

盐碱胁迫对结球甘蓝种子萌发的影响

王神云¹, 张伟¹, 余方伟¹, 于利¹, 徐浪涛², 李建斌¹

(1. 江苏省高效园艺作物遗传改良重点实验室·江苏省农业科学院蔬菜研究所 南京 210014;

2. 宜兴市蔬菜办公室 江苏宜兴 214254)

摘要:为探讨盐碱胁迫对结球甘蓝种子萌发的影响和结球甘蓝耐盐碱的简易评价方法,选用2个中熟品种(春丰、苏甘867)和1个晚熟品种(启夏),在种子萌发时用不同类型钠盐(中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃) 进行处理,调查种子发芽率和胚芽生长量,采用 Boltzmann 函数曲线拟合方程和回归相关分析进行不同类型钠盐对结球甘蓝种子萌发的抑制程度、致死浓度的确定,以及结球甘蓝耐不同类型钠盐的评价浓度和生理指标的确定。结果表明,不同类型钠盐对结球甘蓝种子萌发的抑制效果存在明显差异,中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子萌发的致死浓度分别为 257.58、239.90、185.86 和 95.96 mmol·L⁻¹,碱性盐的抑制作用大于中性盐,其中 Na₂CO₃ 抑制效果最为突出。相同结球甘蓝品种对不同类型钠盐的耐受力也存在差异,苏甘867对 Na₂SO₄ 和高浓度 NaCl 胁迫的耐受能力最强,启夏对 NaCl 胁迫的耐受能力最弱,但对 Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 胁迫的耐受能力均最强。不同类型钠盐胁迫下,3个品种的胚芽生长量降低率与相对发芽率均呈极显著正相关,利用这两个指标评价结球甘蓝耐 Na₂SO₄ 和 Na₂CO₃ 的适宜浓度分别为 150 mmol·L⁻¹ 和 40 mmol·L⁻¹;利用相对发芽率评价耐 NaCl 和 NaHCO₃ 的适宜浓度均为 50 mmol·L⁻¹;利用胚芽生长量降低率评价耐 NaCl 和 NaHCO₃ 适宜浓度均为 100 mmol·L⁻¹。综上,本研究为结球甘蓝耐盐碱品种的筛选以及根据盐碱地类型选择合适的品种提供了重要的理论依据。

关键词:结球甘蓝;盐碱胁迫;种子萌发;相对发芽率;胚芽生长量

中图分类号:S635.1

文献标志码:A

文章编号:1673-2871(2025)11-201-10

Effects of saline-alkali stress on seed germination of cabbage

WANG Shenyun¹, ZHANG Wei¹, YU Fangwei¹, YU Li¹, XU Langtao², LI Jianbin¹

(1. Jiangsu Key Laboratory for Horticultural Crop Genetic Improvement/Institute of Vegetable Crops, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, Jiangsu, China; 2. Yixing Vegetable Office, Yixing 214254, Jiangsu, China)

Abstract: To investigate the effects of salt-alkali stress on the seed germination of cabbage and explore a simple evaluation method for the saline-alkali tolerance of cabbage. Two mid-maturity cabbage varieties (Chunfeng and Sukan 867) and one late-maturity variety (Qixia) were selected. During seed germination, the seeds were treated with different types of sodium salts (neutral salts NaCl and Na₂SO₄, and alkaline salts NaHCO₃ and Na₂CO₃). The seed germination rate and plumule growth were investigated. The Boltzmann function curve fitting equation and regression correlation analysis were used to determine the inhibition degree and lethal concentration of different sodium salts on cabbage seed germination, as well as to confirm the evaluation concentration and physiological indicators for cabbage's tolerance to different sodium salts. The results showed that the inhibitory effects on the cabbage seed germination varied obviously with different types of sodium salts. The lethal concentrations of neutral salts NaCl and Na₂SO₄ for seed germination were 257.58 and 239.90 mmol·L⁻¹, respectively, while alkaline salts NaHCO₃ and Na₂CO₃ were 185.86 mmol·L⁻¹ and 95.96 mmol·L⁻¹, respectively. Alkaline salts had a greater impact than neutral salts, in which, the inhibitory effect of Na₂CO₃ was the most prominent. In this study, the tolerance of same cabbage variety to different types of sodium salts were different. Sukan 867 exhibited the strongest tolerance to Na₂SO₄ and high-concentration NaCl stress, while Qixia showed the weakest tolerance to NaCl stress, and had the strongest tolerance to Na₂CO₃ and NaHCO₃ stress. There was an extremely significant positive correlation between the germ growth biomass reduction rate and the relative germination rate under the stress of different sodium salts types. Using the two indexes above, for Na₂SO₄ and Na₂CO₃, the appropriate concentrations for eval-

收稿日期:2024-06-11;修回日期:2025-05-16

基金项目:江苏省重点研发计划项目(BE2021376);国家现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-23-G42)

作者简介:王神云,女,研究员,主要从事甘蓝遗传育种与分子生物技术研究。E-mail:wangshenyun@jaas.ac.cn

通信作者:李建斌,男,研究员,主要从事甘蓝类蔬菜遗传育种研究。E-mail:jbli@jaas.ac.cn

uating the stress on cabbage were 150 mmol·L⁻¹ and 40 mmol·L⁻¹, respectively; For NaCl and NaHCO₃, the suitable concentration was 50 mmol·L⁻¹ to evaluate with the germ growth biomass reduction rate , and the suitable concentration was 100 mmol·L⁻¹ to evaluate with the relative germination rate. In conclusion, this study provides an important theoretical basis for the screening of salt-alkali tolerant cabbage varieties and the selection of suitable varieties according to the type of saline-alkali land.

Key words: Cabbage; Saline-alkali stress; Seed germination; Relative germination rate; Germ growth biomass

全球土壤盐碱化问题越来越严重,截至 2023 年,已有近 9.32 亿 hm² 土地发生盐碱化^[1]。我国盐碱土地总面积超过 3693 万 hm²,约占全国耕地面积的 25%^[2]。引起土壤盐碱化的盐分主要有中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃^[3],盐碱胁迫主要对植物造成渗透胁迫、离子胁迫和氧化胁迫损伤,而碱胁迫还会引起高 pH 胁迫,从而影响植物对水和营养物质的正常吸收^[4-5]。盐碱土壤不利于植物正常生长,导致大量盐碱地得不到有效利用^[6-8],因此,筛选适宜盐碱地种植的作物尤为重要。

我国有大量的耐盐作物,如水稻、大豆、玉米、高粱、棉花、结球甘蓝、南瓜等^[9-12]。结球甘蓝为十字花科甘蓝类蔬菜作物,是我国重要蔬菜作物之一,不仅具有较高的营养价值和经济价值,还具有一定的耐盐性,是适宜盐碱地栽培的蔬菜作物之一,但其种子萌发期对盐胁迫敏感,容易受环境中盐分的影响,因此该时期可作为结球甘蓝耐盐性评价时期之一^[13-14]。目前国内外关于甘蓝类作物,如羽衣甘蓝、芥蓝、结球甘蓝等耐盐碱胁迫的研究主要集中在盐胁迫对种子萌发、幼苗生长和体内离子分布影

