

系损伤^[5]。不同瓜类蔬菜耐盐碱性有一定差异^[6],其中黄瓜对盐碱胁迫较为敏感^[7]。盐碱胁迫会显著抑制黄瓜幼苗的生长和发育,株高、茎粗、叶面积、叶片数、叶片干质量、叶片鲜质量等显著降低^[2],严重情况下会导致叶片变黄、叶缘焦枯、根系减少等症状^[8];盐碱胁迫会引起细胞内Na⁺的积累,从而导致Na⁺/K⁺的失衡,影响叶绿素的合成与降解,导致光合作用和植物生长受到抑制^[9]。黄瓜种子萌发期和幼苗期对盐碱胁迫更为敏感,在盐碱胁迫下,因渗透和离子毒害作用,种子内部代谢受到影响,核酸、蛋白质等物质的合成受到抑制,导致种子萌发延迟甚至不能萌发^[10]。杨迎月等^[11]研究也发现,不同盐碱浓度对种子的萌发和幼苗生长的影响不同。

设施栽培环境盐渍化土壤中阳离子主要是Na⁺、K⁺、Ca²⁺等,阴离子主要是HCO⁻、Cl⁻、SO₄²⁻等。基于此,本研究采用3种不同品种的黄瓜种子在不同浓度NaCl、Na₂CO₃和NaHCO₃处理下来模拟盐胁迫和碱胁迫,对黄瓜进行耐盐性和耐碱性的对比和评价,以期对盐碱地农业生产中耐盐碱的黄瓜种子

选育提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于2024年3—5月在重庆三峡职业学院种子检验实验室进行。该地区位于中国内陆西南部、长江上游,属亚热带季风性湿润气候。实验室配备光照发芽箱、超净工作台、精密电子天平等仪器设备。

1.2 材料

供试黄瓜品种白丝条由重庆市渝澳农业开发有限公司提供,属于华南型黄瓜,果实圆筒形,嫩瓜呈嫩绿白色,表面带有白色条纹,刺瘤稀疏且刺毛为浅白色,是重庆地区常见品种。爬满架由寿光欣欣园艺有限公司提供,属于地爬型黄瓜,果实呈长圆柱形,果皮绿色,表皮光滑,可能带有浅纵棱或稀疏瓜刺,为重庆地方品种。绿如意由宁阳县鲁明种子有限公司提供,属于华南型黄瓜,果实呈棒形,果实颜色为浅绿色,果肉也为浅绿色,瓜把短,刺瘤密,为重庆常见品种。种子特性详见表1。

表1 供试材料
Table 1 Test materials

品种 Variety	种质类型 Germplasm type	性状 Character	纯度 Purity/%	净度 Cleanliness/%	发芽率 Germination rate/%	含水量 Water content/%
白丝条 Baisitiao	常规种 Conventional cultivar	早熟品种,生长势强 Early-maturing and strong-growth varieties	≥95	≥99	≥85	≤8
绿如意 Lüruyi	杂交种 F ₁ Hybrid F ₁	杂交强雌品种,茎蔓粗壮 Hybrid strong female and thick stem varieties	≥95	≥99	≥89	≤7.5
爬满架 Pamanjia	杂交种 F ₁ Hybrid F ₁	早熟,高产品种,生长势强 Early-maturing, high yield and strong-growth varieties	≥95	≥99	≥90	≤8

1.3 种子预处理

试验在重庆三峡职业学院种子检验实验室进行。选用颗粒饱满、大小均匀一致的各供试材料种子,每个处理50粒种子。3个供试品种种子先用0.1%高锰酸钾消毒3 min,再用蒸馏水冲洗干净,然后用蒸馏水浸泡3 h后用纱布过滤,备用。

1.4 种子发芽试验

参考农作物种子检验规程 GB/T 3543.4—2025^[12],采用纸上发芽法,将种子均匀地铺于有2层发芽纸的培养皿(直径9 cm)内,一个处理1皿。每个培养皿分别加入5 mL配制好的不同浓度的盐碱溶液,Na₂CO₃、NaHCO₃和NaCl溶液浓度分别为50、100、150、200、250、300 mmol·L⁻¹,以蒸馏水为对

照,共19个处理,每个处理4次重复。

1.5 观察与记录

将培养皿放在(25±2)℃的恒温光照培养箱内培养,每日以称质量法补充所挥发水分的相对应的蒸馏水,使各处理盐碱溶液浓度保持不变。第2天开始记录,每隔24 h记录1次种子发芽数及芽苗状态。第4天统计发芽势,第8天统计发芽率。记录并计算种子的耐盐碱能力,并进行耐盐碱性综合评价。

1.5.1 发芽指标 (1)发芽率/%=第8天正常发芽种子粒数/供试种子粒数×100;

(2)发芽势/%=第4天正常发芽种子粒数/供试种子粒数×100;

(3)发芽指数= $\sum Gt/Dt$ 。

上式中: Gt 为第 t 天发芽的种子数, Dt 为发芽的天数。

按照发芽率、发芽势和发芽指数的值,分别计算相对值。

(4)相对发芽率/%=各处理发芽率/对照发芽率 $\times 100$;

(5)相对伤害率/%=(对照发芽率-各处理发芽率)/对照发芽率 $\times 100$;

