

腐殖酸对 NaCl 胁迫下梭梭种子 萌发及幼苗生长的影响

王彬^{1,2}, 李诚志^{1,2,3}

(1.新疆大学 生态与环境学院, 新疆 乌鲁木齐 830046; 2.新疆大学 教育部绿洲生态重点实验室, 新疆 乌鲁木齐 830046; 3.新疆精河温带荒漠生态系统教育部野外科学观测研究站, 新疆 精河 833300)

摘要: [目的] 探究腐殖酸对 NaCl 胁迫下梭梭种子萌发及幼苗生长的影响, 为干旱矿区生态修复提供技术支持。[方法] 设置 5 个 NaCl 盐胁迫浓度, 5 个腐殖酸添加浓度, 观测梭梭种子萌发以及幼苗生长指标, 分析腐殖酸对梭梭种子萌发及其幼苗生长的耐盐性。[结果] 施用适量腐殖酸能显著提高种子萌发率, 缓解梭梭种子萌发过程中的盐胁迫, 促进初生根生长, 降低盐胁迫对幼苗的伤害。在 1.0 mol/L NaCl 条件下, 腐殖酸为 700 mg/kg 时缓解效果最好, 与对照相比梭梭发芽率、发芽势、根长、幼根鲜质量和幼根干质量分别提高 10%, 11.12%, 1.77 cm, 4.84 mg 和 4.03 mg。[结论] 腐殖酸可作为干旱矿区生态修复中种子萌发和幼苗生长的一种盐渍土调节剂, 具有较好的应用潜力。

关键词: 腐殖酸; NaCl 胁迫; 梭梭; 种子萌发; 幼苗生长

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2023)04-0095-08 **中图分类号:** Q945.79, S153.622

文献参数: 王彬, 李诚志. 腐殖酸对 NaCl 胁迫下梭梭种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2023, 43(4): 95-102. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2023.04.012; Wang Bin, Li Chengzhi. Effects of humic acid on seed germination and seedling growth of *Haloxylon ammodendron* under NaCl stress [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 95-102.

Effects of Humic Acid on Seed Germination and Seedling Growth of *Haloxylon Ammodendron* Under NaCl Stress

Wang Bin^{1,2}, Li Chengzhi^{1,2,3}

(1. College of Ecology and Environment, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China;

2. Key Laboratory of Oasis Ecology of Ministry of Education, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang 830046, China; 3. Xinjiang Jinghe Observation and Research Station of Temperate Desert Ecosystem, Ministry of Education, Jinghe, Xinjiang 833300, China)

Abstract: [Objective] The effects of humic acid on seed germination and seedling growth of *Haloxylon ammodendron* seeds under NaCl stress were studied in order to provide technical supports for ecological restoration in arid mining areas. [Methods] Germination and seedling growth of *Haloxylon ammodendron* seeds were measured under five NaCl stress concentrations and five humic acid additions. [Results] Application of humic acid at appropriate levels significantly increased seed germination rate, alleviated salt stress during the seed germination, increased the growth of primary roots, and reduced seedling damage caused by salt stress. Under 1.0 mol/L NaCl, humic acid at 700 mg/kg produced the best alleviating effect. For this treatment, germination rate, germination potential, root length, fresh mass of young roots, and dry mass of young roots were 10%, 11.12%, 1.77 cm, 4.84 mg, and 4.03 mg, respectively, greater than observed for the control treatment. [Conclusion] Humic acid can be used as a regulator of seed germination and seedling growth in the ecological restoration of arid mining areas. Humic acid has good potential for use as a regulator of saline soils in arid mining areas.

Keywords: humic acid; NaCl stress; *Haloxylon ammodendron*; seed germination; seedling growth

收稿日期: 2022-11-28

修回日期: 2022-12-22

资助项目: 阿克苏地区自然资源局“新疆塔河重要源区(阿克苏河流域)山水林田湖草沙一体化保护和修复工程关键问题和关键技术研究”(AKSSXM2022620)

第一作者: 王彬(1993—), 男(汉族), 甘肃省定西市人, 硕士研究生, 研究方向为干旱区矿山生态修复。Email: wb2000823@163.com。

通讯作者: 李诚志(1979—), 男(汉族), 湖南省资兴市人, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事干旱区生态修复研究。Email: xdlichengzhi@xju.edu.cn。

