

外源水杨酸对盐胁迫下大黄种子萌发 及幼苗生长的影响

梁小燕^{1,2}, 李依民^{1,2,3}, 高 静^{1,2,3}, 徐 进⁴, 颜永刚^{1,3}, 张 岗^{1,2,3*}

(1 陕西中医药大学 药学院/陕西省秦岭中草药应用开发工程技术研究中心, 西安 712046; 2 陕西中医药大学省部共建特色秦药资源研究开发国家重点实验室[培育], 陕西咸阳 712083; 3 陕西中医药大学陕西省中医药管理局“秦药”研发重点实验室, 西安 712046; 4 镇巴县百花谷现代农牧开发有限公司, 陕西汉中 723600)

摘 要: 该研究以掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄种子为材料, 采用双层滤纸培养法, 设置系列浓度 NaCl (0、100、150、200、250 mmol/L) 胁迫试验, 以及系列浓度水杨酸(SA)溶液(0、50、100、150、200、250 mg/L)拌种和浸种后盐胁迫实验, 测定 3 种大黄种子萌发及幼苗生长指标, 揭示外源水杨酸对盐胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长的影响。结果显示: (1) 随 NaCl 浓度增大 3 种大黄种子的发芽率均呈直线下降趋势, 且子叶、胚轴、根和苗等生长均受到强烈抑制。(2) 在拌种条件下, 200 mmol/L NaCl 胁迫下掌叶大黄苗长在 200 mg/L SA 处理下受到显著促进; 200 mmol/L NaCl 浓度盐胁迫下唐古特大黄种子发芽率在 250 mg/L SA 处理下受到显著抑制; 100 mmol/L NaCl 胁迫下药用大黄种子发芽率在 200 mg/L SA 处理下受到显著抑制, 其发芽率在 150 mg/L SA 处理下得到显著抑制, 其苗长在 250 mg/L SA 处理下受到显著抑制。(3) 在浸种条件下, 200 mmol/L NaCl 胁迫下掌叶大黄种子发芽率在 50 mg/L SA 处理下显著提高, 其幼苗根长和苗长的生长在 250 mg/L SA 处理受到显著促进; 200 mmol/L NaCl 胁迫下唐古特大黄种子的发芽率在 200 mg/L SA 处理下得到显著促进, 其幼苗根和苗的生长在 50 mg/L SA 处理下得到显著促进; 100 mmol/L NaCl 胁迫下药用大黄根和苗的生长在 100 mg/L SA 处理下均得到显著促进。研究表明, 3 种大黄种子和幼苗对盐胁迫的响应趋势一致, 但对不同浓度 SA 拌种和浸种的响应有较大差异。

关键词: 大黄; 种子; 盐胁迫; 水杨酸

中图分类号: Q945.35; S567.23⁺9

文献标志码: A

Effect of Exogenous Salicylic Acid on Germination and Seedling Growth of Rhubarb under Salt Stress

LIANG Xiaoyan^{1,2}, LI Yimin^{1,2,3}, GAO Jing^{1,2,3}, XU Jin⁴, YAN Yonggang^{1,3}, ZHANG Gang^{1,2,3*}

(1 Shaanxi University of Chinese Medicine of Pharmacy/Shaanxi Qinling Chinese Herbal Medicine Application Development Engineering Technology Research Center, Xi'an 712046, China; 2 State Key Laboratory of Research and Development of Characteristic Qin Medicine Resources [Cultivation], Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang, Shaanxi 712083, China; 3. Key Laboratory for Research and Development of “Qin Medicine” of Shaanxi Administration of Chinese Medicine, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xi'an 712046, China; 4. Baihua Valley Modern Agriculture and Animal Husbandry Development Co., Ltd. of Zhenba County, Hanzhong 723600, Shaanxi, China)

收稿日期: 2022-07-02; **修改稿收到日期:** 2022-10-24

基金项目: 国家自然科学基金(81973430, 82104334); 陕西省重点产业创新链项目(2021ZDLSF04-01); 陕西省中医药管理局重点专项(2021-QYZL-02); 陕西中医药大学学科创新团队项目(2019-QN01); 省部共建特色秦药资源研究开发国家重点实验室(培育)开放课题(QY202101)

作者简介: 梁小燕(1995—), 女, 硕士, 研究方向为中药资源与分子生药学。E-mail: 1446200532@qq.com

* 通信作者: 张 岗, 博士, 教授, 研究方向为中药资源与分子生药学。E-mail: jay_gumling2003@aliyun.com

Abstract: The seeds of *Rheum palmatum*, *R. tanguticum* and *R. officinale* were cultured with double layer filter paper and subjected to a series of NaCl stress concentrations (0, 100, 150, 200, 250 mmol/L), and salicylic acid (SA) solution of a series of concentrations (0, 50, 100, 150, 200, 250 mg/L) were used for seed dressing or soaking to carry out salt stress experiments. We measured seed germination and seedling growth indexes of three kinds of rhubarb to reveal the effects of exogenous salicylic acid on rhubarb seed germination and seedling growth under salt stress. Overall, the results showed that: (1) seed germination rates of three rhubarbs decreased with the increasement of NaCl concentration. The cotyledon, hypocotyl, root and seedlings length were all strongly inhibited with the increasement of NaCl concentration. (2) Under the condition of seed dressing, 200 mg/L SA treatment promoted the seedling growth of *R. palmatum* under 200 mmol/L NaCl stress; 250 mg/L SA inhibited the germination rate of *R. tanguticum* seeds under 200 mmol/L NaCl stress; 200 mg/L SA inhibited the germination potential of *R. officinale* seeds under 100 mmol/L NaCl, 150 mg/L SA inhibited the germination rate of rhubarb seeds under 100 mmol/L NaCl stress, 250 mg/L SA inhibited the seedling growth of rhubarb seedlings under salinity stress. (3) Under seed soaking conditions, 50 mg/L SA increased the germination rate of *R. palmatum* seeds under 200 mmol/L NaCl stress, and the growth of roots and seedlings was promoted by 250 mg/L SA treatment, and 250 mg/L SA promoted the growth of roots and seedlings of *R. palmatum* seedlings under 200 mmol/L NaCl concentrations; 200 mg/L SA promoted germination potential of *R. tanguticum* under 200 mmol/L NaCl stress, and the growth of roots and seedlings was promoted by 50 mg/L SA treatment; 50 mg/L SA promoted root and seedling growth of *R. tanguticum* under 200 mmol/L NaCl stress; 100 mg/L SA promoted the growth of roots and seedlings of *R. officinale* under 100 mmol/L NaCl stress. Therefore, it can be concluded that the three kinds of rhubarb seeds had the same response trends to salt stress, but had great differences in response to seed dressing and seed soaking with different concentrations of SA.