响,而且主要集中在单一的中性盐——NaCl 胁迫研究方面^[15-19]。一般盐碱土壤对作物同时存在盐、碱胁迫^[2],随着研究的不断深入,科研人员发现盐胁迫和碱胁迫对植物的危害不尽相同,在生理方面、分子方面植物对这两种胁迫的响应也存在显著差异^[20-21]。因此,本文从结球甘蓝种子萌发期的相对发芽率和胚芽生长量两个指标入手,探究盐碱土壤中中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 NaHCO₃、Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子萌发的影响,为结球甘蓝耐盐碱性综合评价和品种筛选提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

春丰(秋天种植,熟性 60 d 左右)、苏甘 867(秋天种植,熟性 55 d 左右)和启夏(秋天种植,熟性 70 d 左右)3 个结球甘蓝品种均由江苏省农业科学院蔬菜研究所选育。

1.2 方法

1.2.1 不同盐碱溶液配制 配制不同浓度的 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 溶液^[11, 19],并测定 pH。配制浓度和对应 pH 见表 1。

表 1 不同盐碱溶液的浓度及对应 pH
Table 1 Concentration and corresponding pH of solutions with different saline-alkali components

NaCl		Na ₂ SO ₄		NaHCO ₃		Na ₂ CO ₃	
浓度	pH	浓度	pH	浓度	pH	浓度	pH
Concentration/(mmol·L ⁻¹)		Concentration/(mmol·L ⁻¹)		Concentration/(mmol·L ⁻¹)		Concentration/(mmol·L ⁻¹)	
0(CK)	7.22	0(CK)	7.22	0(CK)	7.22	0(CK)	7.22
50	6.64	50	7.41	50	8.32	20	10.94
100	6.64	100	7.41	100	8.32	40	11.09
150	6.64	150	7.41	150	8.32	60	11.22
200	6.64	200	7.41	200	8.32	80	11.32
250	6.64	250	7.41	250	8.32	100	11.41
300	6.64						

1.2.2 发芽试验 2022 年 5 月在江苏省农业科学院蔬菜研究所实验室开展试验。将供试结球甘蓝种子放在已灭菌烧杯中,75%乙醇消毒 30~45 s,灭菌水冲洗 2 遍,将预处理后的种子(50~100 粒)放在脱脂棉上,然后移入密封发芽盒中,倒入灭菌水和

不同浓度不同类型钠盐溶液,浸透脱脂棉,以灭菌水为对照(CK),设置 3 次重复。将发芽盒放入培养箱中,在(25±0.5)℃条件下恒温培养,每天更换脱脂棉 1 次,并加入对应的水和钠盐溶液,第 3 天调查发芽种子数、测定胚芽生长量(随机挑选 10 株幼

芽,去掉根毛,称质量)。

1.3 数据分析

采用 Microsoft Excel2016 进行发芽率、相对发芽率、胚芽生长量和胚芽生长量降低率数据统计处理、相关性分析和作图,采用 SPSS27.0 对数据进行方差分析,采用 OriginPro 8 拟合 Boltzmann 函数曲线方程, $y=A_2+(A_1-A_2)/\{1+\exp[(x-x_0)/d_x]\}$ (A_1 、 A_2 、 x_0 、 d_x 均为常数,软件分析获得, A_1 表示下渐近值, A_2 表示上渐近值, x_0 表示中心值, d_x 表示曲线斜率),通过方程计算半致死浓度和致死浓度^[22]。

发芽率/%=种子发芽数/供试种子总数×100;

相对发芽率/%=处理组发芽率/对照组发芽率×100;

胚芽生长量降低率/%=(对照组胚芽生长量-处理组胚芽生长量)/对照组胚芽生长量×100。

2 结果与分析

2.1 中性盐 NaCl 对结球甘蓝种子萌发的影响

2.1.1 NaCl 对结球甘蓝种子相对发芽率的影响

由表 1 可知,不同浓度 NaCl 溶液 pH 均为 6.64,呈微酸性。由表 2 知,NaCl 胁迫对不同品种结球甘蓝种子的萌发均有抑制作用,随着浓度的增大,3 个供试品种相对发芽率均呈下降趋势。NaCl 浓度低于 250 mmol·L⁻¹,种子可以萌发;浓度达到 300 mmol·L⁻¹,3 个供试品种均不发芽。通过 OriginPro8 Boltzmann 函数曲线拟合 3 个供试品种平均相对发芽率与 NaCl 浓度的关系,拟合曲线方程为 $y=-1.43+(149.51+1.43)/\{1+\exp[(x-34.34)/48.04]\}$ (R^2 为 0.985 6),通过上述方程计算可知,结球甘蓝种子萌发耐 NaCl 的半致死浓度为 66.67 mmol·L⁻¹,致死浓度为 257.58 mmol·L⁻¹。

由表 3 可知,3 个供试品种对 NaCl 的耐受程度存在差异,其中苏甘 867 的耐受能力最强,半致死浓度为 72.73 mmol·L⁻¹,致死浓度为 245.45 mmol·L⁻¹;其次是春丰;启夏的耐受能力最弱,致死浓度为 209.09 mmol·L⁻¹。由表 2 知,当 NaCl 浓度从 0 mmol·L⁻¹ 上升到 100 mmol·L⁻¹ 时,3 个供试品种的相对发芽率均急剧下降,表明结球甘蓝

表 2 NaCl 胁迫下不同结球甘蓝品种的相对发芽率和胚芽生长量

Table 2 The relative germination rate and germ growth biomass of different cabbage varieties under NaCl stress

b(NaCl)/ (mmol·L ⁻¹)	相对发芽率 Relative germination rate/%			胚芽生长量 Germ growth biomass/mg		
	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia
0(CK)	100.00 Aa	100.00 Aa	100.00 Aa	54.67±1.86 Aa	51.00±0.58 Aa	46.33±2.33 Ab
50	66.20±0.71 Ba	62.86±0.54 Bb	55.57±0.09 Bc	43.67±1.45 Ba	39.67±0.33 Bb	36.33±0.88 Bb
100	36.11±1.15 Ca	34.80±0.40 Ca	17.94±0.68 Cb	23.33±0.33 Cb	26.00±0.58 Ca	18.00±0.58 Cc
150	9.06±0.43 Db	17.25±0.48 Da	7.94±0.48 Db	16.67±0.67 Da	17.67±0.33 Da	9.00±0.58 Db
200	1.90±0.33 Eab	3.26±0.31 Ea	0.55±0.40 Eb	4.00±0.58 Eb	6.33±0.33 Ea	2.33±0.33 Ec
250	0 Ea	0.49±0.40 Fa	0 Ea	0 Fa	1.67±0.88 Fa	0 Ea
300	0 Ea	0 Fa	0 Ea	0 Fa	0 Ga	0 Ea

注:不同小写字母表示同一浓度不同品种间差异显著($P<0.05$),不同大写字母表示同一品种不同浓度间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different varieties at the same concentration($P<0.05$),while different uppercase letters indicate significant difference within the same variety at different concentrations($P<0.05$). The same below.

