幼苗叶片总表面积随着比例改变而显著降低($P<0.05$),200 mmol/L浓度下,B比例盐碱胁迫下高羊茅叶片总表面积相较于A比例处理降低了62.7%,而C、D和E比例下高羊茅未生长幼苗。

不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅幼苗叶片宽度的影响差异不显著。A、B、C、D比例下,100 mmol/L浓度盐碱胁迫高羊茅幼苗叶片宽度低于对照组,但是E比例下,对照组高羊茅幼苗叶片宽度高于100 mmol/L浓度,可能是此时的幼苗较矮小,叶片尚未纵向生长。200 mmol/L浓度下A、B比例下叶片宽度高于100 mmol/L浓度处理、低于对照组,C、D、E高羊茅未生长幼苗。100 mmol/L浓度下,高羊茅幼苗叶片宽度差异不显著,同时200 mmol/L浓度下,A、B比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗叶片宽度差异不显著,C、D和E比例下高羊茅未生长幼苗(表6)。

表6 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗苗长、叶片总长度、叶片总表面积、叶片宽度

Table 6 Seedling length, total leaf length, total leaf surface area and leaf width of *Festuca arundinacea* seedlings under different concentrations and different proportions of saline-alkali stress

浓度/(mmol·L ⁻¹)	幼苗苗长/cm				
	A	B	C	D	E
0	5.00±0.08 ^{ba}	5.00±0.08 ^{aa}	5.00±0.08 ^{aa}	5.00±0.08 ^{aa}	5.00±0.08 ^{aa}
100	5.72±0.12 ^{aA}	3.91±0.07 ^{bb}	2.80±0.18 ^{bc}	2.22±0.06 ^{bd}	1.62±0.06 ^{be}
200	5.07±0.08 ^{ba}	1.89±0.06 ^{eb}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{ec}
	叶片总长度/(mm·株 ⁻¹)				
0	901.10±54.28 ^{aA}	901.10±54.28 ^{aA}	901.10±54.28 ^{aA}	901.10±54.28 ^{aA}	901.10±54.28 ^{aA}
100	1067.10±25.10 ^{aA}	868.11±22.51 ^{ab}	590.16±41.03 ^{bc}	469.50±14.75 ^{bd}	86.67±14.12 ^{be}
200	936.95±69.71 ^{aA}	359.02±14.45 ^{bb}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{bc}
	叶片总表面积/(mm ² ·株 ⁻¹)				
0	681.43±62.61 ^{aA}	681.43±62.61 ^{aA}	681.43±62.61 ^{aA}	681.43±62.61 ^{aA}	681.43±62.61 ^{aA}
100	772.21±37.52 ^{aA}	627.84±26.52 ^{ab}	437.24±40.87 ^{bc}	337.06±20.21 ^{bd}	67.24±12.59 ^{be}
200	676.95±65.20 ^{aA}	266.60±11.62 ^{bb}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{ec}	0.00±0.00 ^{bc}
	叶片宽度/mm				
0	1.27±0.06 ^{aA}	1.27±0.06 ^{aA}	1.27±0.06 ^{aA}	1.27±0.06 ^{aA}	1.27±0.06 ^{aA}
100	1.22±0.06 ^{aA}	1.21±0.04 ^{aA}	1.22±0.03 ^{aA}	1.20±0.04 ^{aA}	1.34±0.06 ^{aA}
200	1.23±0.06 ^{aA}	1.23±0.02 ^{aA}	0.00±0.00 ^{bb}	0.00±0.00 ^{bb}	0.00±0.00 ^{bb}

2.2.2 不同浓度、不同比例盐碱胁迫对高羊茅幼苗地下部分的影响 随着盐碱胁迫浓度升高,高羊茅幼苗根长逐渐变短,高羊茅幼苗根长按A、B、C、D、E顺序逐渐变短。除E比例盐碱胁迫下高羊茅未生长根系外,相同比例盐碱处理下高羊茅幼苗根长随着盐碱浓度的升高而降低,200 mmol/L浓度盐碱胁迫高羊茅幼

苗根长相较于100 mmol/L浓度盐碱胁迫在A比例盐碱胁迫降低了65.2%,差异显著($P<0.05$)。100 mmol/L浓度下,高羊茅幼苗根长由高到低为A>B>C>D>E,而200 mmol/L浓度下,仅A比例处理下高羊茅生长了根系,B、C、D、E比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗未生长根系(表7)。