(6)相对发芽势/%=各处理发芽势/对照发芽势 $\times 100$;

(7)相对发芽指数/%=各处理发芽指数/对照发芽指数 $\times 100$ 。

1.5.2 种子的耐盐碱能力 (1)耐盐/碱适宜范围(%):相对发芽率达到75%以上的盐/碱溶液浓度。(2)耐盐/碱半致死浓度(%):相对发芽率达到50%时的盐/碱溶液浓度。(3)耐盐/碱致死浓度(%):相对发芽率达到10%时的盐/碱溶液浓度。

1.5.3 耐盐碱性综合评价 为评估3个品种黄瓜种子在盐碱胁迫萌发期的耐盐碱性,选用相对发芽率、相对发芽势及相对发芽指数3项指标,采用隶属函数法^[13]计算综合隶属函数值,作为耐盐碱性的量化评价依据。

隶属函数值 $X_{ij}=(X_j-X_{jmin})/(X_{jmax}-X_{jmin})$, 平均隶属函数 $U_a=\sum X_{ij}/n$ 。

式中: X_{ij} 表示 i 黄瓜种子 j 指标的隶属函数值; X_j 表示 i 黄瓜种子 j 指标的相应值; X_{jmax} 和 X_{jmin} 则表示 i 黄瓜种子在 j 指标中相对应的最大值和最小值。 U_a 为平均隶属函数值,数值越大,表示耐碱性越强。

1.6 数据分析

利用 Excel 2016 对各生长指标数据进行整理计算,再使用 DPS 9.01 进行方差分析和线性回归分析。采用 Excel 2016 绘图。

2 结果与分析

2.1 不同浓度盐碱胁迫对3种黄瓜种子发芽势和相对发芽势的影响

由图1可知,3种黄瓜种子的发芽势和相对发芽势均随着 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 胁迫浓度的增加而呈现明显下降趋势。当胁迫浓度 $\geq 200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Na_2CO_3 胁迫导致种子发芽势为0,而其他2种盐碱胁迫下种子仍有发芽势,故 Na_2CO_3 胁迫对黄瓜种子发芽势影响更大。

不同浓度的 Na_2CO_3 胁迫对3个品种黄瓜种子发芽势和相对发芽势的影响均较大,且3个品种的黄瓜种子在不同浓度 Na_2CO_3 胁迫下的发芽势与对照有显著差异。在 $\geq 200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下的发芽势都为0,由此可见,在高浓度 Na_2CO_3 胁迫下3种黄瓜种子的发芽势都会受到严重抑制。其中,爬满架品种在 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下的发芽势与对照相比没有显著差异, $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 与 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下的相对发芽势之间也无显著差异,说明低浓度的 Na_2CO_3 胁迫对爬满架品种的发芽势影响较小。白丝条品种在 $200 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下的相对发芽势为1.59%,其他2个品种均为0,说明白丝条品种耐高浓度 Na_2CO_3 胁迫性相对更强。

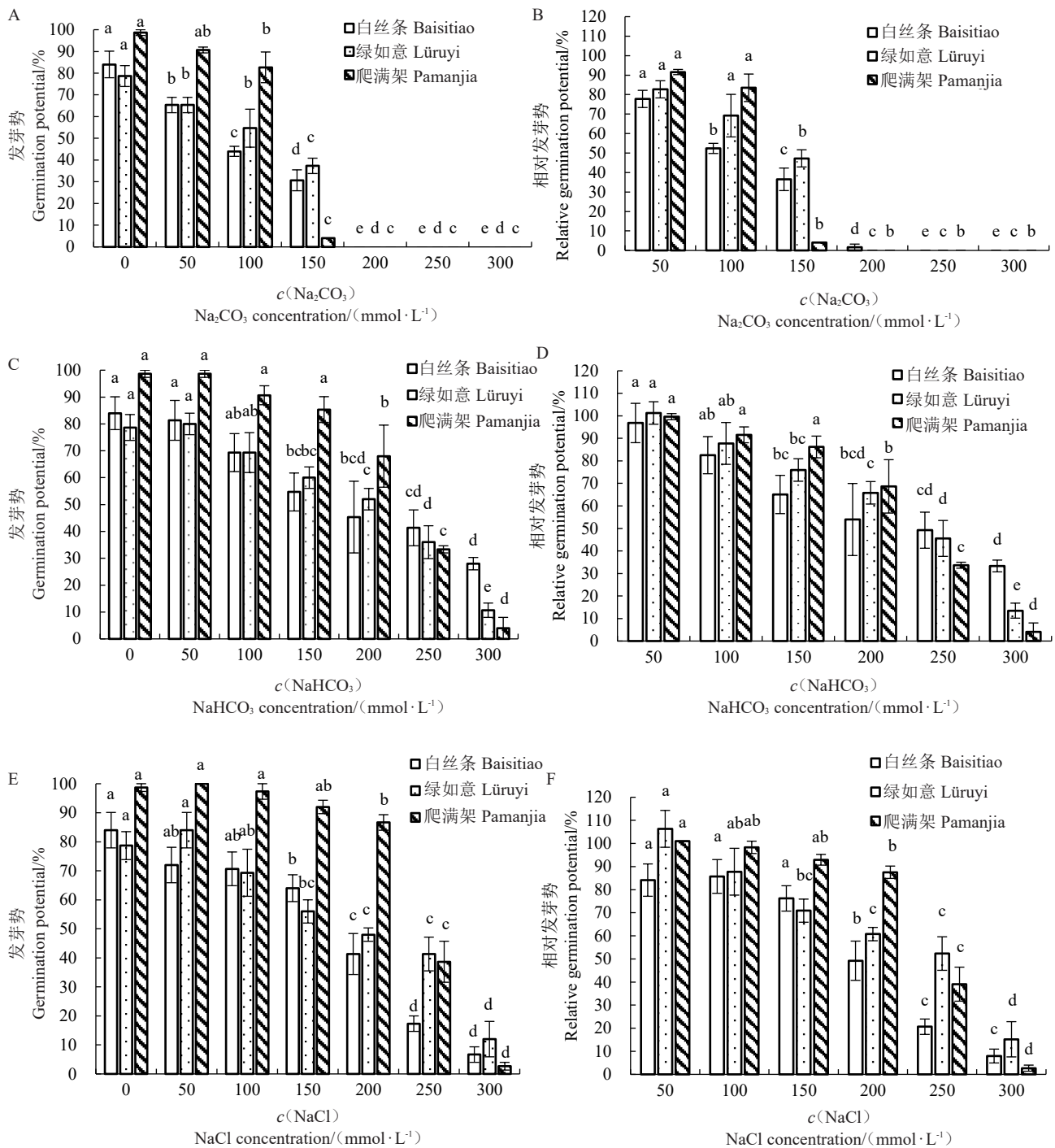
不同浓度的 NaHCO_3 和 NaCl 胁迫对3个品种黄瓜种子发芽势和相对发芽势的影响也较大,且存在显著差异。当 NaHCO_3 和 NaCl 的浓度 $\leq 100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3个品种黄瓜种子的发芽势与对照无显著差异,说明低浓度的 NaHCO_3 胁迫对3个品种黄瓜的发芽势无显著影响。且当 NaHCO_3 和 NaCl 浓度为 $150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,爬满架品种的发芽势与对照均无显著差异,说明爬满架品种的耐 NaHCO_3 或 NaCl 胁迫能力相对更强。