种子萌发对 NaCl 胁迫敏感,其中启夏最敏感,相对发芽率从 100%骤降到 17.94%。NaCl 浓度为

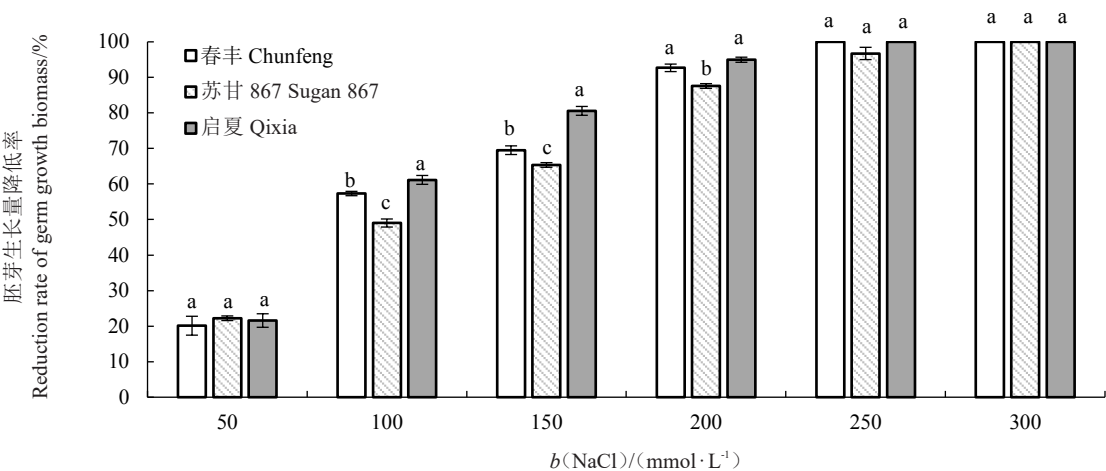
表 3 不同结球甘蓝品种 NaCl 胁迫半致死浓度和致死浓度

Table 3 The median lethal concentration and lethal concentration of different cabbage varieties under NaCl stress

	(mmol·L ⁻¹)		
	春丰	苏甘 867	启夏
NaCl 胁迫	Chunfeng	Sugan 867	Qixia
NaCl stress			
半致死浓度 Median lethal concentration	74.17	72.73	55.56
致死浓度 Lethal concentration	241.74	245.45	209.09

50 mmol·L⁻¹ 时,3 个供试品种之间相对发芽率存在显著差异,表明此浓度适宜对结球甘蓝耐受 NaCl 评价。

2.1.2 NaCl 对胚芽生长量的影响 由表 2 可以看出,NaCl 胁迫抑制结球甘蓝种子萌发后胚芽的生长,随着 NaCl 浓度增加,3 个供试品种的胚芽生长量均呈下降趋势,与相对发芽率变化规律相似。由图 1 可以看出,当 NaCl 浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时,3 个供试品种胚芽生长量降低率无显著差异,春丰、苏甘 867 和启夏的胚芽生长量降低率分别为 20.12%、22.22% 和 21.58%;当 NaCl 浓度为 100 mmol·L⁻¹



注:不同小写字母表示同一浓度不同品种间差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different lowercase letters indicate significant difference among different varieties at the same concentration ($P<0.05$). The same below.

图1 NaCl胁迫对不同结球甘蓝品种胚芽生长量降低率的影响

Fig. 1 Effects of NaCl stress on reduction rate of germ growth biomass of different cabbage varieties

时,严重影响了胚芽的生长,3个供试品种胚芽生长量降低率存在显著差异,此浓度适宜进行品种筛选。启夏受NaCl胁迫影响最严重,生长量降低率为61.15%,苏甘867影响最小,为49.02%。通过相关分析,NaCl处理后3个供试品种胚芽生长量降低率和种子相对发芽率相关系数为0.969~0.980,两个指标存在极显著正相关,均可作为NaCl胁迫评价指标。

2.2 中性盐Na₂SO₄对结球甘蓝种子萌发的影响

2.2.1 Na₂SO₄对结球甘蓝种子相对发芽率的影响

由表1可知,不同浓度Na₂SO₄溶液的pH均为7.41,呈微碱性。由表4可以看出,Na₂SO₄胁迫对结球甘蓝种子的萌发有抑制作用,随着浓度的增大,3个供试品种相对发芽率均呈下降趋势,浓度低于200 mmol·L⁻¹,种子可以萌发;浓度为250 mmol·L⁻¹时,3个供试品种均不发芽。通过OriginPro8 Boltzmann函数曲线拟合3个供试品种平均相对发芽率与Na₂SO₄浓度的关系,拟合曲线方程为 $y=-0.72+(98.73+0.72)/\{1+\exp[(x-139.47)/20.00]\}$

表4 Na₂SO₄胁迫下不同结球甘蓝品种的发芽率和胚芽生长量

Table 4 The relative germination rate and germ growth biomass of different cabbage varieties under Na₂SO₄ stress

$b(\text{Na}_2\text{SO}_4)/$ (mmol·L ⁻¹)	相对发芽率 Relative germination rate/%			胚芽生长量 Germ growth biomass/mg		
	春丰	苏甘 867	启夏	春丰	苏甘 867	启夏
	Chunfeng	Suga 867	Qixia	Chunfeng	Suga 867	Qixia
0(CK)	100.00 Aa	100.00 Aa	100.00 Aa	54.67±1.86 Aa	55.67±0.33 Aa	51.00±0.58 Ab
50	96.77±1.20 Aa	98.01±3.00 Aa	93.48±2.69 ABa	41.67±1.20 Ba	44.67±1.20 Ba	39.67±0.33 Bb
100	81.23±2.00 Bb	89.12±0.46 Ba	89.85±0.11 Ba	23.33±0.33 Cb	27.33±0.88 Ca	26.00±0.58 Ca
150	25.10±0.87 Cc	47.91±0.48 Ca	35.82±0.56 Cb	16.67±0.67 Db	21.33±0.33 Da	17.67±0.33 Db
200	2.38±0.34 Db	6.26±0.30 Da	1.84±0.04 Db	5.67±0.33 Eb	11.00±0.58 Ea	4.33±0.33 Eb
250	0 Da	0 Ea	0 Da	0 Fa	0 Fa	0 Fa