Key words: rhubarb; seeds; salt stress; salicylic acid

种子萌发是植物生命周期中一个脆弱而重要的时期,直接关系到幼苗的形态发生和生长^[1]。环境胁迫如高盐、干旱、水涝或缺氧等非生物胁迫抑制种子萌发,限制作物生产^[2]。高盐是最为常见的一种胁迫,其通过降低土壤水势抑制种子萌发,从而削弱种子吸收水分的能力以抑制种子吸胀和胚的生长^[3]。但是,盐胁迫抑制种子萌发的内在机制极其复杂。

水杨酸(salicylic acid, SA)是一种重要的植物激素,可以通过复杂的信号转导网络参与植物对逆境的响应过程^[4]。SA通过提高叶片渗透调节物质含量和抗氧化酶活性,降低细胞膜脂过氧化作用来有效提高植物的抗盐性^[5]。外源施用一定浓度的水杨酸可提高多种植物的耐盐性,常包括拌种和浸种两种方式^[6-7]。0.08 mmol/L SA拌种显著提高二色补血草种子在200 mmol/L NaCl条件下的萌发率以及部分酶活性和内源激素含量^[6]。0.1、0.2与0.4 mmol/L SA浸种使盐胁迫下的水飞蓟种子具有较高萌发指数和幼苗生长指标^[7]。SA浸种能促进重度NaCl胁迫下膜荚黄芪和蒙古黄芪种子的最终发芽率^[8]。

中国传统大宗中药材大黄在2020年版《中国药典》中规定为蓼科大黄属(*Rheum*)多年生高大草本掌叶大黄(*Rheum palmatum* L.)、唐古特大黄(*R. tanguticum* Maxim. ex Balf.)或药用大黄(*R. officinale* Baill.)的干燥根及根茎,味苦、性寒,具有泻下攻积、清热泻火、凉血解毒等功效,用于实热积滞、血热吐衄、目赤咽肿等症^[9]。大黄主要含有蒽醌类、蒽酮类、黄酮类、鞣质类等多种有效成分^[10],具有泻下、抗炎和止血等药理活性^[11]。大黄主要分布在亚温带及亚热带的高寒山区,其道地产区为中国甘肃、青海、四川、陕西等高海拔地区^[11]。大黄喜光照、耐严寒,不适宜在温度较高或潮湿的地方生长,且野生资源有限,现多为栽培品^[12]。气候环境的不断恶化以及人类活动的影响使土壤盐渍化程度在全球范围内不断加剧,严重影响植物的形态建成与生态分布^[13],势必影响大黄的栽培和生长。目前,大黄研究主要集中在化学成分、药理作用、种质资源及次生代谢调控等方面^[14],而对其耐盐特性研究报道较少。因此,本研究考察了SA拌种和浸种两种方式对盐胁迫下3种大黄种子萌发及幼苗生长发育的影响,旨在为大黄在盐胁迫下的栽培提供一定理论支撑。

1 材料和方法

1.1 试验材料

实验所用 3 种大黄种子由陕西中医药大学药学院王继涛高级实验师鉴定为掌叶大黄(*R. palmatum* L.)、唐古特大黄(*R. tanguticum* Maxim. ex Balf.)和药用大黄(*R. officinale* Baill.)的干燥成熟种子,分别产自甘肃省和政县(2019 年 8 月)、甘肃省湟中县(2019 年 9 月)、陕西省镇巴县(2020 年 8 月)。SA 购自上海源叶生物公司,NaCl 为国产分析纯。

1.2 试验处理

选择大小均匀、饱满的 3 种大黄种子,分别置于蒸馏水中浸泡 24 h 后,按照黑小斌等^[15]建立的方法进行大黄种子消毒处理,用无菌蒸馏水冲洗 3~4 次后待用。

试验使用 NaCl 模拟盐胁迫。将 NaCl 配制成 0 (CK)、100、150、200、250 mmol/L 5 个浓度梯度溶液进行盐胁迫下 3 种大黄种子的萌发实验。发现掌叶大黄、唐古特大黄种子萌发均在 250 mmol/L NaCl 下受到明显抑制,药用大黄种子萌发在 150 mmol/L NaCl 胁迫下受到显著抑制,所以掌叶大黄、唐古特大黄选择 200 mmol/L NaCl 浓度\药用大黄选用 100 mmol/L NaCl 浓度配合外源水杨酸进行拌种和浸种实验。

通过预试验以及查阅文献后将 SA 处理浓度设定为 50、100、150、200 和 250 mg/L。SA 施用方式为拌种和浸种两种^[8]。拌种的具体方法是:将 SA 与 NaCl 配制成符合试验设计浓度的溶液,加入种子发芽床,使 SA 始终贯穿整个处理过程。浸种的具体方法是:将大黄种子浸泡于 SA 溶液 24 h 后,用蒸馏水冲洗至净后置入发芽床,此后种子不再与 SA 接触。试验在垫有 3 层滤纸的 150 mm 培养皿中进行,每个培养皿中 100 粒种子,重复 3 次。所有材料在(20±2)℃、12/12 h 光照/黑暗、光照强度 15 000 Lx 的培养箱中培养,每天加入适量相应浓度溶液以保持滤纸湿润。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 种子萌发指标 每天记录种子的发芽个数,连续观察 10 d。第 5 天计算种子发芽势;第 10 天计算种子发芽率和相对 NaCl 伤害率。