2.2 不同浓度盐碱胁迫对3种黄瓜种子发芽率和相对发芽率的影响

由图2可知,3个品种黄瓜种子的发芽率和相对发芽率均随着 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 胁迫浓度的增加而呈现明显下降趋势。当浓度达到 $300 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, Na_2CO_3 胁迫下的3种黄瓜种子均不发芽,但 NaHCO_3 、 NaCl 胁迫下的3种黄瓜种子仍有发芽率。由此可见, Na_2CO_3 胁迫对黄瓜种子发芽率影响更大。

3个品种黄瓜种子在 Na_2CO_3 胁迫下的发芽率与对照存在显著差异。除爬满架品种黄瓜种子的发芽率在 $50 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下与对照相比无显著差异外,其他处理与对照均存在显著差异,说明不同浓度 Na_2CO_3 胁迫对3种黄瓜种子的发芽率影响都很大。同在 50 、 $100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ Na_2CO_3 胁迫下,3个品种中仅白丝条品种2个梯度之间的相对发芽率有差异,说明该品种对 Na_2CO_3 胁迫更为敏感。

当 NaHCO_3 的浓度 $\leq 150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,爬满架和绿如意2个品种黄瓜种子的发芽率与对照无显著差异, 50 、 100 、 $150 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ NaHCO_3 胁迫下的相对发芽率之间也无显著差异;当 NaHCO_3 的浓度 $\leq 100 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,白丝条品种黄瓜种子的发芽



注:不同小写字母表示同一品种在不同浓度间差异显著。下同。

Note: Different lowercase indicate significant difference among different concentrations of the same variety at 0.05 level. The same below.

图1 不同浓度 Na₂CO₃、NaHCO₃、NaCl 胁迫下 3 个品种黄瓜种子的发芽势和相对发芽势

Fig. 1 Germination potential and relative germination potential of three cucumber seeds under different concentrations of Na₂CO₃, NaHCO₃ and NaCl stress

率与对照无显著差异,50、100 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 胁迫下的相对发芽率之间也无显著差异。由此可见,低浓度的 NaHCO₃ 盐碱胁迫对种子发芽率影响较小,且白丝条品种的耐 NaHCO₃ 胁迫能力相对较低。

当 NaCl 的浓度 ≤150 mmol·L⁻¹ 时,白丝条品

种黄瓜种子的发芽率与对照无显著差异,50、100、150 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下的相对发芽率也无显著差异;当 NaCl 的浓度 ≤100 mmol·L⁻¹ 时,绿如意品种黄瓜种子的发芽率与对照无显著差异,50、100 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下的相对发芽率也无