矿产资源是人类赖以生存和发展的重要物质基础,随着社会经济的快速发展和对矿产资源的不断开采,使矿区土地资源和生态环境遭到严重破坏,自然灾害频发^[1-2],严重影响区域经济与生态的协调可持续发展。近年来随着生态文明建设以及环境保护工作的推动发展,废弃矿山的环境治理与生态修复受到社会各界的广泛关注^[3]。植被重建是矿山生态修复的关键^[4],这一过程受气候、土壤和植物等多因素影响^[5-7],重建方法呈现多样性和复杂性。新疆维吾尔自治区矿产资源丰富,矿山开发面积大、范围广,亟需开展生态修复。开展这些生态修复工程前需研发适合当地的植被重建技术。干旱矿区通过自然演替恢复植被过程缓慢,难度较大^[8]。育苗移栽等技术由于高昂成本和后期养护的挑战限制了它的广泛使用^[9]。而播种具有使用简单,成本低等特点,是干旱地区广泛使用的一种生态恢复技术^[10]。在干旱矿区播种具有极大的挑战性,种子发芽和早期幼苗生长是盐碱条件下建立植物种群的关键阶段,盐度的增加通常会延迟和降低种子萌发^[11]。此外,大多数项目受极端温度^[12]、盐胁迫^[13]、较低的土壤水分^[14]及土壤肥力等^[15]的影响发芽率和建植率较低^[16],而且从种子萌发到幼苗以及植物的生长过程中死亡率很高^[17]。新疆维吾尔自治区是典型的干旱区,受水热条件和成土母质影响,土壤含盐量普遍偏高^[18-20]。在植被重建过程中,自然降水或人工灌溉会使土壤中可溶性盐随水分运移到地表并累积,形成大面积盐碱土^[19]。土壤中盐分的增加会显著提高土壤重金属的迁移能力,特别是对于 Cd 和 Pb 两种元素,这将严重阻碍植被重建,特别是限制种子的萌发和幼苗的生长,增加废弃矿区生态修复难度^[20]。因此,减缓盐碱土对种子萌发和幼苗生长的限制是干旱矿区利用种子重建植被需突破的关键技术,在干旱矿区盐碱土条件下的种子萌发具有十分重要的现实意义。

腐殖酸(HAs)作为一种天然的聚合有机化合物,能够与多种微量元素形成复合物^[21],被广泛应用于植物对逆境抗性研究中。众多研究表明,少量施用 HAs 可以间接改变土壤结构,进而通过提高营养物质的吸收和激素效应来促进植物生长,并且对微量营养元素的转运和利用尤为重要^[22]。此外,HAs 通过参与细胞呼吸、光合作用等活动对植物生长和生产力产生积极影响^[23]。目前,HAs 主要以农业运用研究为主,在矿区生态修复中运用较少,且在干旱矿区盐碱土条件下对种子萌发及幼苗生长的作用暂不明确,因此需要开展相关科学研究。

梭梭(*Haloxylon ammodendron*)隶属于藜科

(Chenopodiaceae)落叶小乔木或灌木。根系发达,抗干旱、盐碱能力强,是中国西北干旱地区生态修复、水土保持、防风固沙的重要物种之一^[24],也是荒漠植物生物量最高的植被类型。中国有 68% 的梭梭林分布在新疆,其中准噶尔盆地的分布面积占新疆地区总面积的 94%,是古尔班通古特沙漠植被的优势种和建群种^[25],对于干旱区生态修复和生态环境保护起着举足轻重地位。然而,近年来受自然和人为等因素的影响,梭梭林出现大面积退化死亡^[26],这可引发土地沙漠化,盐碱化和土壤物理属性和碳循环的变化^[27-28]。因此,本研究通过 NaCl 浓度模拟不同盐胁迫梯度条件,在不同盐胁迫梯度下施加不同质量的 HAs,测试梭梭种子在 HAs 影响下萌发率和幼苗生长特性,同时探究 HAs 对梭梭种子萌发及其生长的盐胁迫缓解作用,为干旱矿区生态修复提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验材料

梭梭植物种子于 2021 年 10 月采集于新疆准噶尔盆地。准噶尔盆地属典型温带大陆性荒漠气候,光照充足,降水量少,蒸发量大^[29],生态环境极其脆弱。梭梭具有很强的抗干旱、耐盐碱能力,在气候干旱、盐碱土广布的新疆荒漠区,是适生于该地的植物类群。梭梭种子经过晾干、去除羽翅,挑选颗粒饱满、充分成熟的种子进行试验,种子千粒重 3.451 ± 0.23 g。经干燥、清洁处理后存放于 4 °C 的冷藏箱中保存。试验所用 HAs,NaCl 分别来源于多美绿生物科技有限公司、天津市北联精细化学品开发有限公司。