(R^2 为0.9872)。通过方程计算得出,Na₂SO₄对结球甘蓝种子的半致死浓度为138.89 mmol·L⁻¹,致死浓度为239.90 mmol·L⁻¹。

由表4可知,当Na₂SO₄浓度从0 mmol·L⁻¹提高到150 mmol·L⁻¹时,3个供试品种相对发芽率大幅下降,其中春丰最敏感,相对发芽率由100%降至25.10%。由表5可知,3个供试品种对Na₂SO₄的耐受程度存在差异,苏甘867的耐受能力最强,半致死浓度为128.79 mmol·L⁻¹,致死浓度为

250 mmol·L⁻¹;其次是春丰;再者是启夏,致死

表5 不同结球甘蓝品种Na₂SO₄胁迫半致死浓度和致死浓度

Table 5 The median lethal and lethal concentration of different cabbage varieties under Na₂SO₄ stress

	(mmol·L ⁻¹)		
Na ₂ SO ₄ 胁迫	春丰	苏甘 867	启夏
Na ₂ SO ₄ stress	Chunfeng	Suga 867	Qixia
半致死浓度 Median lethal concentration	128.63	128.79	120.14
致死浓度 Lethal concentration	229.80	250.00	228.48

浓度为 $228.48\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 Na_2SO_4 浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3 个品种相对发芽率存在显著差异(表 4),表明此浓度适宜对结球甘蓝 Na_2SO_4 耐性的评价。

2.2.2 Na_2SO_4 对胚芽生长量的影响 由表 4 可知, Na_2SO_4 胁迫对结球甘蓝胚芽生长存在抑制作用,随着 Na_2SO_4 浓度增加,胚芽生长量呈下降趋势,与相对发芽率变化规律相似。 Na_2SO_4 浓度为 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,与 CK 相比,3 个供试品种胚芽生长量均降低 20%左右;当 Na_2SO_4 浓度为 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,

3 个供试品种胚芽生长量均降低 50%左右,对春丰影响最大,其胚芽生长量减少 57.33%,苏甘 867 和启夏分别减少 50.91%和 49.02%。由图 2 可知, Na_2SO_4 浓度为 $150\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3 个供试品种胚芽生长量降低率存在显著差异,适宜进行品种筛选。通过相关性分析, Na_2SO_4 处理后 3 个供试品种胚芽生长量降低率和种子相对发芽率相关系数为 0.921~0.940,两个指标间呈存在极显著正相关,均可作为 Na_2SO_4 胁迫评价指标。

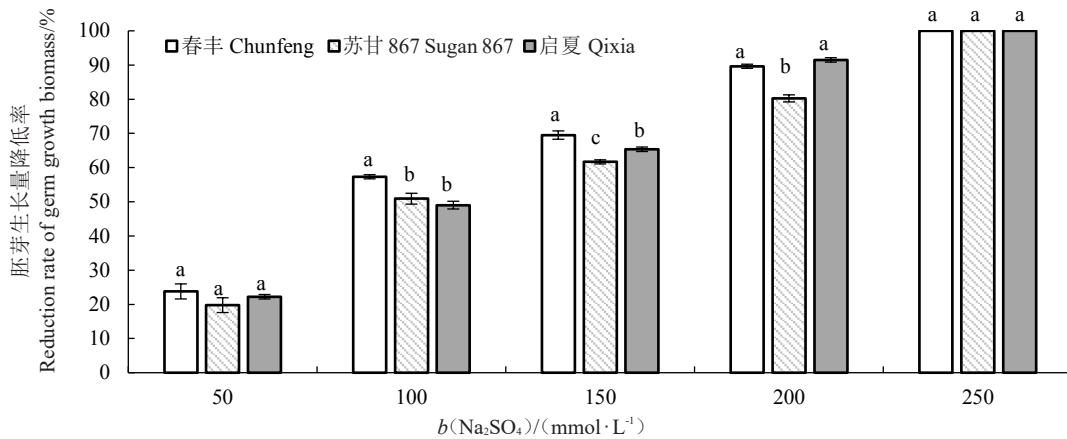


图 2 Na_2SO_4 胁迫对不同结球甘蓝品种胚芽生长量降低率的影响

Fig. 2 Effects of Na_2SO_4 stress on reduction rate of germ growth biomass of different cabbage varieties

2.3 碱性盐 NaHCO_3 对结球甘蓝种子萌发的影响

2.3.1 NaHCO_3 对结球甘蓝种子相对发芽率的影响 由表 1 可知,不同浓度 NaHCO_3 溶液的 pH 均为 8.32,呈碱性。由表 6 可知, NaHCO_3 胁迫对结球甘蓝种子萌发有抑制作用,随着浓度的增大,种子相对发芽率呈下降趋势。 NaHCO_3 浓度低于 $100\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,种子可以萌发;浓度达到 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,3 个供试品种均不发芽。通过 OriginPro8 Boltzmann 函数曲线拟合 3 个供试品种平均相对发芽率与 NaHCO_3 浓度的关系,拟合曲线方程为 $y=-1.06+(826.49+1.06)/\{1+\exp[(x+77.85)/39.47]\}$ (R^2 为 0.963 1)。通过方程计算得出, NaHCO_3 对结球甘

蓝种子半致死浓度 $30.30\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,致死浓度 $185.86\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

由表 6 可知,当 NaHCO_3 浓度从 $0\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 提高到 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3 个供试品种的相对发芽率均急剧下降,表明结球甘蓝种子萌发对碱性盐 NaHCO_3 胁迫非常敏感,其中春丰最敏感,相对发芽率由 100%降至 14.89%;但当浓度高于 $50\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,3 个供试品种相对发芽率缓慢下降。由表 7 可知,3 个供试品种对 NaHCO_3 的耐受程度存在差异,其中启夏的耐受能力最强,半致死浓度为 $44.44\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$,致死浓度为 $200\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$;其次是苏甘 867;春丰最弱,致死浓度为 $159.60\text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 。 NaHCO_3 浓度为

表 6 NaHCO_3 胁迫下不同结球甘蓝品种发芽率和胚芽生长量

Table 6 The relative germination rate and germ growth biomass of different cabbage varieties under NaHCO_3 stress