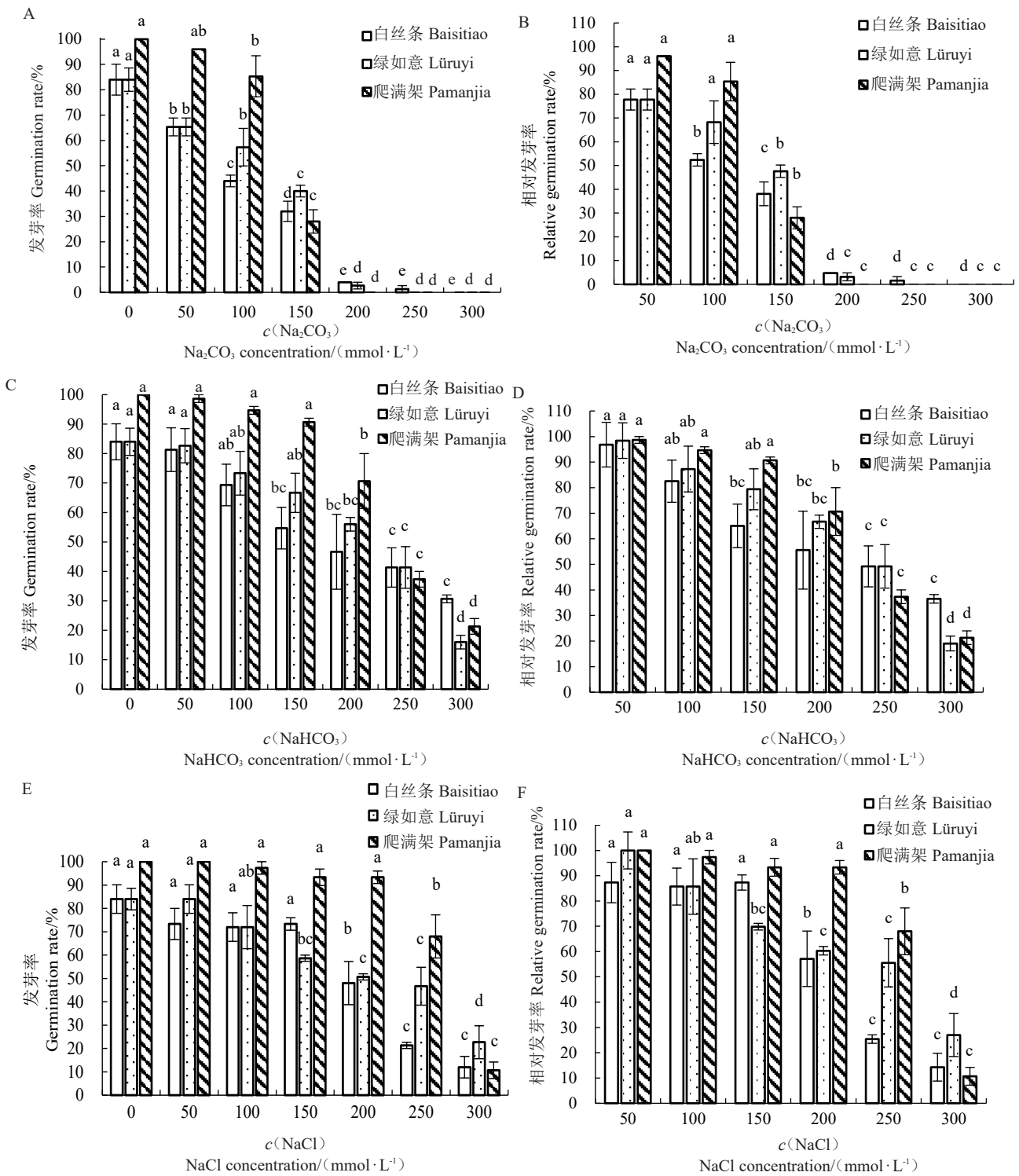


图2 不同浓度 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 胁迫下3种黄瓜种子的发芽率和相对发芽率

Fig. 2 Germination rate and relative germination rate of three cucumber seeds under different concentrations of Na_2CO_3 , NaHCO_3 and NaCl stress.

著差异;当 NaCl 的浓度 $\leq 200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,爬满架品种黄瓜种子的发芽率与对照无显著差异,50、100、150、200 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 胁迫下的相对发芽率也无显著差异。说明不同品种对 NaCl 胁迫有明显差异。

2.3 不同浓度盐碱胁迫对3种黄瓜种子相对发芽指数的影响

由表2可以看出,3个品种黄瓜种子相对发芽指数随着 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 、 NaCl 浓度的增高呈现明显下降趋势。

白丝条在 50~200 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 浓度胁迫下相对发芽指数有显著差异;绿如意在 50~100 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 浓度胁迫下对相对发芽指数没有显著差异, Na₂CO₃ 浓度达 150 mmol·L⁻¹ 时出现显著差异;爬满架在每个梯度的 Na₂CO₃ 胁迫下的相对发芽指数均有显著差异。另外,白丝条、绿如意、爬满架分别在 300、250、200 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 浓度胁迫下相对发芽指数开始出现 0 值。由此可知,不同品种黄瓜种子耐 Na₂CO₃ 胁迫能力不同。3 个品种黄瓜种子在 200、250、300 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 浓度胁迫下相对发芽指数均没有显著差异,说明 Na₂CO₃≥200 mmol·L⁻¹ 时,种子发芽明显受到抑制。

3 个品种黄瓜种子在 50 和 100 mmol·L⁻¹ 之间、200 和 250 mmol·L⁻¹ 之间 NaHCO₃ 胁迫下的相对发芽指数均无显著差异。白丝条、绿如意在 300 mmol·L⁻¹ NaHCO₃ 胁迫下相对发芽指数为 0,而此时爬满架的相对发芽指数可达 8.31%,因此爬满架耐 NaHCO₃ 胁迫能力明显较强。