1.2 研究方法

梭梭种子使用 75% 的酒精消毒 1~2 min 后用去离子水冲洗 3 遍,再用滤纸吸干表面水分备用。本试验设置 3 种梭梭种子萌发环境处理:①处理 1。梭梭种子在 5 个盐浓度溶液中萌发,即 0.1,0.3,0.5,0.7 和 1.0 mol/L 这 5 个 NaCl 浓度梯度;②处理 2。梭梭种子在 5 个 HAs 浓度溶液中萌发,即 0,100,400,700 和 1 000 mg/kg 这 5 个 HAs 质量梯度;③处理 3。梭梭种子在 NaCl 和 HAs 双因素影响下的萌发,NaCl 胁迫设 5 个浓度梯度(同上),HAs 设 5 个质量梯度(同上),分别以纯水为对照组;共计 30 个处理,每个处理 3 个重复。所有试验采用培养皿纸上发芽法,每个培养皿放置 30 粒种子。最后将处理完毕的培养皿放置在湿度 70%,昼夜 25 °C/15 °C 恒温培养箱中进行萌发试验。

1.3 指标测定

按照国家标准《林木种子检验规程(GB2722-

1999)》进行发芽试验,本次试验以 10 d 为期限。以试验第 2 d 为初始日期,每天使用分析天平定时对培养皿进行称重,依据重量变化,向培养皿内加入去离子水,以此来补偿由于种子吸收及水分蒸发而损失的水分,确保 HAs 和 NaCl 浓度的恒定,观察并记录发芽的种子数。试验第 8 d,从每组随机挑选 10 株梭梭幼苗(幼苗少于 10 株的处理,取所有幼苗),用去离子水小心冲洗根系并测定每处理中萌发种子的根长,用滤纸吸干根系表面水分后测定根鲜质量;将鲜根置于 105 ℃ 的烘箱中杀青 30 min,80 ℃ 烘干至恒重,测定其干重。以上形态指标各测定 10 株,取平均值,重复 3 次。

1.4 数据处理

各指标的计算公式为:

$$\text{发芽率} = \frac{6 \text{ d 种子发芽数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\% \quad (1)$$

$$\text{发芽势} = \frac{3 \text{ d 内种子发芽数}}{\text{供试种子总数}} \times 100\% \quad (2)$$

$$\text{平均发芽速率} = \frac{\sum G_t \cdot D_t}{\sum D_t} \quad (3)$$

$$\text{发芽指数} = \sum \frac{G_t}{D_t} \quad (4)$$

$$\text{盐害率} = \frac{\text{对照萌发率} - \text{处理萌发率}}{\text{对照萌发率}} \times 100\% \quad (5)$$

式中: G_t 为当天的种子发芽数; D_t 为对应发芽日数。

采用 SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA),用 Origin 2018 软件绘图。

2 结果与分析

2.1 NaCl 胁迫对梭梭种子萌发的影响

NaCl 对梭梭种子萌发具明显抑制作用,不同 NaCl 浓度处理下的梭梭种子萌发状况如表 1 所示。与对照相比,随着 NaCl 浓度升高,梭梭种子的发芽势、发芽率、平均发芽速率及发芽指数均呈降低趋势。其中,0.1 mol/L NaCl 处理下梭梭种子的发芽率、发芽势、平均发芽速率、发芽指数与 CK 差异不显著($p > 0.05$);0.3~1 mol/L NaCl 处理使发芽率、发芽势、平均发芽速率显著降低($p < 0.05$);1 mol/L NaCl 处理使发芽势、发芽率、平均发芽速率、发芽指数较 CK 分别降低了 43.34%,46.66%,12.38,18.51。此外,随着 NaCl 浓度的升高,梭梭种子萌发的相对盐害率增加,其中 1 mol/L 处理相对盐害率高达 52.85%。

表 1 不同浓度 NaCl 对梭梭种子萌发的影响

Table 1 Effects of different concentrations of NaCl on seed germination of *H. ammodendron*

NaCl 浓度/(mol · L ⁻¹)	发芽率/%	发芽势/%	平均发芽速率	发芽指数	相对盐害率/%
CK	83.33±0.027 ^a	67.78±0.016 ^a	21.94±0.662 ^a	34.20±1.888 ^{ab}	0
0.1	71.11±0.057 ^{ab}	56.67±0.047 ^{ab}	19.42±1.482 ^{ab}	38.41±2.954 ^a	8.58
0.3	60.00±0.098 ^{bc}	47.78±0.113 ^b	16.18±3.264 ^{bc}	31.77±8.181 ^{ab}	22.86
0.5	62.22±0.087 ^{bc}	46.67±0.119 ^b	16.60±2.951 ^{bc}	30.52±8.627 ^{ab}	20.01
0.7	54.44±0.083 ^c	38.89±0.057 ^{bc}	14.25±2.089 ^{cd}	23.63±3.713 ^{bc}	30.01
1.0	36.67±0.047 ^d	24.44±0.057 ^c	9.56±1.286 ^d	15.69±3.493 ^c	52.85