累积发芽率(%)=10 d 内萌发种子数/供试种子总数×100%;

发芽势(%)=5 d 内萌发种子数/供试种子数×100%;

1.3.2 幼苗生长指标 实验进行至第 10 天时,从每处理组各重复组中任意取 10 株幼苗测量其子叶、胚轴、根及苗长。

1.4 数据处理

使用 Excel 2019 对数据进行绘图分析,SPSS 24.0 数据统计软件对相关种子萌发和生长指标进行处理和差异显著性检验(LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对大黄种子萌发和幼苗生长的影响

首先,随着 NaCl 浓度的增大,3 种大黄种子的每日累计发芽率和发芽势(5 d 的累计发芽率)整体均呈下降趋势(图 1)。其中,掌叶大黄种子每日累计发芽率和发芽势在 100 mmol/L NaCl 浓度下与对照(CK)无显著差异($P>0.05$),在 NaCl 浓度大于等于 150 mmol/L 时均比 CK 显著下降($P<0.05$);唐古特大黄种子每日累积发芽率在 100 mmol/L NaCl 浓度下与 CK 相差无几,在 NaCl 浓度大于等于 150 mmol/L 时比 CK 显著下降,其发芽势在 NaCl 浓度大于等于 150 mmol/L 时显著下降;药用大黄种子每日累积发芽率和发芽势均在 NaCl 浓度大于等于 100 mmol/L 时比 CK 显著下降,在 250 mmol/L NaCl 胁迫条件下发芽率极低。可见,3 种大黄种子发芽率均随 NaCl 浓度增大显著下降。

其次,随着 NaCl 胁迫浓度的增加,3 种大黄幼苗的子叶、胚轴、根系和苗的长度均逐渐降低,幼苗生长均受到严重抑制,且几乎所有指标降低幅度均在 100 mmol/L NaCl 胁迫时就达到显著水平(图 2)。其中,掌叶大黄和药用大黄幼苗的子叶长在 100 mmol/L NaCl 胁迫时就比相应 CK 显著降低($P<0.05$),而唐古特大黄幼苗的子叶在 150 mmol/L NaCl 胁迫时才受到显著抑制(图 2,A);掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄幼苗的胚轴长、根长和苗长均在 100 mmol/L NaCl 胁迫时就比相应 CK 显著降低(图 2,B~D)。以上结果说明 3 种大黄幼苗的生长大多在 100 mmol/L NaCl 胁迫下受到显著抑制。

与 CK 相比,掌叶大黄幼苗的子叶长、胚轴长、根长和苗长受到的抑制作用大体上随盐浓度的增大而递增($P<0.05$),且胚轴、根和苗在 NaCl 浓度大于等于 100 mmol/L 时受到显著抑制。唐古特大黄幼苗的子叶在 NaCl 大于 100 mmol/L 时受到显著抑制,其根和苗在 NaCl 大于等于 100 mmol/L 时受到显著抑制。随着 NaCl 浓度的增大,药用大黄幼

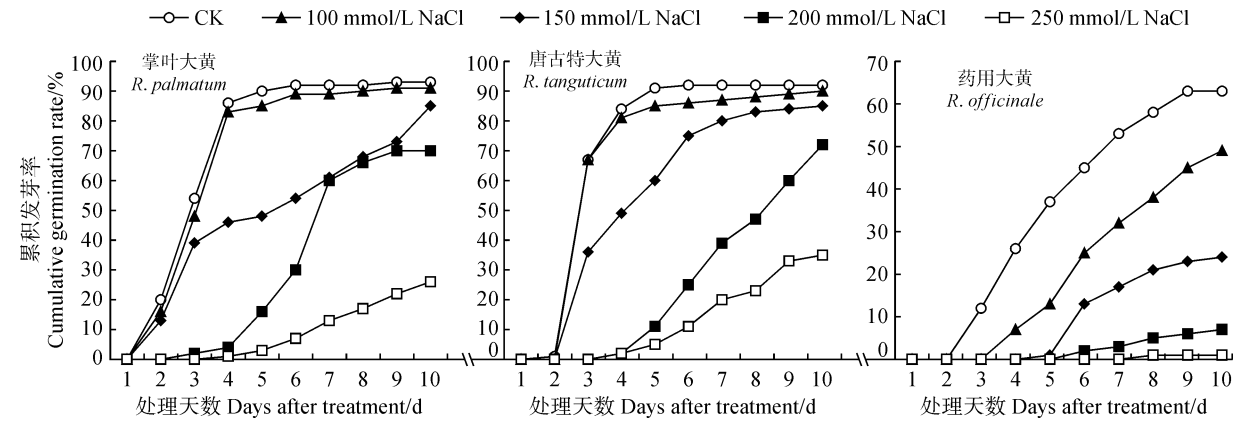
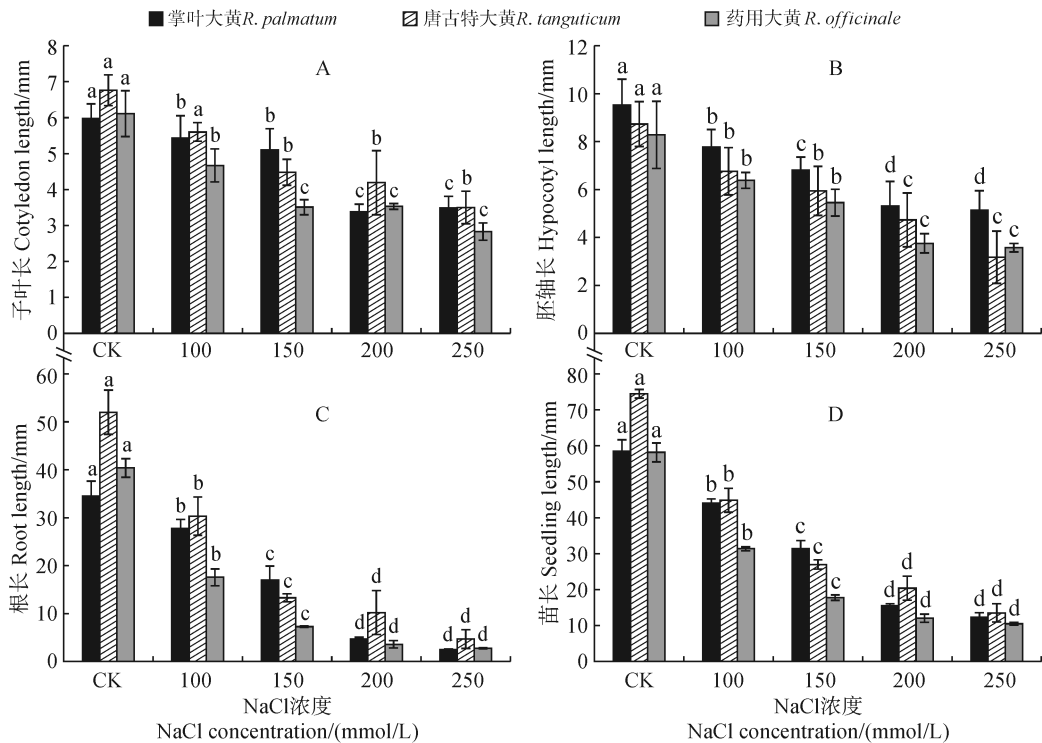