3 个品种黄瓜种子在 50 和 100 mmol·L⁻¹ 之间 NaCl 胁迫下的相对发芽指数无显著差异,说明低浓度的 NaCl 胁迫对不同品种黄瓜种子发芽影响差异不大。在 300 mmol·L⁻¹ NaCl 浓度胁迫下,3 个品种黄瓜种子的相对发芽指数均未达到 0,说明该 3 个品种黄瓜种子耐 NaCl 胁迫能力均较强,且 3 种

表 2 不同浓度盐碱胁迫对种子相对发芽指数的影响

胁迫浓度 Stress concentration/ (mmol·L ⁻¹)	Na ₂ CO ₃			NaHCO ₃			NaCl		
	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia
50	88.12±3.06 a	81.80±5.29 a	92.43±1.76 a	96.17±7.02 a	99.60±6.06 a	98.58±1.76 a	91.98±11.89 a	101.77±10.02 a	101.12±0.33 a
100	45.95±3.21 b	71.50±8.84 a	58.22±5.49 b	72.94±8.39 ab	91.97±7.54 ab	90.61±5.04 ab	81.27±8.19 ab	90.28±12.13 a	94.98±2.65 a
150	22.95±3.61 c	31.47±3.28 b	10.66±2.03 c	56.71±7.62 bc	77.70±7.69 bc	83.17±3.06 b	65.41±1.2 b	67.16±4.36 b	85.96±2.96 b
200	1.30±0.33 d	1.12±0.58 c	0.00 d	44.96±13.25 cd	68.03±5.70 c	51.32±5.78 c	42.22±6.08 c	49.21±4.26 bc	61.51±2.19 c
250	0.77±0.67 d	0.00 c	0.00 d	36.62±5.90 cd	37.82±5.57 c	22.29±0.33 d	13.62±2.19 d	35.25±3.76 c	29.40±5.33 d
300	0.00 d	0.00 c	0.00 d	0.00 d	0.00 d	8.31±0.67 d	7.10±3.61 d	12.18±5.55 d	3.54±1.20 d

注:同列数据后不同小写字母表示在 0.05 水平差异显著。下同。

Note: Different lowercase letters in the same column indicate significant difference at 0.05 level. The same below.

盐碱胁迫中 NaCl 胁迫影响相对最小。

2.4 不同浓度盐碱胁迫对 3 种黄瓜种子相对伤害率的影响

由表 3 可以看出,3 个品种黄瓜种子的相对伤害率随着盐碱浓度的升高呈现明显的上升趋势,即盐碱胁迫的浓度越大,种子的伤害率就越大。绿如意和爬满架在 50 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下的相对伤害率为 0,说明低浓度的 NaCl 胁迫对这 2 个品种的黄瓜种子无伤害性。3 种盐碱胁迫中,仅 Na₂CO₃ 胁迫下出现了相对伤害率为 100% 的情况,说明 Na₂CO₃ 胁迫对黄瓜种子萌发影响最大。白丝条、绿如意和爬满架分别在 300、250、200 mmol·L⁻¹ Na₂CO₃ 胁迫下开始出现相对伤害率为 100%,白丝条、绿如意和爬满架种子分别在 150、100、100 mmol·L⁻¹ NaCl 胁迫下的相对伤害率出现显著变化,两者皆说明同一盐碱胁迫对不同品种种子萌发的相对伤害率有差异。白丝条品种分别在

Na₂CO₃、NaHCO₃、NaCl 的 200、250、150 mmol·L⁻¹ 胁迫下的相对伤害率出现显著变化,说明不同盐碱胁迫对同一品种种子萌发的相对伤害率均有差异。

2.5 Na₂CO₃ 胁迫与相对发芽率的相关性及耐盐碱效应

由表 4 可知,Na₂CO₃ 胁迫与 3 个品种黄瓜种子的相对发芽率均存在极显著相关性,且相关系数绝对值从高到低依次为白丝条>绿如意>爬满架。3 个品种黄瓜种子适宜盐碱浓度和半致死盐碱浓度从高到低分别为爬满架>绿如意>白丝条,其中 3 个品种黄瓜种子的半致死盐碱浓度范围在 118.89~136.71 mmol·L⁻¹。3 个品种黄瓜种子的致死盐碱浓度排序为绿如意>爬满架>白丝条,浓度范围在 230.00~238.35 mmol·L⁻¹。综上所述可以看出,爬满架品种种子的适宜 Na₂CO₃ 盐碱浓度和半致死盐碱浓度均最高,且致死盐碱浓度也较高,说明 Na₂CO₃ 胁迫

表3 不同浓度盐碱胁迫对种子相对伤害率的影响

Table 3 Effects of different concentrations of saline-alkali stress on relative damage rate of seeds %