注:数值为平均值±标准误;同列不同小写字母表示各处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

2.2 HAs 浓度对梭梭种子萌发的影响

HAs 施用对梭梭种子萌发有明显影响。由表 2 可知,随 HAs 质量的提高,梭梭种子的发芽率、发芽势、平均发芽速率和发芽指数呈先升高后降低趋势。400 mg/kg HAs 处理时,梭梭种子发芽势、发芽率、平均发芽速率、发芽指数显著提高($p < 0.05$),较 CK 相比分别提高 13.34%,11.11%,3.43,6.29。100 和

700 mg/kg HAs 处理时,梭梭种子的平均发芽速率和发芽指数与 CK 差异不显著($p > 0.05$);1 000 mg/kg HAs 处理使梭梭种子发芽势、发芽率、平均发芽速率、发芽指数较 CK 分别降低了 12.22%,5.55%,2.88,5.57。由此可见,种子在萌发阶段需要一定的养分,施用适量的腐殖酸能显著提高梭梭种子的萌发,而含量过多则不利于甚至限制种子萌发。

表 2 不同浓度腐殖酸处理对梭梭种子萌发的影响

Table 2 Effects of different concentrations of humic acid on seed germination of *H. ammodendron*

HAs 浓度/(mg · kg ⁻¹)	发芽率/%	发芽势/%	平均发芽速率	发芽指数
CK	83.33±0.027 ^{cd}	67.78±0.016 ^b	21.94±0.662 ^b	34.20±1.888 ^b
100	93.33±0.027 ^{ab}	63.33±0.054 ^{bc}	23.54±1.143 ^b	37.17±2.735 ^b
400	96.67±0.027 ^a	78.89±0.016 ^a	25.37±0.700 ^a	40.49±1.312 ^a
700	87.78±0.016 ^{bc}	60.00±0.027 ^{cd}	22.22±0.516 ^b	33.65±1.304 ^b
1 000	77.78±0.016 ^d	55.56±0.016 ^d	19.06±0.340 ^c	28.63±1.296 ^c

2.3 NaCl 和 HAs 双因素对梭梭种子萌发的影响

对 NaCl 和 HAs 影响下梭梭种子发芽率、发芽势、平均发芽速率和发芽指数进行双因素方差分析。

表 3 不同 NaCl 与 HAs 以及二者相互作用下梭梭种子萌发指标的双因素方差分析

Table 3 Two-factor ANOVA analysis of NaCl, HAs and their interaction on percentage of germination indicators of *H. ammodendron*

偏差来源	自由度	发芽率/%		发芽势/%		平均发芽速率		发芽指数	
		F	p	F	p	F	p	F	P
NaCl	5	160.819	0.000	60.815	0.000	87.148	0.000	57.684	0.000
HAs	4	17.206	0.000	5.71	0.001	11.715	0.000	4.011	0.006
NaCl×HAs	20	1.176	0.036	0.873	0.026	1.105	0.039	1.086	0.038
误差	60								
总和	90								
	89								

NaCl 与 HAs 双因素对梭梭种子萌发的影响如图 1 所示。

从图 1 可知,施用 100~700 mg/kg HAs 均能提高梭梭种子的发芽率,其中在 0.1,0.3 和 1.0 mol/L

的 NaCl 浓度下,施用不同质量的 HAs 均能显著提高梭梭种子的萌发率;在 0.5 和 0.7 mol/L NaCl 浓度下,HAs 施用也能提高梭梭种子的萌发率,但无显著性($p>0.05$)。