根系总长、根尖数、根系总表面积与根长趋势一致。除E比例盐碱胁迫下高羊茅未生长根系外,相同比例盐碱处理下高羊茅幼苗根系总长随着盐碱浓度的升高而降低,A比例下200 mmol/L浓度盐碱胁迫处理的高羊茅幼苗相较于100 mmol/L浓度盐根长降低了43.7%,根尖数降低了18.3%,根系总表面积降低了51.8%。100 mmol/L浓度下,高羊茅幼苗根系总长由高到低为A>B>C>D>E,200 mmol/L浓度下,仅有A比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗有根生长。

A比例下,对照组幼苗根系直径低于盐碱处理下,而且100 mmol/L浓度盐碱胁迫高羊茅幼苗根系直径相较于同比例200 mmol/L浓度盐碱胁迫升高11.9%,A比例不同浓度之间根系直径差异不显著,B、C、D、E比例盐碱胁迫在200 mmol/L浓度下高羊茅未生长根。100 mmol/L浓度下,E比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗未生长根,A、B、C、D比例下高羊茅幼苗根系直径差异不显著。

表7 不同浓度和不同比例盐碱胁迫下高羊茅幼苗地下部分变化

Table 7 Underground changes of *Festuca arundinacea* seedlings under different concentrations and different proportions of salt and alkali stress

浓度 (mmol·L ⁻¹)	根长/cm				
	A	B	C	D	E
0	7.04±0.45 ^{aA}				
100	2.33±0.02 ^{bA}	1.05±0.20 ^{bB}	0.39±0.09 ^{bC}	0.11±0.05 ^{bCD}	0.00±0.00 ^{bD}
200	0.81±0.17 ^{cA}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}
根系总长/(mm·株 ⁻¹)					
0	1357.16±141.46 ^{aA}				
100	471.71±15.02 ^{bA}	336.08±39.33 ^{bB}	135.5±9.22 ^{bC}	41.35±15.38 ^{bD}	0.00±0.00 ^{bD}
200	265.50±40.81 ^{bA}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}
根尖数/(个·株 ⁻¹)					
0	142.33±4.87 ^{aA}				
100	45.00±4.02 ^{bA}	41.25±1.38 ^{bA}	29.00±2.04 ^{bB}	8.75±2.95 ^{bC}	0.00±0.00 ^{bD}
200	36.75±6.80 ^{bA}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}
根系总表面积/(mm ² ·株 ⁻¹)					
0	613.20±55.79 ^{aA}				
100	267.82±13.67 ^{bA}	193.17±18.68 ^{bB}	6.63±10.34 ^{bC}	21.43±7.79 ^{bD}	0.00±0.00 ^{bD}
200	129.10±18.46 ^{cA}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}
根系直径/mm					
0	0.74±0.04 ^{bA}	0.74±0.04 ^{bA}	0.74±0.04 ^{aA}	0.74±0.04 ^{aA}	0.74±0.04 ^{aA}
100	0.92±0.02 ^{aA}	0.95±0.10 ^{aA}	0.81±0.09 ^{aA}	0.66±0.22 ^{aA}	0.00±0.00 ^{bB}
200	0.81±0.08 ^{aA}	0.00±0.00 ^{cB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}	0.00±0.00 ^{bB}

3 讨论

3.1 不同浓度、不同比例混合盐碱对高羊茅种子萌发的影响

土地盐碱化问题在世界各国的农业生产中广泛存在,除在沿海地区,由于受海水浸渍影响而发生盐碱化外,一般的土壤盐碱化主要发生在干旱和半干旱地区^[6]。各国科学家一直致力盐碱土地的改良和耐盐碱植物品种的研发,而种子作为植物幼体,其顺利萌发是植物生长发育的前提,为此研究不同浓度、不同

比例混合盐碱对植物种子萌发的影响具有重要意义。

不同浓度混合盐碱溶液对高羊茅种子萌发的相关数据表明,高羊茅种子萌发在100 mmol/L浓度盐碱胁迫下受到一定程度的盐碱胁迫,而200 mmol/L浓度盐碱胁迫对高羊茅种子萌发的影响显著高于100 mmol/L浓度处理。通过分析高羊茅种子萌发数据,表明随着混合盐碱的浓度升高,高羊茅种子发芽率、发芽势和发芽指数均显著降低,相对发芽率、相对发芽势、相对发芽指数降低,同时浓度升高也伴随着