图 1 不同浓度 NaCl 胁迫下大黄种子累积发芽率的变化

Fig. 1 The cumulative germination rate of rhubarb seeds under different NaCl concentrations



同一物种内不同小写字母表示处理间差异达 5% 水平

图 2 不同浓度 NaCl 胁迫下大黄幼苗子叶(A)、胚轴(B)、根(C)和苗(D)生长的变化

Different lower-case letters within same species indicate statistically significant difference among treatments at 0.05 level ($P < 0.05$)

Fig. 2 The growth of cotyledons (A), hypocotyl (B), roots (C) and seedlings (D) of rhubarb seedlings under different NaCl concentrations

苗的子叶、胚轴、根及苗受到的抑制作用整体呈递增状态。

2.2 水杨酸拌种对 NaCl 胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长发育的影响

2.2.1 种子萌发指标 表 1 显示,在 S_{200} 或 S_{100} 处理下,掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄种子的发芽率和发芽势均显著低于空白对照(CK),且发芽势的降幅 (61.74%~88.65%) 远大于发芽率降幅

(21.23%~29.62%)。与 S_{200} 处理相比,掌叶大黄种子发芽率在 50 mg/L SA 拌种处理下显著提高 ($P < 0.05$),在 200 和 250 mg/L SA 处理后显著降低,而其发芽势仍仅在 50 mg/L SA 处理显著增加,在 250 mg/L SA 处理后显著降低。与 S_{200} 处理相比,唐古特大黄种子发芽率仅在 250 mg/L SA 处理时显著降低,其发芽势在各浓度 SA 拌种处理后均无显著变化。与 S_{100} 处理相比,药用大黄种子发芽

率仅在 150 和 250 mg/L SA 拌种处理后显著降低,而其发芽势仅在 200 mg/L SA 拌种后显著降低,而其他浓度 SA 处理后发芽率和发芽势均无显著变化。可见,盐胁迫下掌叶大黄种子发芽率和发芽势在 50 mg/L SA 拌种后均能得到显著促进,而在 250 mg/L SA 拌种后均受到显著抑制;而盐胁迫下唐古特大黄和药用大黄种子发芽率和发芽势在各浓度 SA 拌种后均无显著促进效应,其发芽率在 250 mg/L SA 拌种处理后均受到显著抑制。

2.2.2 幼苗生长指标 从表 1 可知,掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄种子的生长指标子叶长、胚轴长、根长和苗长在 S₂₀₀ 或 S₁₀₀ 处理下均显著低于相应 CK($P<0.05$),它们的子叶长在各浓度 SA 拌种

处理下均与 S₂₀₀ 或 S₁₀₀ 处理无显著差异($P>0.05$)。与 S₂₀₀ 处理相比,掌叶大黄胚轴长仅在 50 和 250 mg/L SA 拌种处理后显著降低,根长在 50、150 和 200 mg/L SA 处理后显著增加,苗长仅在 200 mg/L SA 处理下显著增加,其余浓度 SA 拌种处理后胚轴长、根长、苗长均无显著变化;与 S₂₀₀ 处理相比,唐古特大黄胚轴长、根长、苗长在 50~200 mg/L SA 处理后均无显著差异,而均在 250 mg/L SA 处理后显著降低;与 S₁₀₀ 处理相比,药用大黄胚轴长仅在 50 mg/L SA 处理后显著增加,苗长仅在 200 和 250 mg/L SA 拌种处理后显著降低,其余浓度 SA 处理胚轴长和苗长均无显著变化,而其根长在各浓度 SA 处理下均与 S₁₀₀ 处理无显著差异。

表 1 SA 拌种对 NaCl 胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长的影响

Table 1 Effect of seed dressing with SA on germination and seedling growth of rhubarb under NaCl stress