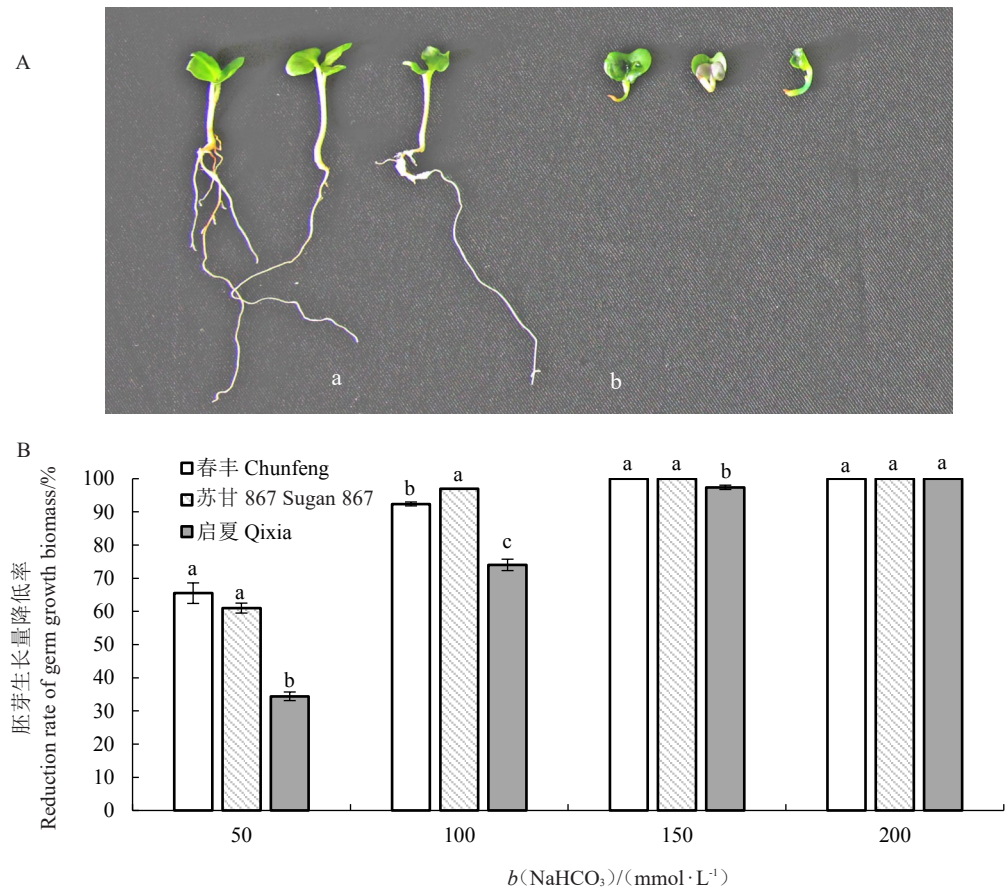
$b(\text{NaHCO}_3)/$ ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对发芽率 Relative germination rate/%			胚芽生长量 Germ growth biomass/mg		
	春丰	苏甘 867	启夏	春丰	苏甘 867	启夏
	Chunfeng	Sugan 867	Qixia	Chunfeng	Sugan 867	Qixia
0(CK)	100.00 Aa	100.00 Aa	100.00 Aa	57.00±2.08 Ab	66.67±1.20 Aa	51.33±2.31 Ac
50	14.89±0.51 Bc	30.70±0.14 Bb	44.71±2.90 Ba	19.67±1.76 Bc	26.00±1.00 Bb	33.67±1.15 Ba
100	4.54±0.86 Cb	1.06±0.46 Cc	19.11±0.27 Ca	4.33±0.33 Cb	2.00±0.00 Cc	13.33±1.53 Ca
150	0 Db	0 Cb	2.88±0.25 Da	0 Db	0 Cb	1.33±0.58 Da
200	0 Da	0 Ca	0 Da	0 Da	0 Ca	0 Da

50 mmol·L⁻¹时,3个品种相对发芽率存在显著差异,表明此浓度适宜对结球甘蓝耐受 NaHCO₃ 的评价。

表 7 不同结球甘蓝品种 NaHCO₃ 胁迫半致死浓度和致死浓度

Table 7 The median lethal and lethal concentration of different cabbage varieties under NaHCO ₃ stress (mmol·L ⁻¹)			
NaHCO ₃ 胁迫 NaHCO ₃ stress	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia
半致死浓度 Median lethal concentration	18.22	39.23	44.88
致死浓度 Lethal concentration	159.60	164.90	200.00

2.3.2 NaHCO₃ 对胚芽生长量的影响 由表 6 可知,NaHCO₃ 胁迫对结球甘蓝种子萌发后胚芽的生长具有抑制作用,随着 NaHCO₃ 浓度增加,胚芽生长量呈下降趋势,与相对发芽率变化规律相似。由图 3-A 可知,NaHCO₃ 胁迫严重影响根系发育,当浓度达到 50 mmol·L⁻¹ 时,胚芽基本没有根毛生长。由表 6 可知,NaHCO₃ 浓度为 50 mmol·L⁻¹ 时,对 3 个供试品种的胚芽生长影响均极大,其中春丰胚芽生长量减少达 65.49%,对 NaHCO₃ 耐性最弱;苏甘 867 减少 61.00%;对启夏影响最小,启夏生长量



注:A 为胚芽根毛生长情况;a. CK,b. NaHCO₃ 浓度 50 mmol·L⁻¹;B 为胚芽生长量降低率。

Note: A. Germ root hair growth; a. Control check, b. NaHCO₃ concentration 50 mmol·L⁻¹; B. Reduction rate of germ growth biomass.

图 3 NaHCO₃ 胁迫对不同结球甘蓝品种胚芽生长量降低率的影响

Fig. 3 Effects of NaHCO₃ stress on reduction rate of germ growth biomass of different cabbage varieties

减少 34.40%,对 NaHCO₃ 耐性最强。由图 3-B 可知,NaHCO₃ 浓度为 100 mmol·L⁻¹ 时,3 个供试品种胚芽生长量降低率存在显著差异,适宜作品种筛选浓度。NaHCO₃ 处理后 3 个供试品种胚芽生长量降低率和相对发芽率相关系数为 0.978~0.997,两指标间呈极显著正相关,均可作为 NaHCO₃ 胁迫评价指标。

2.4 碱性盐 Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子萌发的影响

2.4.1 Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子相对发芽率的影响

由表 1 可知,Na₂CO₃ 溶液为强碱性,随着浓度的增加,pH 也随之增加。当浓度为 20 mmol·L⁻¹ 时,pH 为 10.94;当浓度为 100 mmol·L⁻¹ 时,pH 为 11.41,强碱性。由表 8 可知,Na₂CO₃ 胁迫对结球甘蓝种子的萌发有极强的抑制作用,随着浓度的提高,种子相对发芽率呈下降趋势。Na₂CO₃ 浓度低于 80 mmol·L⁻¹,种子可以萌发;浓度达到 100 mmol·L⁻¹,3 个供试品种均不发芽。通过 OriginPro8

表 8 Na₂CO₃胁迫下不同结球甘蓝品种发芽率和胚芽生长量

Table 8 The relative germination rate and germ growth biomass of different cabbage varieties under Na₂CO₃ stress