高羊茅种子相对盐害率升高,即浓度升高会导致高羊茅种子萌发受到的盐碱胁迫程度升高。此结果与兰艳等^[7]对3种稗属牧草种子萌发、王智威^[8]对矮牵牛种子萌发、卢艳敏^[9]对高羊茅种子萌发、陈雅琦^[10]对醉马草种子萌发的研究结果相似。

国内外对植物盐害或碱害的研究主要集中在单一盐或者单一碱上,在混合盐碱胁迫研究中,主要在草本植物、农作物、牧草等方面较多^[11]。不同比例混合盐碱对高羊茅种子萌发的影响有很大差异。在总浓度 100 mmol/L 的条件下,在不同比例混合盐碱处理下高羊茅种子的发芽势、发芽指数、相对发芽势、相对发芽指数指标值由低到高为 A、B、C、D、E,说明不同比例对高羊茅种子发芽的抑制程度由低到高为 $A < B < C < D < E$,而 B 比例混合盐碱胁迫高羊茅种子的发芽率、相对发芽率、盐害率指标值高于 A 比例盐碱胁迫处理,差异不显著;在总浓度 200 mmol/L 的条件下,仅有 A、B 比例盐碱胁迫处理下的高羊茅种子发芽,各项指标值大小均为 A 比例盐碱胁迫下大于 B 比例同指标值,C、D、E 比例盐碱胁迫处理下的高羊茅种子未发芽,综合来看不同比例对高羊茅种子发芽指数的抑制程度由低到高为 $A < B < C < D < E$,在低浓度条件下,A、B 比例盐碱胁迫对高羊茅种子发芽率影响相近,而发芽势、发芽指数等指标则是 $A > B$,说明 A 比例混合盐碱对高羊茅种子萌发的胁迫程度高于 B 比例,但是 B 比例混合盐碱的影响效果会随着时间的延长而降低,直至 A、B 比例混合盐碱影响效果相近,可能有两个原因,1) B 比例混合盐碱中的 NaHCO_3 由于时间的延长浓度下降,使培养环境接近于 A 比例混合盐碱,种子萌发率提高;2) 结合王红玲等^[12]的研究,高羊茅在中性盐或者低碱的低浓度盐溶液中可能通过渗透调节作用维持其膜系统稳定,保护其不受盐逆境侵害,对胁迫有一定程度的抵抗能力。不同比例对高羊茅种子发芽指数的抑制程度由低到高为 $A < B < C < D < E$,同时溶液碱性由低到高为 $A < B < C < D < E$,混合溶液中碱性盐,尤其是 Na_2CO_3 所占比例越多,pH 越高,则对高羊茅种子萌发的胁迫程度越强,这与毕春竹等^[13]处理沙枣种子,陈金元等^[14]处理红砂种子萌发影响,时丽冉等处理旱稻种子^[15]和玉米种子^[16],结论相一致。

3.2 不同浓度、不同比例混合盐碱对高羊茅幼苗生长的影响

幼苗是否正常生长,胚根是否长出以及长出的长度、数目是衡量幼苗正常生长的关键指标^[17]。本试验结果表明,随着混合盐碱浓度的升高,高羊茅幼苗生长指标逐渐减小,种比例对高羊茅幼苗生长的胁迫程度由低到高为: $A < B < C < D < E$ 。

高羊茅幼苗在 100 mmol/L 浓度混合盐碱胁迫下的苗长、叶片总长度、叶片总表面积、根长、根系总长度、根尖数、根系总表面积均高于同比例下 200 mmol/L 浓度盐碱胁迫处理,叶宽、根系直径在混合盐碱浓度变化时未产生显著变化,100 mmol/L 浓度、A 比例混合盐碱胁迫高羊茅幼苗叶指标高于对照组,而根指标则低于对照组,200 mmol/L 浓度 C、D、E 比例混合盐碱处理下高羊茅种子未萌发、无幼苗体,100 mmol/L 浓度、E 比例混合盐碱处理与 200 mmol/L 浓度、B、C、D、E 比例混合盐碱处理无胚根,说明高羊茅幼苗根叶对混合盐碱胁迫有一定程度的抵抗能力,而且低浓度中性盐溶液对高羊茅幼苗叶的生长有促进作用,但是随着混合盐碱溶液浓度升高,高羊茅幼苗叶的生长受到的胁迫程度升高,高浓度、高碱性混合盐碱会导致高羊茅幼苗的生长被彻底抑制,胚根对混合盐碱的抵抗性弱于高羊茅幼苗叶,可能原因是根与混合盐碱溶液直接接触,导致根受到了更严重的胁迫,高 pH 生长环境使植物体内离子平衡失调, Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 和 H_2PO_4^- 等离子沉淀析出,严重抑制植物生长^[18-19]。这与于明倩等^[20]处理紫花苜蓿幼苗、王玲丽等^[21]处理孔雀草得出的结论一致,而李淑梅等^[22]研究高羊茅幼苗、禹世豪等^[23]研究沙枣幼苗的结论是幼苗的生长不完全随着盐碱浓度的升高而被抑制,低浓度盐碱胁迫可促进幼苗生长、高浓度下抑制生长,浓度越大、混合盐碱对高羊茅幼苗生长的胁迫程度越强。可能是不同植物种间存在差异,或本试验混合盐碱浓度设置过高,缺少较低浓度的处理,导致未表现出低浓度盐碱胁迫可促进幼苗生长的现象。