物种 Species	处理 Treatment	发芽率 Germination rate/%	发芽势 Germination potentiality/%	子叶长 Cotyledon length/mm	胚轴长 Hypocotyl length/mm	根长 Root length/mm	苗长 Seedling length/mm
掌叶大黄 <i>R. palmatum</i>	CK	95.67±5.57a	94.00±5.37a	5.98±0.40a	9.53±1.07a	34.50±3.15a	58.47±3.21a
	S ₂₀₀	67.33±4.68c	10.67±6.53c	3.38±0.21b	5.32±1.01b	4.67±0.42c	15.53±0.52c
	S ₂₀₀ +SA ₅₀	86.20±5.22b	26.60±5.86b	5.39±0.87b	3.53±2.06c	11.29±4.37b	22.90±4.80bc
	S ₂₀₀ +SA ₁₀₀	73.20±1.64c	14.80±6.76cd	4.88±0.86b	4.95±1.20bc	10.50±4.92bc	23.22±4.96bc
	S ₂₀₀ +SA ₁₅₀	71.80±3.27cd	9.40±5.86d	5.09±0.58b	5.29±1.19bc	11.42±4.93b	23.58±4.83bc
	S ₂₀₀ +SA ₂₀₀	66.17±8.61d	17.83±5.71c	5.19±0.52b	6.12±2.19b	13.27±5.80b	27.35±5.13b
	S ₂₀₀ +SA ₂₅₀	63.00±3.46d	4.00±2.10d	4.94±1.22b	3.31±1.34c	6.95±2.15c	17.61±1.66c
唐古特大黄 <i>R. tanguticum</i>	CK	92.36±2.42a	91.45±2.54a	6.76±0.43a	8.73±0.93a	52.02±4.61a	74.42±1.20a
	S ₂₀₀	72.18±6.49bc	14.27±5.00bc	4.19±0.89b	4.73±1.12b	10.21±4.59b	20.42±3.33b
	S ₂₀₀ +SA ₅₀	75.00±3.74b	11.00±3.81c	4.41±0.82b	4.41±1.78b	10.24±5.61b	21.79±4.94b
	S ₂₀₀ +SA ₁₀₀	76.17±6.82b	18.00±7.80b	4.57±0.67b	4.53±1.07b	8.65±3.39bc	20.58±3.00bc
	S ₂₀₀ +SA ₁₅₀	69.60±3.21c	15.60±3.29bc	4.21±0.55b	4.52±0.75b	10.26±4.41b	22.11±4.55b
	S ₂₀₀ +SA ₂₀₀	72.67±6.28bc	11.50±3.45c	4.62±0.72b	4.10±0.51bc	7.61±2.96bc	19.60±3.85bc
	S ₂₀₀ +SA ₂₅₀	60.00±5.60d	11.75±4.86c	4.18±1.11b	3.44±0.66c	5.63±2.25c	17.02±2.52c
药用大黄 <i>R. officinale</i>	CK	69.83±4.40a	51.83±4.58a	6.11±0.64a	8.28±1.40a	40.38±1.95a	58.16±2.61a
	S ₁₀₀	55.00±6.48b	19.83±2.40bc	4.67±0.46b	6.38±0.33bc	17.58±1.77bc	31.35±0.58b
	S ₁₀₀ +SA ₅₀	50.00±4.24bc	17.67±4.73bc	5.06±1.00b	8.09±1.38a	18.93±5.78bc	34.63±8.35b
	S ₁₀₀ +SA ₁₀₀	60.00±0.00ab	23.00±4.58b	5.01±0.82b	7.20±1.00b	21.14±3.13b	34.63±3.76b
	S ₁₀₀ +SA ₁₅₀	45.33±8.51c	20.00±6.56bc	5.31±0.58b	7.26±0.83b	20.29±2.31b	33.58±1.85b
	S ₁₀₀ +SA ₂₀₀	49.00±1.41bc	8.00±1.41d	4.51±0.40b	6.35±1.80bc	11.30±2.31c	22.59±2.70c
	S ₁₀₀ +SA ₂₅₀	43.67±6.51c	13.00±1.41c	5.05±1.17b	5.57±0.83c	12.09±4.76c	24.37±5.06c

注:CK 为空白对照(无 NaCl 和 SA 处理);S₁₀₀ 和 S₂₀₀ 分别表示 100 和 200 mmol/L NaCl 处理;SA₅₀、SA₁₀₀、SA₁₅₀、SA₂₀₀、SA₂₅₀ 分别表示 50、100、150、200、250 mg/L SA 处理;同列相同物种内不同小写字母表示处理间在 0.05 水平存在差异性显著($P<0.05$);下同

Note:CK is blank control (without NaCl and SA treatment); S₁₀₀ and S₂₀₀ are stress treatments with 100 and 200 mmol/L NaCl respectively; SA₅₀, SA₁₀₀, SA₁₅₀, SA₂₀₀, SA₂₅₀ are treatments with 50, 100, 150, 200, 250 mg/L SA, respectively; In the same column, the different normal letters within the same species showed significant differences among treatments at the 0.05 level. The same as below

2.3 水杨酸浸种对 NaCl 胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长发育的影响

2.3.1 种子萌发指标 掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄种子的发芽率和发芽势在 S_{200} 或者 S_{100} 处理下均比相应 CK 显著降低,且发芽势降低的幅度远大于发芽率。与 S_{200} 处理相比,掌叶大黄的发芽率在 50 和 200 mg/L SA 浸种处理下,在其余浓度 SA 浸种处理后无显著变化,而其发芽势在各浓度 SA 浸种处理后均显著增加(表 2);与 S_{200} 处理相比,唐古特大黄种子发芽率各浓度 SA 浸种处理后均无显著差异($P>0.05$),发芽势在 50~200 mg/L SA 浸种均得到显著促进($P<0.05$);与 S_{100} 处理相比,药用大黄发芽率和发芽势在 50~250 mg/L SA 浸种处理后与对照均无显著变化。可见,适宜浓度的 SA 浸种对 200 mmol/L NaCl 盐胁迫下的掌叶大黄发芽率以及掌叶大黄、唐古特大黄的发芽势有显著