胁迫浓度 Stress concentration/ (mmol·L ⁻¹)	Na ₂ CO ₃			NaHCO ₃			NaCl		
	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia	白丝条 Baisitiao	绿如意 Lüruyi	爬满架 Pamanjia
50	22.22±4.41 d	22.22±4.41 c	4.00±0.00 c	3.17±8.74 c	1.59±6.96 d	1.33±1.33 d	12.70±8.00 c	0.00±7.31 d	0.00 d
100	47.62±2.60 d	31.75±8.95 c	14.67±8.11 c	17.46±8.25 c	12.70±8.95 c	5.33±1.33 c	14.29±7.31 c	14.29±10.97 c	2.67±2.67 c
150	61.90±5.00 c	52.38±2.60 b	72.00±4.62 b	34.92±8.50 bc	20.63±8.00 bc	9.33±1.33 c	12.70±3.00 c	30.16±1.33 c	6.67±3.53 c
200	95.24±0.00 b	96.83±1.67 a	100.00±0.00 a	44.44±15.24 bc	33.33±2.60 ab	29.33±9.33 b	42.86±10.97 b	39.68±1.67 bc	6.67±2.67 c
250	98.41±1.67 b	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	50.79±8.00 ab	50.79±8.50 ab	62.67±2.67 a	74.60±1.67 a	44.44±9.56 b	32.00±9.24 b
300	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	100.00±0.00 a	63.49±1.67 a	80.95±2.89 a	78.67±2.67 a	85.71±5.49 a	73.02±8.50 a	89.33±3.53 a

表4 Na₂CO₃浓度与种子相对发芽率的相关分析及耐盐碱性的测定

Table 4 Correlation analysis between Na₂CO₃ concentration and relative germination rate of seeds and determination of saline-alkali tolerance

品种 Variety	一元回归方程 Univariate regression equation	F 值 F value	相关系数 Correlation coefficient	适宜盐碱浓度 Suitable saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	半致死盐碱浓度 Semi-lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	致死盐碱浓度 Lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)
白丝条 Baisitiao	y=-0.003 6x+0.928 0	78.51	0.969 6**	≤49.44	118.89	230.00
绿如意 Lüruyi	y=-0.003 7x+0.981 9	67.34	0.964 8**	≤62.68	130.24	238.35
爬满架 Pamanjia	y=-0.004 1x+1.060 5	34.85	0.935 2**	≤75.73	136.71	234.27

注:**表示相关性达到极显著水平(P<0.01),x为处理浓度,y为种子相对发芽率。下同。

Note: ** indicated that the correlation reached a extremely significant level (P<0.01), x was the treatment concentration, y was the relative germination rate of seeds. The same below.

对爬满架品种影响最小。

2.6 NaHCO₃胁迫与相对发芽率的相关性及耐盐碱效应

由表5可知,NaHCO₃胁迫与3个品种黄瓜种子的相对发芽率均存在极显著相关性,且相关系数绝对值从高到低依次为白丝条>绿如意>爬满架。3个品种黄瓜种子的适宜盐碱浓度排序为爬满架>绿如意>白丝条,浓度范围为126.77~145.67 mmol·L⁻¹。3个品种黄瓜种子的半致死盐碱浓度和致死盐碱浓度的排序均为白丝条>爬满架>绿如意,其中半致死

盐碱浓度范围在231.54~240.41 mmol·L⁻¹,致死盐碱浓度范围在385.38~422.23 mmol·L⁻¹。因此,白丝条品种的半致死盐碱浓度和致死盐碱浓度均最高,说明NaHCO₃胁迫对白丝条影响最小。

2.7 NaCl胁迫与相对发芽率的相关性及耐盐碱效应

由表6可见,NaCl胁迫与3个品种黄瓜种子的相对发芽率均存在极显著相关性,且相关系数绝对值从高到低依次为绿如意>白丝条>爬满架。3个品种黄瓜种子的适宜盐碱浓度、半致死盐碱浓度和致死

表5 NaHCO₃浓度与种子相对发芽率的相关分析及耐碱性的测定

Table 5 Correlation analysis between NaHCO₃ concentration and relative germination rate of seeds and determination of saline-alkali tolerance

品种 Variety	一元回归方程 Univariate regression equation	F 值 F value	相关系数 Correlation coefficient	适宜盐碱浓度 Suitable saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	半致死盐碱浓度 Semi-lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	致死盐碱浓度 Lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)
白丝条 Baisitiao	y=-0.002 2x+1.028 9	252.99	0.990 3**	≤126.77	240.41	422.23
绿如意 Lüruyi	y=-0.002 6x+1.102 0	52.92	0.955 9**	≤135.38	231.54	385.38
爬满架 Pamanjia	y=-0.002 7x+1.143 3	29.52	0.924 7**	≤145.67	238.26	386.41

表6 NaCl浓度与种子相对发芽率的相关分析及耐盐性的测定

品种 Variety	一元回归方程 Univariate regression equation	F 值 F value	相关系数 Correlation coefficient	适宜盐碱浓度 Suitable saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	半致死盐碱浓度 Semi-lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)	致死盐碱浓度 Lethal saline-alkali concentration/(mmol·L ⁻¹)
白丝条 Baisitiao	$y=-0.002\ 9x+1.091\ 8$	34.80	0.935\ 1**	≤117.86	204.07	342.00
绿如意 Lüruyi	$y=-0.002\ 4x+1.069\ 2$	89.63	0.973\ 2**	≤133.00	237.17	403.83
爬满架 Pamanjia	$y=-0.002\ 4x+1.163\ 8$	8.49	0.793\ 3**	≤172.42	276.58	443.25