在总浓度 100 mmol/L 的条件下,在不同比例混合盐碱处理下高羊茅幼苗的苗长、叶片总长度、叶片总表面积、根长、根系总长度、根尖数、根系总表面积指标值由低到高为 $A < B < C < D < E$,叶宽、根系直径在混合盐碱比例变化时未产生显著变化,在总浓度

200 mmol/L的条件下,仅有A比例盐碱胁迫处理下的高羊茅幼苗生长了胚根,B比例盐碱胁迫处理下的高羊茅幼苗无胚根,苗长、叶片总长度、叶片总表面积指标值均为A比例盐碱胁迫下大于B比例同指标值,C、D、E比例盐碱胁迫处理下高羊茅种子未萌发、无幼苗体。说明不同比例混合盐碱对高羊茅种子幼苗根叶生长情况的胁迫程度由低到高为 $A < B < C < D < E$,叶宽、根系直径未受显著影响。试验表明混合溶液中碱性盐,尤其是 Na_2CO_3 所占比例越多,pH值升高,则对高羊茅幼苗根叶生长的胁迫程度越强。这与李玉明等^[24]处理高粱幼苗、武德等^[25]处理刺槐得出的结论基本一致。

4 结论

随着混合盐碱浓度的升高,高羊茅种子萌发指标逐渐降低,5种比例对高羊茅种子萌发的胁迫程度由低到高为: $A < B < C < D < E$;混合盐碱溶液对高羊茅种子萌发和幼苗生长的抑制作用随着溶液浓度升高、碱性盐占比,尤其是 Na_2CO_3 占比的增多而增强,即碱性越强,抑制作用越强,其中高羊茅幼苗根受到的抑制程度高于叶。

参考文献:

- [1] 王佳珍,刘倩,高娅妮,等.植物对盐碱胁迫的响应机制研究进展[J].生态学报,2017,37(16):5565—5577.
- [2] 李彬,王志春,孙志高,等.中国盐碱地资源与可持续利用研究[J].干旱地区农业研究,2005,23(2):154—158.
- [3] 樊丽琴,杨建国,许兴,等.宁夏引黄灌区盐碱地土壤盐分特征及相关性[J].中国农学通报,2012,28(35):221—225.
- [4] 樊瑞苹,周琴,周波,等.盐胁迫对高羊茅生长及抗氧化系统的影响[J].草业学报,2012,21(1):112—117.
- [5] 颜启传.种子学[M].北京:农业出版社,2001:112—113.
- [6] 宇振荣,王建武.中国土地盐碱化及其防治对策研究[J].农村生态环境,1997,13(3):2—6.
- [7] 兰艳,朱林,王/甜甜,等.混合盐碱胁迫对3种稗属牧草种子萌发的影响[J].种子,2022,41(3):37—44.
- [8] 王智威,苏冉,杜文秀,等.混合盐碱胁迫对矮牵牛种子萌发的影响[J].天津农业科学,2021,27(5):1—4.
- [9] 卢艳敏.不同盐胁迫对高羊茅种子萌发的影响[J].草业科学,2012,29(7):1088—1093.
- [10] 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.
- [11] 何磊,陆兆华,管博,等.盐碱胁迫对甜高粱种子萌发及幼苗生长的影响[J].东北林业大学学报,2012,40(3):67—71.
- [12] 王红玲,阿不来提·阿不都热依木,齐曼. Na_2SO_4 胁迫下狗牙根 K^+ 、 Na^+ 离子分布及其抗盐性的评价[J].中国草地,2004,26(5):38—43.
- [13] 毕春竹,肖可,郭子燕,等.混合盐碱胁迫对不同种源沙枣种子萌发的影响[J].北方园艺,2021(16):89—93.
- [14] 陈金元,陈学林,满吉琳,等.混合盐碱胁迫对红砂种子萌发的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2016,44(5):113—119.
- [15] 时丽冉,崔兴国,刘志华,等.混合盐碱胁迫对旱稻种子萌发的影响[J].种子,2006,25(2):25—27+31.
- [16] 时丽冉.混合盐碱胁迫对玉米种子萌发的影响[J].衡水学院学报,2007,9(1):13—15.
- [17] Li R L, Shi F C, Fukuda K J. Interactive effects of salt and alkali stresses on seed germination, germination recovery, and seed-ling growth of a halophyte *Spartina alterniflora* (Poaceae). South African Journal of Botany, 2010,76(2):380—387.
- [18] Shi D C, Zhao K F. Effects of NaCl and Na_2CO_3 on growth of *Puccinelliatenuiflora* and on present state of mineral elements in nutrient Solution. Acta Prataculturae-Sinica, 1997,6:51—61.
- [19] Song J, Feng G, Tian C Y, et al. Strategie for adaptation of *Suaedaphysophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a Saline environment during seed germination stage. Annals of Botany, 2005, 96 (3) : 399—405.
- [20] 于明倩,胡亚娜,田雨.混合盐碱胁迫对紫花苜蓿幼苗生长和生理特性的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2021(22):109—112.
- [21] 王玲丽,石永亮,李小珊,等.混合盐碱胁迫对孔雀草生长的影响[J].北方园艺,2021(12):63—69.
- [22] 李淑梅,董丽平.混合盐碱胁迫对高羊茅种子萌发及幼苗生理生化特性的影响[J].黑龙江畜牧兽医,2016(6):139—140.
- [23] 禹世豪,毕春竹,耿红凯,等.混合盐碱胁迫对不同种源沙枣幼苗的影响[J].东北林业大学学报,2021,49(12):8—14+83.