<i>b</i> (Na ₂ CO ₃)/ (mmol·L ⁻¹)	相对发芽率 Relative germination rate/%			胚芽生长量 Germ growth biomass/mg		
	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia
0(CK)	100.00 Aa	100.00 Aa	100.00 Aa	56.67±2.08 Aa	66.67±3.33 Aa	46.67±5.77 Ab
20	87.85±1.99 Bb	88.45±1.09 Bb	93.47±1.39 Ba	30.00±1.76 Bc	56.67±3.33 Ba	40.00±0.00 Bb
40	74.31±1.96 Cb	53.38±2.23 Cc	82.89±0.54 Ca	20.33±0.33 Ca	20.00±0.00 Ca	20.00±0.00 Ca
60	13.15±0.73 Dc	18.43±2.19 Db	54.37±0.67 Da	10.33±0.88 Db	15.33±0.33 Da	14.33±1.15 Da
80	0 Ec	1.54±0.05 Eb	12.25±0.20 Ea	0 Ec	3.00±0.58 Db	7.00±1.00 Ea
100	0 Ea	0 Ea	0 Ea	0 Ea	0 Da	0 Fa

Boltzmann 函数曲线拟合 3 个供试品种平均相对发芽率与 Na₂CO₃ 浓度的关系,拟合曲线方程为 $y=-2.31+(99.97+2.31)/(1+\exp[(x-50.08)/11.98])$ (R^2 为 0.9352)。通过方程计算得出,Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子萌发的半致死浓度为 49.49 mmol·L⁻¹,致死浓度为 95.96 mmol·L⁻¹。

由表 8 可知,当 Na₂CO₃ 浓度从 0 mmol·L⁻¹ 提高到 40 mmol·L⁻¹ 时,结球甘蓝种子相对发芽率缓慢下降;浓度高于 40 mmol·L⁻¹ 时,相对发芽率急剧下降,表明 Na₂CO₃ 浓度高于 40 mmol·L⁻¹ 结球甘蓝种子萌发对 Na₂CO₃ 胁迫敏感,其中苏甘 867 最敏感。由表 9 可知,3 个供试品种对 Na₂CO₃ 的耐受程度不同,启夏耐受能力最强,半致死浓度为 60.60 mmol·L⁻¹,致死浓度为 97.98 mmol·L⁻¹;其次春丰,苏甘 867 最弱,致死浓度为 82.83 mmol·L⁻¹。Na₂CO₃ 浓度为 40 mmol·L⁻¹ 时,3 个品种相对发芽率存在显著差异,表明此浓度适宜对结球甘蓝耐 Na₂CO₃ 评价。

表 9 不同结球甘蓝品种 Na₂CO₃ 胁迫半致死浓度和致死浓度

Table 9 The median lethal and lethal concentration of different cabbage varieties under Na₂CO₃ stress

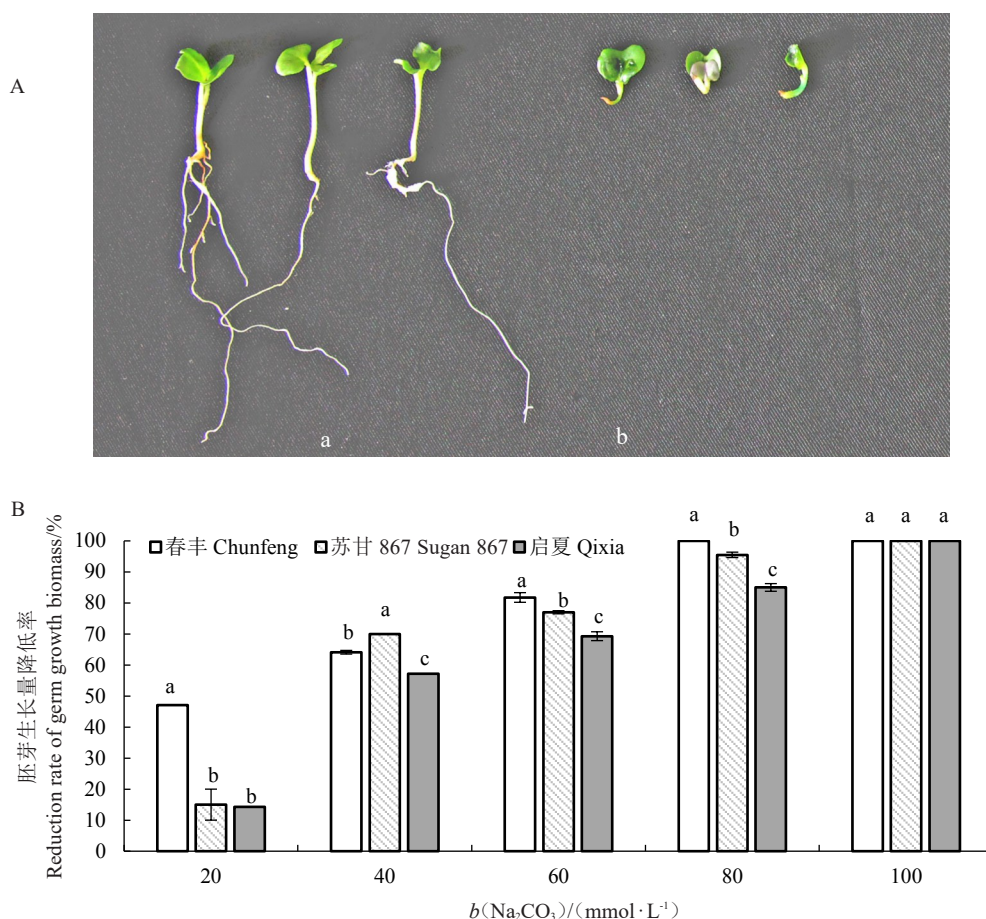
	(mmol·L ⁻¹)		
Na ₂ CO ₃ 胁迫 Na ₂ CO ₃ stress	春丰 Chunfeng	苏甘 867 Sugan 867	启夏 Qixia
半致死浓度 Median lethal concentration	47.45	41.84	60.60
致死浓度 Lethal concentration	85.68	82.83	97.98

2.4.2 Na₂CO₃ 对胚芽生长量的影响 由表 8 可知,Na₂CO₃ 胁迫抑制结球甘蓝种子萌发后胚芽的生长,随着 Na₂CO₃ 浓度的增加,胚芽的生长量呈下降趋势,与相对发芽率变化规律相似。由图 4-A 可知,Na₂CO₃ 对胚芽根系生长影响极大。当浓度达到 60 mmol·L⁻¹ 时,胚芽没有根毛生长。由表 8 和图 4-B 可知,Na₂CO₃ 浓度为 20 mmol·L⁻¹ 时,对