死盐碱浓度的排序均为爬满架>绿如意>白丝条,其中适宜盐碱浓度范围为117.86~172.42 mmol·L⁻¹,半致死盐碱浓度范围在204.07~276.58 mmol·L⁻¹,致死盐碱浓度范围在342.00~443.25 mmol·L⁻¹。因此,爬满架的适宜盐碱浓度、半致死盐碱浓度和致死盐碱浓度均最高,说明NaCl胁迫对爬满架影响最小。

2.8 3个品种黄瓜种子萌发期耐盐碱性综合评价

由表7可见,3个品种黄瓜种子的Na₂CO₃胁迫综合耐盐碱性平均隶属函数值在5.88~7.21,排序依次为绿如意>白丝条>爬满架;NaHCO₃胁迫

综合耐盐碱性平均隶属函数值在8.26~10.82,排序依次为爬满架>绿如意>白丝条;NaCl胁迫综合耐盐碱性平均隶属函数值在9.71~12.23,排序依次为爬满架>白丝条>绿如意。根据平均隶属函数值,3个品种黄瓜种子的综合耐盐碱性NaCl>NaHCO₃>Na₂CO₃,即对NaCl胁迫的耐盐碱性最高,对Na₂CO₃胁迫的耐盐碱性最低。在3种不同的盐碱胁迫中,绿如意品种对Na₂CO₃胁迫的耐盐碱性最高,爬满架品种对NaHCO₃和NaCl胁迫的耐盐碱性最高。

表7 3个黄瓜品种种子耐盐碱性得分及排名

Table 7 The score and rank of saline-alkaline tolerance of three cucumber varieties seeds

胁迫 Saline-alkali stress	品种 Variety	浓度 Concentration/(mmol·L ⁻¹)						隶属函数值 U _i	排名 Rank
		50	100	150	200	250	300		
Na ₂ CO ₃	白丝条 Baisitiao	3.00	1.87	1.22	0.08	0.05	0	6.21	2
	绿如意 Lüruyi	3.00	2.59	1.57	0.05	0.00	0	7.21	1
	爬满架 Pamanjia	3.00	2.43	0.45	0.00	0.00	0	5.88	3
NaHCO ₃	白丝条 Baisitiao	3.00	2.22	1.44	0.95	0.65	0	8.26	3
	绿如意 Lüruyi	3.00	2.62	2.21	1.83	1.02	0	10.68	2
	爬满架 Pamanjia	3.00	2.78	2.59	1.79	0.67	0	10.82	1
NaCl	白丝条 Baisitiao	2.98	2.85	2.56	1.53	0.39	0	10.32	2
	绿如意 Lüruyi	3.00	2.47	1.81	1.37	1.06	0	9.71	3
	爬满架 Pamanjia	3.00	2.88	2.69	2.38	1.28	0	12.23	1

3 讨论与结论

作物种子萌发期和幼苗生长期是耐盐碱能力最弱的时期^[14-15],可作为作物耐盐碱性测定的主要时期^[11]。在本试验中,在NaCl胁迫下,3个品种黄瓜种子的适宜盐碱浓度分别为≤117.86、≤133.00、≤172.42 mmol·L⁻¹,半致死盐碱浓度分别为204.07、237.17、276.58 mmol·L⁻¹,致死盐碱浓度分别为342.00、403.83、443.25 mmol·L⁻¹;同在NaCl胁迫下,白丝条、绿如意和爬满架3个品种分别在盐碱

浓度≤150、≤100、≤200 mmol·L⁻¹时发芽率与对照无显著差异;同在Na₂CO₃胁迫下,白丝条、绿如意和爬满架分别在盐碱浓度300、250、200 mmol·L⁻¹时出现相对发芽指数为0。以上均说明同一作物不同品种在同一盐碱胁迫下的耐受能力是有差异的^[13]。该结果与周贤达等^[8]、王喜涛^[16]的结果一致,这主要与种子的结构差异和遗传特性相关。

盐碱胁迫对作物种子萌发的抑制程度与盐碱种类相关^[17]。在本试验中,同在300 mmol·L⁻¹浓度胁迫下,Na₂CO₃处理的种子发芽势和发芽率均

为0,即已完全抑制种子萌发,但NaHCO₃、NaCl胁迫下的3个品种黄瓜种子有发芽,说明该3个品种黄瓜种子的耐NaHCO₃、NaCl胁迫性未达到上限。与王婷等^[18]结果不一致,主要原因是作物本身抗性、盐碱类型及浓度对土壤产生的影响不同。爬满架品种黄瓜种子在Na₂CO₃、NaHCO₃和NaCl胁迫下的适宜盐碱浓度分别为≤75.73、≤145.67、≤172.42 mmol·L⁻¹,半致死盐碱浓度分别为136.71、238.26、276.58 mmol·L⁻¹,致死盐碱浓度分别为234.27、386.41、443.25 mmol·L⁻¹。可见,同一浓度的Na₂CO₃、NaHCO₃和NaCl溶度胁迫对3种黄瓜种子萌发的抑制作用由小到大依次是NaCl<NaHCO₃<Na₂CO₃,通过平均隶属函数值分析的结果也是如此。该结果也与刘盼盼等^[2]、段青青等^[19]、叶景学等^[20]的结果一致,主要原因是碱胁迫对黄瓜种子的影响大于盐胁迫。