的促进效应,但种间存在差异。

2.3.2 幼苗生长指标 表 2 显示,掌叶大黄、唐古特大黄和药用大黄的子叶长、胚轴长、根长和苗长在 S_{200} 或 S_{100} 处理下也均显著低于相应 CK($P<0.05$)。与 S_{200} 或 S_{100} 处理相比,3 种大黄的子叶长在各浓度 SA 浸种处理下均无显著变化($P>0.05$),三者的胚轴长除掌叶大黄在 150 mg/L SA 浸种处理后显著降低外也均无显著变化;掌叶大黄根长和苗长均在 50、200 和 250 mg/L SA 浸种处理下比 S_{200} 处理显著增加,唐古特大黄和药用大黄根长和苗长均在 50 mg/L SA 浸种处理下比 S_{200} 或 S_{100} 处理显著增加,其余浓度下大黄根长和苗长与 S_{200} 或 S_{100} 相比无显著差异。可见,盐胁迫下各种大黄的子叶长和胚轴长受 SA 浸种的影响较小,而其根长和苗长生长在适宜浓度的 SA 浸种受到显著促进,尤其是 50 mg/L SA 浸种对各大黄普遍表现出显著促进效应。

表 2 SA 浸种对 NaCl 胁迫下大黄种子萌发及幼苗生长的影响
Table 2 Effects of seed soaking with SA on germination and seedling growth of rhubarb under NaCl stress

物种 Species	处理 Treatment	发芽率 Germination ratio/%	发芽势 Germination potentiality/%	子叶长 Cotyledon length/mm	胚轴长 Hypocotyl length/mm	根长 Root length /mm	苗长 Seedling length/mm
掌叶大黄 <i>R. palmatum</i>	CK	95.67±5.57a	94.00±5.37a	5.98±0.40a	9.53±1.07a	34.50±3.15a	58.47±3.21a
	S_{200}	67.33±4.68c	10.67±6.53d	3.38±0.21b	5.32±1.01b	4.67±0.42d	15.53±0.52d
	S_{200} +SA ₅₀	77.00±6.07b	25.83±3.97bc	4.64±0.54b	6.32±1.77bc	15.75±2.55b	28.19±2.18b
	S_{200} +SA ₁₀₀	73.60±3.29bc	28.60±6.47b	4.61±0.39b	5.46±0.64bc	8.42±2.49cd	19.35±2.41cd
	S_{200} +SA ₁₅₀	73.33±5.65bc	20.00±6.78c	4.26±0.51b	4.43±2.45c	5.68±2.61d	16.47±3.96d
	S_{200} +SA ₂₀₀	78.00±4.24b	25.33±6.38bc	4.67±0.43b	5.84±0.62bc	10.33±2.77c	21.66±4.43c
	S_{200} +SA ₂₅₀	68.20±6.14c	24.00±5bc	4.93±0.84b	6.79±1.01b	11.28±4.10c	24.50±3.89bc
唐古特大黄 <i>R. tanguticum</i>	CK	92.36±2.42a	91.45±2.54a	6.76±0.43a	8.73±0.93a	52.02±4.61a	74.42±1.20a
	S_{200}	72.18±6.49bc	14.27±5.00d	4.19±0.89b	4.73±1.12b	10.21±4.59c	20.42±3.33c
	S_{200} +SA ₅₀	75.25±3.86b	27.50±5.20bc	4.07±0.58b	4.08±0.81b	13.87±2.53b	24.34±2.60b
	S_{200} +SA ₁₀₀	74.00±9.90b	26.00±4.24bc	4.45±0.74b	3.99±0.88b	9.82±3.43c	20.23±3.52c
	S_{200} +SA ₁₅₀	77.67±4.63b	21.67±5.24c	4.58±0.70b	4.75±0.97b	9.98±4.44c	20.27±4.03c
	S_{200} +SA ₂₀₀	72.00±7.07bc	30.00±0.00b	4.67±0.44b	4.35±0.74b	8.57±2.90c	20.22±2.72c
	S_{200} +SA ₂₅₀	65.67±7.01c	17.00±2.19cd	4.30±0.61b	4.38±1.31b	9.56±2.86c	19.22±3.51c
药用大黄 <i>R. officinale</i>	CK	69.83±4.40a	51.83±4.58a	6.11±0.64a	8.28±1.40a	40.38±1.95a	58.16±2.61a
	S_{100}	55.00±6.48b	19.83±2.40b	4.67±0.46b	6.38±0.33b	17.58±1.77c	31.35±0.58c
	S_{100} +SA ₅₀	63.00±5.66ab	20.00±2.83b	5.65±0.70b	7.65±1.62b	27.14±4.74b	39.76±5.11b
	S_{100} +SA ₁₀₀	61.00±2.00b	18.00±1.00b	5.50±0.65b	7.15±1.64b	26.12±3.58b	41.96±2.90b
	S_{100} +SA ₁₅₀	58.00±6.93b	18.67±4.16b	5.07±0.64b	6.89±1.14b	17.88±4.31c	34.54±1.98c
	S_{100} +SA ₂₀₀	62.50±2.12ab	17.00±0.00b	5.38±1.22b	7.14±1.83b	23.99±4.66bc	38.48±3.15b
	S_{100} +SA ₂₅₀	63.50±2.12ab	19.00±1.00b	5.75±0.72b	6.90±0.76b	21.95±2.20bc	37.21±2.46b

3 讨论

盐胁迫是影响植物种子萌发的重要环境因子^[16]。生长特性是植物对盐胁迫的综合反应,也是植物抗盐性的最优评价指标^[17]。大量研究表明,盐胁迫显著抑制了植物种子的萌发^[18]、萌芽幼苗的大小和胚根的长度^[19]。本研究结果表明,随着盐浓度的增大,3种大黄种子的发芽率、发芽势整体呈下降趋势,且它们所受盐相对伤害率随盐浓度增大依次递增,并以药用大黄的相对伤害率变化速率最大;同时,盐胁迫也显著抑制了3种大黄幼苗的子叶、胚轴、根和苗的生长,此结果与黄芪^[8]、百日草^[20]和甘草^[21]等的相关研究结果一致。