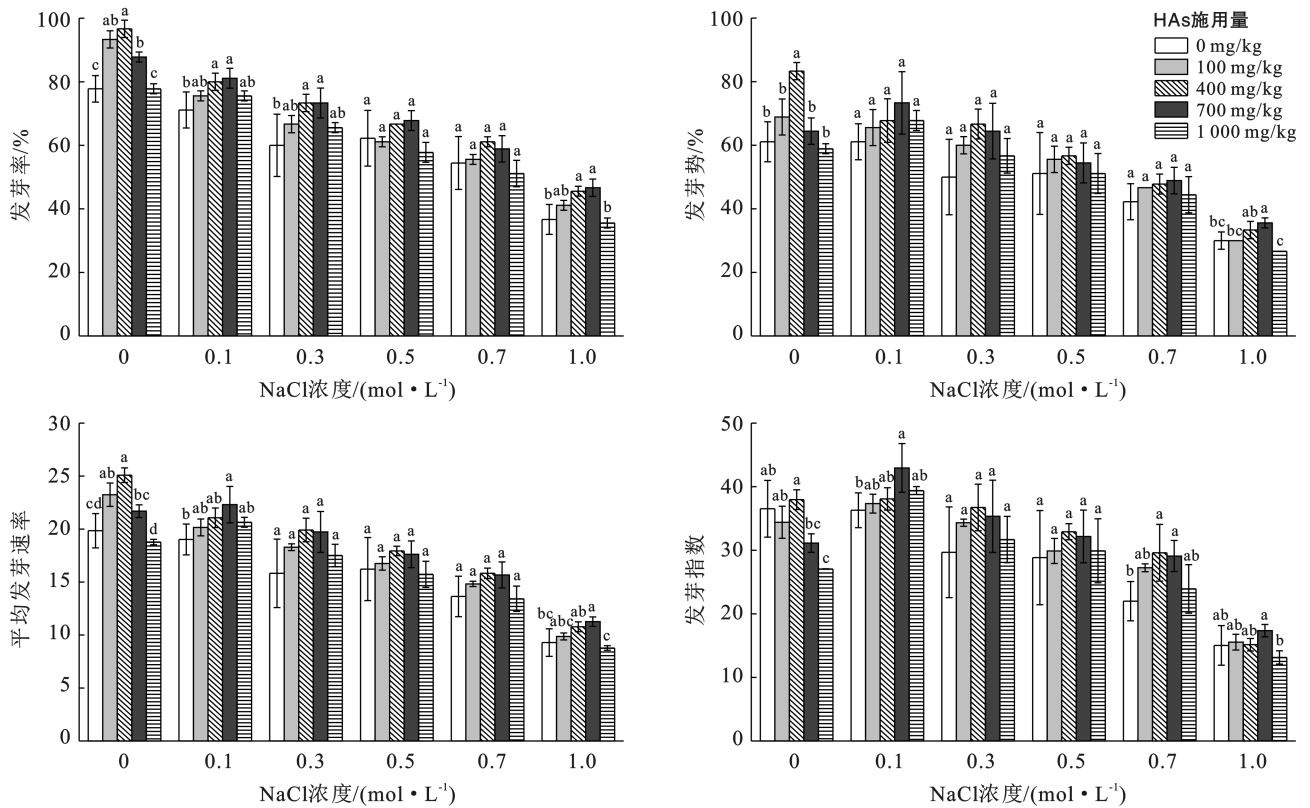


图 1 不同腐殖酸(HAs)处理对 NaCl 胁迫下梭梭种子发芽率、发芽势、平均发芽速率和发芽指数的影响

Fig.1 Effects of different humic acid (HAs) treatments on germination rate, germination potential, mean germination rate and germination index of *H. ammodendron* seeds under NaCl stress

当施用 1 000 mg/kg HAs 时,梭梭种子发芽率受到抑制,低于 0.5~1 mol/L 单一 NaCl 胁迫处理下梭梭种子的发芽率。在 0.1~0.7 mol/L NaCl 浓度下,HAs 施用对梭梭种子发芽势均具有提升作用,但无

显著差异($p>0.05$)。在 1 mol/L NaCl 浓度下,400 和 700 mg/kg 的 HAs 施用能提升梭梭种子发芽势,但 700 mg/kg 效果最好,提高了 11.12%;1 000 mg/kg 的 HAs 施用则会降低梭梭种子发芽势。HAs 施用

使梭梭种子平均发芽速率和发芽指数均有不同程度的改变,且随 HAs 浓度增加,缓解效果呈现先增加后下降的趋势。施用 100~700 mg/kg HAs 时均能提高梭梭种子的平均发芽速率和发芽指数,其中 400 和 700 mg/kg HAs 施用对不同 NaCl 浓度下梭梭种子平均发芽速率和发芽指数的缓解作用最好;在 0.1 和 1.0 mol/L 的 NaCl 胁迫下存在显著差异($p < 0.05$),而在 0.3~0.7 mol/L NaCl 胁迫下无显著差异($p > 0.05$);1 000 mg/kg HAs 施用则会降低平均发芽速率和发芽指数,在 1 mol/L NaCl 浓度下显著降低($p < 0.05$)。由此得出,低浓度(< 700 mg/kg)的 HAs 施用对 NaCl 胁迫下梭梭种子的萌发具有促进作用,能提高梭梭种子的发芽率、发芽势、平均发芽速度、发芽指数,其中 700 mg/kg 的 HAs 施用效果较好。