不同品种的作物对盐碱胁迫的耐受能力不同^[16]。在本试验中,从适宜盐碱浓度、半致死盐碱浓度、致死盐碱浓度可以看出,3个黄瓜品种中白丝条对盐碱胁迫最敏感,爬满架对盐碱胁迫最不敏感。低浓度的Na₂CO₃、NaHCO₃和NaCl胁迫对3个品种黄瓜种子的萌发具有促进作用,与段青青等^[19]的结果一致。3个品种黄瓜种子的耐盐碱性是通过计算隶属函数值来作综合评价的,通过选用相对值减小品种本身带来的误差,隶属函数值可作为品种之间耐盐碱比较的重要依据。

综上所述,Na₂CO₃、NaHCO₃和NaCl三种盐碱胁迫对黄瓜种子萌发有严重的影响。Na₂CO₃胁迫下3个品种黄瓜种子的耐盐碱性为绿如意>白丝条>爬满架,NaHCO₃胁迫下3个品种黄瓜种子的耐盐碱性为爬满架>绿如意>白丝条,NaCl胁迫下3个品种黄瓜种子的耐盐碱性为爬满架>白丝条>绿如意。3个品种黄瓜种子萌发时都具有一定的抗盐碱能力,可以作为黄瓜设施栽培土壤改良的参考品种。

参考文献

- [1] 中研普华产业研究院. 2025—2030年中国黄瓜行业市场全景调研及投资价值评估研究报告[R]. 深圳:中研普华产业研究院, 2025.
- [2] 刘盼盼, 褚睿, 刘召梅, 等. 不同盐碱水平对黄瓜幼苗生长及生理特性的影响[J/OL]. 南京农业大学学报, 1-14 [2025-05-29]. <https://link.cnki.net/urlid/32.1148.S.20250528.1759.011>.
- [3] 张倩. 莱茵海默氏菌 NYJ 的培养条件优化及其对黄瓜盐碱胁迫的缓解作用[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2020.
- [4] 聂文婧. 外源油菜素内酯缓解黄瓜碱胁迫的生理机制[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2018.
- [5] GUO R, ZHOU J, HAO W, et al. Germination, growth, photosynthesis and ionic balance in setaria viridis seedlings subjected to saline and alkaline stress[J]. Canadian Journal of Plant Science, 2011, 91(6): 1077-1088.
- [6] CHEVILLY S, DOLZ-EDO L, MARTINEZ-SANCHEZ G, et al. Distinctive traits for drought and salt stress tolerance in melon (*Cucumis melo* L.) [J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 777060.
- [7] LIU D R, DONG S Y, BO K L, et al. Identification of QTLs controlling salt tolerance in cucumber (*Cucumis sativus* L.) seedlings[J]. Plants, 2021, 10(1): 85.
- [8] 周贤达, 范家萌, 谢长宝, 等. 不同瓜类作物耐盐碱性鉴定方法初探[J]. 中国瓜菜, 2024, 37(12): 81-87.
- [9] BIDALIA A, HANIEF M, RAO K S. Tolerance of *Mitragyna parvifolia*. (Roxb.) Korth seedlings to NaCl salinity[J]. Photosynthetica, 2016, 55(2): 231-239.
- [10] 刘晓威, 杨秀艳, 武海雯, 等. NaCl胁迫下红砂种子萌动期差异表达基因的转录组分析[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2019, 43(3): 28-36.
- [11] 杨迎月, 毛桂莲, 麻冬梅, 等. 四种牧草种子在不同浓度NaCl或NaHCO₃胁迫下的萌发特性[J]. 草地学报, 2022, 30(3): 637-645.
- [12] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 农作物种子检验规程 第4部分: 播种质量 发芽试验: GB/T 3543.4—2025[S]. 北京: 中国标准出版社, 2025.
- [13] 朱建峰, 张会龙, 杨秀艳, 等. 35个白榆优良家系种子萌发期耐盐碱性评价[J]. 西北农业学报, 2020, 29(9): 1417-1429.
- [14] 高彩婷, 刘景辉, 张玉芹, 等. 短期盐胁迫下燕麦幼苗的生理响应[J]. 草地学报, 2017, 25(2): 337-343.
- [15] 巴图, 赵萌萌, 李倩, 等. 不同苜蓿品种种子发芽对盐胁迫的响应[J]. 水土保持通报, 2017, 37(2): 96-101.
- [16] 王喜涛. 黄瓜种质资源耐盐性评价及其遗传分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2014.
- [17] 聂必林, 巫利梅, 如马南木·尼合买提, 等. 外源褪黑素对复合盐碱胁迫下黑果枸杞种子萌发和幼苗生长的缓解效应[J]. 西北植物学报, 2021, 41(10): 1711-1724.
- [18] 王婷, 王玉州, 王梦珂, 等. 两个甜瓜品种芽苗期对盐碱胁迫的响应及耐性差异[J]. 中国瓜菜, 2025, 38(1): 57-64.
- [19] 段青青, 韩梅梅, 王友平, 等. 外源褪黑素影响盐碱复合胁迫下西瓜种子萌发的综合评价[J]. 园艺学报, 2025, 52(4): 1020-1036.
- [20] 叶景学, 贺冬, 齐义杰, 等. 不同浓度钠盐对黄瓜种子发芽特性的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2016(11): 91-93.