本研究结果表明,50、100、150 mg/L SA 浸种均促进了盐胁迫下掌叶大黄种子发芽势,但仅有 50 mg/L SA 浸种处理最终提高了掌叶大黄种子发芽率;200 mg/L SA 浸种促进盐胁迫下唐古特大黄种子的发芽势,而 250 mg/L SA 拌种却抑制了盐胁迫下唐古特大黄种子的发芽率;200 mg/L SA 拌种抑制了盐胁迫下药用大黄种子发芽势,而 150 mg/L SA 拌种抑制了其盐胁迫下的发芽率。水杨酸浸种促进掌叶大黄、唐古特大黄种子发芽,有可能是浸种能使种子在获取 SA 的同时通过吸胀作用获得水分来支持胁迫下种子的萌发,而拌种处理使种子一直都存在于 SA 溶液中,SA 胁迫产生的抑制作用远大于其补偿作用^[8]。

同时,200 mg/L 水杨酸拌种也促进了掌叶大黄苗长,这与 60 mg/L 水杨酸喷施处理促进 NaCl

胁迫下喜树幼苗生长^[22]类似;250 mg/L SA 浸种促进了掌叶大黄幼苗在盐胁迫下根和苗的生长。50 mg/L SA 浸种促进盐胁迫下唐古特幼苗根和苗的生长,其余浓度下根长和苗长与单独盐胁迫相比无显著差异,说明唐古特幼苗对 SA 的响应存在浓度效应。50 mg/L SA 拌种促进了盐胁迫下药用大黄胚轴生长,而 250 mg/L SA 拌种抑制了盐胁迫下药用大黄的苗长,100 mg/L SA 浸种均促进盐胁迫下药用大黄根和苗的生长,而 100 mg/L SA 加重了盐胁迫下凤仙花种子的伤害^[23],这可能与 SA 的施用方式以及不同植物对 SA 的响应差异有关。

本研究结果表明,药用大黄种子及幼苗受盐胁迫以及水杨酸的影响程度明显大于掌叶大黄和唐古特大黄种子或幼苗。掌叶大黄和唐古特大黄通常分布海拔高于药用大黄,生境条件更为苛刻,因此前两者可能对环境胁迫表现出比药用大黄更高的耐受性。盐胁迫会导致活性氧等有害物质大量生成,以及细胞膜脂过氧化程度加剧和电解质泄漏等不良生理反应,但植物可通过渗透调节系统和抗氧化物质进行抗氧化防御,清除活性氧物质,防止细胞过度失水,保持生物膜的完整性^[24]。SA 可降低植物膜的渗透性,提高植物抗氧化酶和非酶类抗氧化系统的活性,减少活性氧数量和缓解细胞的损伤程度^[25-26]。但本研究还未测得 SA 是否提高了3种大黄幼苗中抗氧化酶活性以及所含抗氧化物质含量的差异,关于外源 SA 增强3种大黄种子及幼苗的耐盐胁迫机制尚不清楚,后续还需要更进一步的深入研究。

参考文献:

[1] SONG J, SHI W W, LIU R R, *et al.* The role of the seed coat in adaptation of dimorphic seeds of the euhalophyte *Suaeda salsa* to salinity[J]. *Plant Species Biology*, 2017, **32**(2): 107-114.

[2] MUNNS R, JAMES R A, LÄUCHLI A. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals[J]. *Journal of Experimental Botany*, 2006, **57**(5): 1 025-1 043.

[3] ZHANG T, SONG J, FAN J L, *et al.* Effects of saline-waterlogging and dryness/moist alternations on seed germination of halophyte and xerophyte[J]. *Plant Species Biology*, 2015, **30**(3): 231-236.

[4] MA X H, ZHENG J, ZHANG X L, *et al.* Salicylic acid alleviates the adverse effects of salt stress on *Dianthus superbus* (Caryophyllaceae) by activating photosynthesis, protecting morphological structure, and enhancing the antioxidant system[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2017, **8**: 600.

[5] 吴莎,金晓玲,张旻桓,等. 外源水杨酸对高温胁迫下牡丹幼苗耐热性的影响[J]. 河南农业科学, 2018, **47**(6): 98-103.

[6] WU S, JIN X L, ZHANG M H, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on heat tolerance of tree peony seedlings under high temperature stress[J]. *Journal of Henan Agricultural Sciences*, 2018, **47**(6): 98-103.

[7] LIU J, LI L Y, YUAN F, *et al.* Exogenous salicylic acid improves the germination of *Limonium bicolor* seeds under salt stress[J]. *Plant Signaling & Behavior*, 2019, **14**(10): e1644595.

[8] 于丽丽,曹瑞珍,张学富,等. 外源水杨酸对盐胁迫下水飞蓟种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 分子植物育种, 2019, **17**(23): 7 909-7 917.

[9] YU L L, CAO R Z, ZHANG X F, *et al.* Effects of salicylic acid on seed germination and seedling physiological characteristics of *Silybum marianum* under salt stress[J]. *Molecular*

Plant Breeding, 2019, **17**(23): 7 909-7 917.

[8] 王楠, 高静, 黄文静, 等. 早、盐胁迫下黄芪种子萌发及其对水杨酸的响应[J]. 草业科学, 2018, **35**(1): 106-114.
WANG N, GAO J, HUANG W J, *et al.* Variations in seed germination and salicylic acid protective effect between two cultivars of *Astragalus membranaceus* under drought and salt stress[J]. *Pratacultural Science*, 2018, **35**(1): 106-114.

[9] 国家药典委员会. 中华人民共和国药典[M]. 北京: 中国医药科技出版社, 2020.

[10] ZHENG Q X, WU H F, GUO J, *et al.* Review of rhubarbs: Chemistry and pharmacology[J]. *Chinese Herbal Medicines*, 2013, **5**(1): 9-32.