春丰胚芽生长影响最大,胚芽生长量减少达 47.06%,而对苏甘 867 和启夏影响均相对较小,胚芽生长量分别减少 15.00% 和 14.29%。Na₂CO₃ 浓度为 40 mmol·L⁻¹ 时,对 3 个供试品种胚芽生长影响极大,其中启夏生长量减少 57.15%,对 Na₂CO₃ 的耐性最强,苏甘 867 对 Na₂CO₃ 耐性最弱。通过相关性分析,Na₂CO₃ 处理后 3 个供试品种胚芽生长量降低率和相对发芽率相关系数为 0.910~0.972,两指标间呈极显著正相关,均可作为 Na₂CO₃ 胁迫评价指标。

3 讨论与结论

我国盐碱地分布广,面积不断扩大。盐碱土壤制约作物正常生长的成分主要有 NaCl、Mg-Cl₂、KCl、Na₂SO₄、Na₂CO₃ 和 NaHCO₃ 等,不同地块盐碱成分有差异,不同成分的比重也不同,对作物的生长发育影响也存在差异。研究表明,常见的盐碱成分对作物生长的危害程度为 Na₂CO₃>MgCl₂>NaHCO₃>NaCl>CaCl₂>Mg₂SO₄>Na₂SO₄^[23-24]。本文研究不同浓度中性盐 NaCl、Na₂SO₄ 和碱性盐 Na₂CO₃、NaHCO₃ 胁迫对结球甘蓝种子萌发和胚芽生长的影响,结果表明,不同盐碱成分对结球甘蓝种子的萌发抑制作用存在差异,可能与不同盐碱成分可造成不同离子胁迫、进而影响结球甘蓝不同的代谢途径有关。中性盐 NaCl 和 Na₂SO₄ 对结球甘蓝种子的致死浓度分别为 257.58 和 239.90 mmol·L⁻¹,碱性盐 NaHCO₃ 和 Na₂CO₃ 对结球甘蓝种子的致死浓度分别为 185.86 和 95.96 mmol·L⁻¹,危害程度为 Na₂CO₃>NaHCO₃>Na₂SO₄>NaCl,这一结果与常见的花生、水稻等作物 NaCl 胁迫危害程度大于 Na₂SO₄ 胁迫存在差异^[23-24],可能与作物种类不同有关,但该结果与这 4 种钠盐对野榆钱菠菜、黄花苜蓿和黑果枸杞的危害程度顺序一致^[25-27],可能因为



注:A 为胚芽根毛生长情况;a. CK, b. Na_2CO_3 浓度 $60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B 为胚芽生长量降低率。

Note: A. Germ root hair growth; a. Control check, b. Na_2CO_3 concentration $60 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$; B. Reduction rate of germ growth biomass.

图4 Na_2CO_3 胁迫对不同结球甘蓝品种胚芽生长量降低率的影响

Fig. 4 Effects of Na_2CO_3 stress on reduction rate of germ growth biomass of different cabbage varieties

结球甘蓝种子萌发对 pH 比较敏感,相同浓度 4 种钠盐 pH 越大,对结球甘蓝种子萌发的危害越大。研究结果还表明碱性盐 NaHCO_3 和 Na_2CO_3 对结球甘蓝种子萌发的致死浓度低于中性盐 NaCl 和 Na_2SO_4 ,抑制作用大于中性盐,其中 Na_2CO_3 影响最大,与盐碱胁迫对花生和粳稻种子萌发的影响一致^[27-28],也与水稻等受到碱性盐胁迫比中性盐产生的危害更加严重、复杂的结果相似^[21],因为碱性盐对作物不仅存在离子毒害,而且存在高 pH 损害。

在作物种子萌发过程中,盐碱胁迫不仅影响种子正常出芽,而且影响出芽后胚芽的生长^[28-30]。本研究结果表明, NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 胁迫均使结球甘蓝种子萌发后胚芽生长量下降,盐碱成分和 pH 可能通过影响根系水分和营养吸收,进而影响胚芽正常生长,碱性盐 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 对

胚芽生长影响更明显,尤其是对根生长的抑制,当 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 浓度分别为 60 、 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,胚芽的根毛不生长,与吉小敏等^[31]研究的盐碱胁迫对盐穗木幼苗生长的影响结果一致,也与马晓蕾等^[27]研究的高浓度盐碱胁迫对花生根系生长具有显著抑制作用一致。盐碱胁迫使结球甘蓝胚芽生长量降低率随浓度升高而升高,与衣葵花等^[13]以海水模拟盐水处理,1/36(海水占比)浓度会增加结球甘蓝幼苗质量的研究结果不一致,可能与本研究没有设置这么低浓度,也可能与处理时期不同有关。

耐盐碱品种筛选是作物品种选育的重点方向,种子萌发和幼苗生长阶段是植物对盐碱胁迫敏感时期^[32]。本研究结果表明,结球甘蓝在种子萌发阶段耐受不同盐碱成分评价的适宜浓度不同。利用相对发芽率和胚芽生长量降低率评价耐 Na_2SO_4 的

适宜浓度均为 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 、耐 Na_2CO_3 的适宜浓度均为 $40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ；利用相对发芽率评价耐 NaCl 和 NaHCO_3 适宜浓度均为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，利用胚芽生长量降低率评价耐 NaCl 和 NaHCO_3 的适宜浓度均为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。杜欢欢等^[15]在甘蓝变种芥蓝耐盐碱研究中，综合考虑品种间的差异和种子发芽率，适宜品种筛选的 NaCl 浓度为 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，比本研究结球甘蓝品种筛选浓度高；李萍等^[30]和龙卫华等^[33]研究表明，芥蓝和甘蓝型油菜品种耐盐鉴定的最适 NaCl 浓度分别为 $214 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $230 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，均比本研究筛选浓度高，虽然芥蓝、油菜与结球甘蓝同属十字花科，但对 NaCl 的耐受程度存在差异，可能是作物差异引起的或者与本研究供试品种的数量相对较少有关。吉小敏等^[31]在不同盐分胁迫下以种子萌发指标进行盐穗木品种筛选，表明 Na_2SO_4 浓度低于 $285 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， NaHCO_3 浓度低于 $187 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ， Na_2CO_3 浓度低于 $130 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时，筛选效果较好，与本研究结果一致。本研究还发现苏甘 867 对 NaCl 胁迫耐受力最强，启夏最弱，但对 Na_2CO_3 胁迫耐受力两个品种相反，可能是同一品种对不同离子胁迫的耐受力存在差异，油菜对不同盐碱成分耐受力也存在类似现象^[34]。