2.4 NaCl 与 HAs 双因素对梭梭幼苗生长和生物量的影响

根是植物主要营养器官,具有固定植物和吸收水分的功能,其生理状况直接影响着植物生长和存活。由图 2 可知,在无 HAs(0 mg/kg)施用的情况下,随 NaCl 浓度的不断上升,梭梭幼苗根生长受到显著抑制($p < 0.05$)。当 NaCl 浓度为 1 mol/L 时,梭梭幼苗根长较 CK 缩短 3.91 cm。HAs 施用能缓解 NaCl 胁迫对梭梭幼苗根生长的抑制作用,随着 HAs 质量的增加,不同 NaCl 浓度下梭梭幼苗根长均呈现一定的增长;其中,施用 HAs 质量为 700 mg/kg 时,各 NaCl 浓度下的梭梭幼根增长幅度最大,在 0.7 mol/L 的 NaCl 浓度中增幅最大,增长了 25.47%。由此得出,施用适量的 HAs 能够促进梭梭幼根的生长,从而增强梭梭适应环境的能力,且施用 700 mg/kg HAs 的缓解效果最佳。

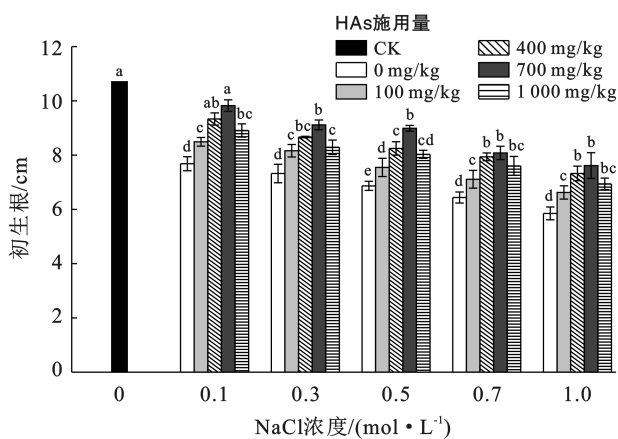


图 2 腐殖酸(HAs)对 NaCl 胁迫下梭梭种子幼根的影响
Fig.2 Effect of humic acid (HAs) on young seed roots of *H. ammodendron* under NaCl stress

HAs 施用对梭梭幼苗根生物量有明显影响,如图 3 所示,随 NaCl 浓度增加,梭梭幼根鲜重和根干重均不断减少。NaCl 胁迫对梭梭幼苗生物量的增长具有一定抑制作用。1 mol/L NaCl 处理下,幼苗根鲜重和根干重较对照分别降低了 66.67% 和 61.40%。施用适当的 HAs 可以缓解 NaCl 胁迫对梭梭幼苗根生长的影响,其中,700 mg/kg HAs 施用对不同 NaCl 浓度下梭梭幼根鲜重和幼根干重的缓解作用最为显著($p < 0.05$)。当 HAs 质量大于 700 mg/kg 时,梭梭幼根鲜重和幼根干重则明显下降。这说明 700 mg/kg HAs 施用最能缓解 NaCl 胁迫对梭梭幼苗生长的影响,促进植物生长和养分的吸收,从而缓解盐胁迫的损害。

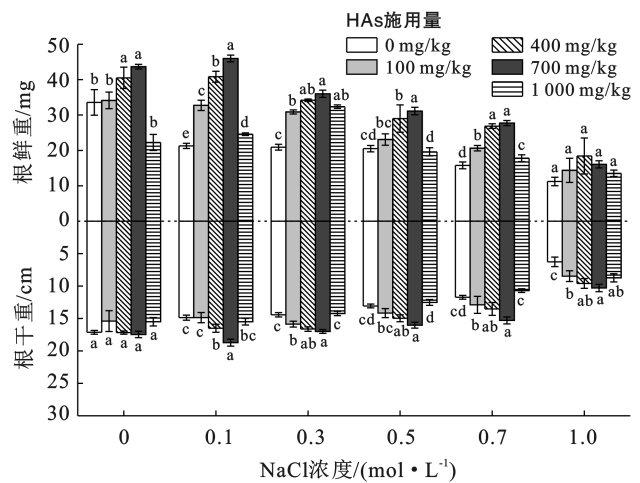


图 3 腐殖酸(HAs)处理对 NaCl 胁迫下梭梭幼苗生物量的影响

Fig.3 Effects of different humic acid (HAs) treatments on biomass of *H. ammodendron* seedlings under NaCl stress

3 讨论

植被作为生态系统物质循环和能量交换的枢纽,是开展矿区生态修复最直接的指示因子^[30]。在干旱矿区生态修复过程中,植被重建面临着土壤高度盐碱化、极端 pH 值、极端贫瘠和重金属毒害等问题,它们会影响植物代谢途径进而降低植物存活率^[31],制约着干旱矿区植被重建过程。前人研究表明,土壤含盐量高可能是影响干旱矿区生态修复过程中植被成活率低的主要原因之一,因此缓解盐胁迫是干旱矿区生态修复过程中面临的突出难题^[9]。植物种子萌发期和幼苗期对不利环境条件最为敏感^[32],是矿山植被重建过程中的关键时期。过高的土壤盐分含量会降低土壤水分渗透势^[33],对植物幼苗生长及发育产生负面效应^[34],并可能引起细胞内离子失衡,致使植物