[11] 王玉, 杨雪, 夏鹏飞, 等. 大黄化学成分、药理作用研究进展及质量标志物的预测分析[J]. 中草药, 2019, **50**(19): 4 821-4 837.
WANG Y, YANG X, XIA P F, *et al.* Research progress on chemical composition and pharmacological effects of *Rhei Radix* et *Rhizoma* and predictive analysis on quality markers[J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, **50**(19): 4 821-4 837.

[12] 肖雪峰, 黄海波, 张稳, 等. 药用植物大黄的资源分布概况[J]. 吉林农业, 2018, (11): 80-81.
XIAO X F, HUANG H B, ZHANG W, *et al.* The distribution of resources of rhubarb[J]. *Agriculture of Jilin*, 2018, (11): 80-81.

[13] JOSEPH B, JINI D. Salinity induced programmed cell death in plants: Challenges and opportunities for salt-tolerant plants[J]. *Journal of Plant Sciences*, 2010, **5**(4): 376-390.

[14] 李欢, 张娜, 李依民, 等. 利用转录组测序挖掘掌叶大黄蒽醌类生物合成相关基因[J]. 药学报, 2018, **53**(11): 1 908-1 917.
LI H, ZHANG N, LI Y M, *et al.* High-throughput transcriptomic sequencing of *Rheum palmatum* L. seedlings and elucidation of genes in anthraquinone biosynthesis[J]. *Acta Pharmaceutica Sinica*, 2018, **53**(11): 1 908-1 917.

[15] 黑小斌, 李依民, 李欢, 等. 掌叶大黄种子特性研究及无菌培养体系的构建[J]. 中草药, 2019, **50**(18): 4 430-4 437.
HEI X B, LI Y M, LI H, *et al.* Investigation on seeds characteristics and establishment of aseptic cultural system for *Rheum palmatum* [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2019, **50**(18): 4 430-4 437.

[16] 刘有军, 刘世增, 康才周, 等. 两种云杉种子萌发和幼苗生长对环境因子的适应性[J]. 生态学报, 2019, **39**(2): 611-619.
LIU Y J, LIU S Z, KANG C Z, *et al.* Comparative adaptation of seed germination and seedling growth to environmental factors in two *Picea* plant species[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, **39**(2): 611-619.

[17] 李润枝, 靳晴, 李召虎, 等. 水杨酸提高甘草种子萌发和幼苗生长对盐胁迫耐性的效应[J]. 作物学报, 2020, **46**(11): 1 810-1 816.
LI R Z, JIN Q, LI Z H, *et al.* Salicylic acid improved salinity tolerance of *Glycyrrhiza uralensis* Fisch during seed germination and seedling growth stages[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, **46**(11): 1 810-1 816.

[18] 张通颖, 盛军, 王柔懿, 等. 盐碱胁迫和温度对猪毛蒿种子萌发的影响[J]. 草地学报, 2019, **27**(3): 581-588.
ZHANG T Y, SHENG J, WANG R Y, *et al.* Effects of salt-alkali stress and temperature on seed germination of *Artemisia scoparia*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2019, **27**(3): 581-588.

[19] 管博, 周道玮, 田雨, 等. 盐碱及变温条件对花苜蓿种子发芽的影响[J]. 中国草地学报, 2010, **32**(1): 58-63.
GUAN B, ZHOU D W, TIAN Y, *et al.* Effect of salinity, alkalinity and temperature on germination of *Medicago ruthenica* seeds[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2010, **32**(1): 58-63.

[20] 黄玉梅, 张杨雪, 刘庆林, 等. 水杨酸对盐胁迫下百日草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2015, **24**(7): 97-105.
HUANG Y M, ZHANG Y X, LIU Q L, *et al.* Effects of salicylic acid on seed germination and seedling physiological characteristics of *Zinnia elegans* under salt stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, **24**(7): 97-105.

[21] LANG D Y, YU X X, JIA X X, *et al.* Methyl jasmonate improves metabolism and growth of NaCl-stressed *Glycyrrhiza uralensis* seedlings[J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 266: 109 287.

[22] 孟长军, 杜春喜, 赵银萍. 外源水杨酸对喜树幼苗盐胁迫缓解效应的生理机制初探[J]. 东北农业科学, 2018, **43**(3): 23-27.
MENG C J, DU X C, ZHAO Y P. Physiological mechanism of mitigative effects of salicylic acid on salt-stressed *Camptotheca acuminata* seedlings[J]. *Journal of Northeast Agricultural Sciences*, 2018, **43**(3): 23-27.

[23] 何会流. 外源水杨酸对盐胁迫下凤仙花种子萌发特性的影响[J]. 北方园艺, 2013, (13): 75-77.
HE H L. Effect of exogenous salicylic acid on the seeds germination characters of *Impatiens balsamina* L. under NaCl stress[J]. *Northern Horticulture*, 2013, (13): 75-77.

[24] 赫兰保, 徐永清, 李凤兰, 等. 盐胁迫对鲁梅克斯杂交模式种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 草业科学, 2015, **32**(3): 400-405.
HE L B, XU Y Q, LI F L, *et al.* Effects of salt stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Rumex* [J]. *Pratacultural Science*, 2015, **32**(3): 400-405.

[25] 江绪文, 李贺勤. 外源水杨酸对盐胁迫下广藿香种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 中草药, 2015, **46**(15): 2 303-2 308.
JIANG X W, LI H Q. Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling growth of *Pogostemon cablin* under salt stress [J]. *Chinese Traditional and Herbal Drugs*, 2015, **46**(15): 2 303-2 308.

[26] 倪祥银, 齐泽民, 廖姝, 等. 外源水杨酸对 NaCl 胁迫下大豆种子萌发和幼苗生长生理的影响[J]. 西北植物学报, 2014, **34**(1): 106-111.
NI X Y, QI Z M, LIAO S, *et al.* Effects of exogenous salicylic acid on seed germination and seedling growth physiological characteristics of soybean under NaCl stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2014, **34**(1): 106-111.