- [24] 李玉明,石德成,李毅丹,等. 混合盐碱胁迫对高粱幼苗的影响[J]. 园艺与种苗,2002,22(1):41-45.
- [25] 武德,曹帮华,刘欣玲,等. 混合盐碱胁迫对刺槐种子萌发的影响[J]. 安徽农学通报,2006,12(13):157-159.

Effects of mixed saline-alkali stress on seed germination and seedling growth of *Festuca arundinacea*

XU Qiu-rui¹, DUAN Ting-yu¹, CHAI Qi^{2*}

(1. State Key Laboratory of Herbage Improvement and Grassland Agro-ecosystems, College of Pastoral Agriculture Science and Technology, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China; 2. Key Laboratory of Grassland Livestock Industry Innovation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Lanzhou University, Lanzhou 730020, China)

Abstract: 【Objective】 To study the effects of saline-alkali solution with different concentrations and proportions on the seed germination and seedling growth of *Festuca arundinacea*, 【Method】 The experiment used *Festuca arundinacea* as the experimental material, and neutral salts (NaCl, Na₂SO₄) and alkaline salts (NaHCO₃, Na₂CO₃) are mixed according to a certain molar ratio. According to the order of NaCl:Na₂SO₄:NaHCO₃:Na₂CO₃, they are divided into five combinations: A (1:1:0:0), B (1:2:1:0), C (1:9:9:1), D (1:1:1:1), and E (9:1:1:9). The total concentration of the mixed salt alkali treatment solution is set at 100 and 200 mmol/L. By measuring and analyzing the seed germination and seedling growth indicators of *Festuca arundinacea*. 【Result】 It was found that with the increase of the mixed saline-alkali concentration, the germination rate, germination potential, germination index, relative germination rate, relative germination potential, relative germination index, seedling length, total leaf length, total leaf surface area, root length, total root length, total root surface area, and lateral root number of *Festuca arundinacea* decreased. At the same time, the relative salt damage rate increased. 200 mmol/L solution of C, D, E completely inhibited the germination of *Festuca arundinacea* seeds. 【Conclusion】 Five different proportions of mixed saline-alkali have different degrees of inhibition on the seed germination and seedling growth of *Festuca arundinacea*, and the degree of stress is from low to high: A<B<C<D<E, that is, the higher the proportion of alkaline salts, especially Na₂CO₃, and the higher the pH in the mixed solution, the stronger the stress on the germination of *Festuca arundinacea* seeds and the growth of seedling roots and leaves.

Key words: mixed saline-alkali; *Festuca arundinacea*; seed germination; seedling growth; germination rate; salt tolerance

(责任编辑:靳奇峰)