代谢紊乱和生产力降低,最终导致植被死亡。本研究显示,随 NaCl 浓度的上升,梭梭种子各萌发指标均呈下降趋势(表 1)。Zhumabekova 等^[35]研究表明,梭梭种子在 NaCl 浓度为 0.00~0.06 mol/L 时仍具有较高萌发率(>76%),当 NaCl 浓度上升到 0.80 mol/L 时,萌发率呈急剧下降趋势;这与本试验的研究结果不符,这可能是由于不同地区植物种子在盐胁迫下萌发指标的下降幅度不一致,且浓度之间也存在差异。

盐胁迫会抑制种子萌发和幼苗生长,因此,制定科学合理的技术措施减缓盐胁迫对种子萌发和幼苗早期发育的负面影响具有十分重要的意义。在不同环境条件下,使用特定的保护剂对种子进行处理可以刺激种子萌发代谢过程,提高种子性能。近年来,人们发现植物生长调节剂可能是实现这一目标的有效途径^[36]。许多研究者^[37]认为,腐殖质可以增强植物对某些营养物质的吸收,减少对有毒元素的吸收,改善植物对盐度的反应。本研究显示,≤700 mg/kg HAs 施用均能缓解 NaCl 胁迫对梭梭种子萌发的抑制,提升种子萌发率。过高的 HAs(1 000 mg/kg)施用,则可能加大 NaCl 胁迫,降低梭梭种子的萌发率(图 1)。在本研究的 NaCl 浓度中,700 mg/kg HAs 施用对 NaCl 胁迫下梭梭种子萌发率的缓解作用最好。此外,HAs 的施用能显著提高盐胁迫下的梭梭种子发芽势及平均发芽速率,缩短种子萌发时间。其中在 1 mol/L NaCl 浓度下,700 mg/kg 的 HAs 施用对梭梭种子发芽势和平均发芽速率提升效果最为明显,分别提高 5.56% 和 1.98。这对于干旱矿区种子萌发非常重要。干旱区降雨量少,且多为短时降雨,再加蒸发量大,种子必须迅速萌发与生长,充分利用短暂的高土壤湿度期,增加植被重建成活率。在种子播种时施用适量 HAs,不仅可以减缓 NaCl 胁迫对种子萌发的不利影响,也可缩短种子萌发时间,有效利用降雨,增强幼苗成活率。

植物汲取水分和养分的能力很大程度上取决于根系的生长形态及活力状态^[38],对植物生长发育和耐盐胁迫能力具有重要作用^[39]。在土壤盐碱条件下,根系对环境逆境信号的感受最为敏感,因此根系的生长情况与活力状况将直接决定植物的生长发育、营养状况及产量水平。已有研究^[40]表明,在盐胁迫下施用 HAs 不仅可以提高植物各器官的宏观养分含量,同时增加其微量养分含量。本研究表明,HAs 能通过增加幼根生物量促进其生长,进而缓解 NaCl 胁迫对梭梭幼苗生长的抑制作用。当的 NaCl 浓度为 0.1~1 mol/L 时,施用 HAs 均对梭梭幼根所受到的

盐胁迫有缓解作用,随着 HAs 浓度的增加缓解作用呈先增加后减少趋势,HAs 施用量为 700 mg/kg 时缓解效果最佳。Türkmen 等人^[40]研究表明,在盐胁迫下施加 HAs 会增加番茄幼苗根的长度,且适当浓度的 HAs 对盐胁迫的改善作用最为明显;Khaled 等^[41]也研究了番茄幼苗生长对不同浓度 HAs 处理的响应,结果表明存在浓度效应,即过低和过高浓度的 HAs 均不适宜植物生长,这与本研究的结果具有相似性。干旱矿区降水少,蒸发量大,土壤表面水分含量低,因此导致种子萌发及生长受阻。HAs 的施用不仅能提高种子萌发率和萌发速率,还能促进幼苗生物量和根系的生长,这有利于梭梭根系在土壤表层水分完全蒸发之前扎根到更深的土壤层中,汲取有效水分及营养,增加梭梭幼苗的成活率。此外,干旱矿区土壤极为贫瘠,且含盐量高,HAs 的施用不仅能改善土壤基质,而且可以为种子萌发及生长提供大量营养物质,这将有利于提升植物种子的顶土、扎根及抗盐胁迫能力,进而提升干旱矿区植被重建成功率。