综上所述，中性盐 NaCl 、 Na_2SO_4 和碱性盐 NaHCO_3 、 Na_2CO_3 对种子萌发的致死浓度分别为 257.58 、 239.90 、 185.86 和 $95.96 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，碱性盐的抑制作用高于中性盐，其中 Na_2CO_3 抑制效果最为突出。苏甘 867 对 Na_2SO_4 和高浓度 NaCl 胁迫的耐受能力最强，启夏对 NaCl 胁迫的耐受能力最弱，但对 Na_2CO_3 和 NaHCO_3 胁迫的耐受能力均最强。不同类型钠盐胁迫下，3 个品种胚芽生长量降低率与相对发芽率均呈极显著正相关，利用这两个指标评价结球甘蓝耐 Na_2SO_4 和 Na_2CO_3 的适宜浓度均分别为 $150 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $40 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ；利用相对发芽率评价耐 NaCl 和 NaHCO_3 的适宜浓度均为 $50 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ ，利用胚芽生长量降低率评价耐 NaCl 和 NaHCO_3 适宜浓度为 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。本研究结果表明不同类型钠盐均可抑制结球甘蓝种子萌发，降低种子发芽率和胚芽生长量，而且不同类型钠盐的影响存在差异，故在盐碱地种植结球甘蓝时应先了解土壤中的盐碱类型，因地制宜地进行品种选择，以期获得较高的经济效益。

参考文献

- [1] BASAK N, RAI A K, SUNDHA P et al. Soil management for salt-affected soil[M].//MEENA S K, DE OLIVEIRA-FEREIRA A, MEENA V C, et al. Agricultural soil sustainability and carbon management. New York: Academic Press, 2023: 99-128.
- [2] 刘小京, 郭凯, 封晓辉, 等. 农业高效利用盐碱地资源探讨[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(3): 345-353.
- [3] GUO H J, HUANG Z J, LI M Q, et al. Growth, ionic homeostasis, and physiological responses of cotton under different salt and alkali stresses[J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 21844.
- [4] ZHANG H H, LI X, GUAN Y P, et al. Physiological and proteomic responses of reactive oxygen species metabolism and antioxidant machinery in mulberry (*Morus alba* L.) seedling leaves to NaCl and NaHCO_3 stress[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2020, 193: 110259.
- [5] 程欣然, 蔡欣月, 岩温香, 等. 异源过表达 *Atvip1* 基因增强转基因高粱对盐碱胁迫的抗性[J]. 华北农学报, 2021, 36(4): 1-9.
- [6] NAIDU R, RENGASAMY P. Ion interactions and constraints to plant nutrition in Australian sodic soils[J]. Australian Journal of Soil Research, 1995, 31(31): 801-819.
- [7] SHAABAN M, ABID M, ABOU-SHANAB R A I. Amelioration of salt affected soils in rice paddy system by application of organic and inorganic amendments[J]. Plant Soil Environment, 2013, 59(5): 227-233.
- [8] 李秀军. 松嫩平原西部土地盐碱化与农业可持续发展[J]. 地理科学, 2000, 20(1): 51-55.
- [9] 赵可夫, 李法曾, 张福锁. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [10] 王树玉, 张佳麒, 程梓峻, 等. 苏打盐碱地稻米品质研究进展与展望[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(4): 856-867.
- [11] 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.
- [12] 张静, 高文博, 晏林, 等. 燕麦种质资源耐盐碱性鉴定评价及耐盐碱种质筛选[J]. 作物学报, 2023, 49(6): 1551-1561.
- [13] 衣葵花, 梁晓艳, 李萌, 等. 海水胁迫对甘蓝种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(16): 44-45.
- [14] 乐庆庆, 钟雄辉, 崔建, 等. 结球甘蓝遗传图谱的构建及抗黑腐病 QTL 定位[J]. 华北农学报, 2023, 38(3): 167-175.
- [15] 杜欢欢, 孙亚楠, 魏世锦, 等. 不同品种芥兰发芽期和苗期耐盐性鉴定及综合评价[J]. 安徽农业科学, 2022, 50(15): 47-50.
- [16] 顾闽峰, 王乃顶, 王伟义, 等. NaCl 胁迫对结球甘蓝幼苗生长及体内离子分布的影响[J]. 江苏农业学报, 2015, 31(3): 638-644.
- [17] 奚天雪, 杨磊, 袁玫, 等. NaCl 胁迫对甘蓝、白菜和油菜种子萌发的影响[J]. 种子, 2016, 35(6): 32-35.
- [18] 彭姐, 王琳. 盐胁迫对羽衣甘蓝种子萌发的影响[J]. 现代农业研究, 2020, 26(5): 61-65.
- [19] 顾闽峰, 于利, 王乃顶, 等. 盐胁迫对不同甘蓝品种发芽率及幼苗生长的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(1): 114-117.
- [20] ZHANG L P, WANG X F, SHI Q H, et al. Differences of physiological responses of cucumber seedlings to NaCl and NaHCO_3 stress[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(8): 1854-1859.
- [21] 刘奕嫒, 于洋, 方军. 盐碱胁迫及植物耐盐碱分子机制研究[J].

- 土壤与作物,2018,7(2):201-211.
- [22] 于成龙,郝欣,沈清. Origin 8.0 应用实例详解[M]. 北京:化学工业出版社.2010.
- [23] 王伟华,姜黎.四种钠盐胁迫对野榆钱菠菜种子萌发特性和幼苗生长的影响[J].中国草地学报,2020,42(6):23-29.
- [24] 武伟,田雨,宋彦涛.不同盐分对黄花苜蓿早期幼苗生长及离子积累的影响[J].中国草地学报,2019,41(4):39-44.
- [25] 刘克彪,张元恺,李发明.黑果枸杞种子萌发对水分和钠盐胁迫的响应[J].经济林研究,2014,32(4):45-51.
- [26] 王伶珍,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.
- [27] 马晓蕾,胡朋举,郭颂,等.花生耐盐碱品种的筛选及评价[J].华北农学报,2023,38(增刊1):145-153.
- [28] 李红宇,李逸,司洋,等.北方粳稻耐盐碱相关性状主成分分析及综合评价[J].核农学报,2020,34(8):1862-1871.
- [29] 张鹏,徐晨,徐克章,等.大豆品种耐盐性的快速鉴定法及不同时期耐盐性的研究[J].中国油料作物学报,2013,35(5):572-578.
- [30] 李萍,燕佳琦,张鹤,等.146份甘蓝型油菜种质芽期耐盐性筛选及评价[J].西北农业学报,2021,30(6):848-859.
- [31] 吉小敏,彭钊植,雷春英,等.不同类型盐分对盐穗木种子萌发及幼苗生长的影响[J].西北林学院学报,2022,37(3):114-119.
- [32] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants:A review[J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2005,60(3):324-349.
- [33] 龙卫华,浦惠明,张洁夫,等.甘蓝型油菜发芽期的耐盐性筛选[J].中国油料作物学报,2013,35(3):271-275.
- [34] 高桂珍,翟云孤,张鲁斌,等.油菜耐盐碱种质鉴定与品种选育研究进展[J].生物技术进展,2022,12(55):647-654.