综上所述,适宜浓度的 HAs 施用不仅能缓解盐胁迫对梭梭种子萌发的抑制,提升种子萌发率,而且对生物量的增长效果显著,从而使植物生长得更强壮,这对于干旱矿区植被重建与生态修复具有重要意义。干旱区矿山土壤具有极端贫瘠、高度盐碱化、水分含量低和持水保肥能力差等问题。HAs 的施用还能显著降低土壤水分蒸发,提高土壤中养分生物的有效性^[21],在改善土壤结构和土壤物理性质的同时,通过提高营养物质的吸收和激素效应来促进植物生长,从而优化修复效果。除此之外,HAs 具有携带方便、易溶于水等优点,在种子播种或灌溉时均可直接进行施用。干旱区生态修复过程中除盐分和养分影响外,还有水分、温度和光照等多种因素,多种因素共同作用对种子萌发的影响有待于进一步探究。

4 结论

本研究表明,施用适量浓度的 HAs 可缓解 NaCl 胁迫对梭梭种子萌发和幼苗根生长的影响。在不同 NaCl 浓度下,外源施用 100~700 mg/kg HAs 均能不同程度促进梭梭种子的萌发和幼苗根生长,增加幼苗根生物量,提高梭梭种子萌发过程中的耐盐性,进而缓解盐胁迫对梭梭的伤害。在对梭梭不产生抑制作用及毒害的前提下,施用 700 mg/kg 腐殖酸效果最佳。本研究阐述了 HAs 对 NaCl 胁迫下梭梭种子萌发和幼苗生长的影响,对于干旱矿区其他盐(如 Na_2SO_4 , Na_2CO_3 , NaHCO_3 等常见盐以及多种盐)胁迫的影响还有待进一步研究,但该研究成果对以

NaCl盐土为主的干旱矿区梭梭生态系统恢复与重建具有一定的参考价值,也为干旱矿区生态修复技术研发提供一定借鉴。

[参 考 文 献]

- [1] 关军洪,郝培尧,董丽,等. 矿山废弃地生态修复研究进展[J]. 生态科学, 2017, 36(2): 193-200.
- [2] Liu Shiliang, Li Wenping, Qiao Wei, et al. Effect of natural conditions and mining activities on vegetation variations in arid and semiarid mining regions [J]. Ecological Indicators, 2019, 103: 331-345.
- [3] 张鸿龄, 孙丽娜, 马国峰, 等. 北方地区铁矿废弃地基质改良及植被恢复技术[J]. 生态学杂志, 2018, 37(10): 3130-3136.
- [4] 白梦杰. 十种荒漠植物种子萌发与出苗的生态特性研究[D]. 甘肃兰州: 兰州大学, 2019.
- [5] Wang Tingting, Chu Guangming, Jiang Ping, et al. Effects of sand burial and seed size on seed germination, seedling emergence and seedling biomass of *Anabasis aphylla* [J]. Pakistan Journal of Botany, 2017, 49(2): 391-396.
- [6] Zhu Yajuan, Yang Xuejun, Baskin C C, et al. Effects of amount and frequency of precipitation and sand burial on seed germination, seedling emergence and survival of the dune grass *Leymus secalinus* in Semiarid China [J]. Plant and Soil, 2014, 374(1): 399-409.
- [7] Guo Cairu, Wang Zhenglong, Lu Jiqi. Seed germination and seedling development of *Prunus armeniaca* under different burial depths in soil [J]. Journal of Forestry Research, 2010, 21(4): 492-496.
- [8] Van den Berg L, Kellner K. Restoring degraded patches in a semi-arid rangeland of South Africa [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 61(3): 497-511.
- [9] Pérez D R, González F, Ceballos C, et al. Direct seeding and outplantings in drylands of *Argentinean patagonia*: Estimated costs, and prospects for large-scale restoration and rehabilitation [J]. Restoration Ecology, 2019, 27(5): 1105-1116.
- [10] Miguel M F, Butterfield H S, Lortie C J. A meta-analysis contrasting active versus passive restoration practices in dryland agricultural ecosystems [J]. Peerj, 2020, 23(8): e10428.
- [11] Gulzar S, Khan M A, Ungar I A. Effect of salinity and temperature on the germination of *Urochondra setulosa* (Trin.) CE Hubbard [J]. Seed Science and Technology, 2001, 29(1): 21-30.
- [12] Bainbridge D A. A Guide for Desert and Dryland Restoration: New Hope for Arid Lands [M]. Washington D C: Island Press, 2012.
- [13] Ahammed G J, He B B, Qian X J, et al. 24-Epibrassinolide alleviates organic pollutants-retarded root elongation by promoting redox homeostasis and secondary metabolism in *Cucumis sativus* L [J]. Environmental Pollution, 2017, 229: 922-931.
- [14] Porensky L M, Leger E A, Davison J, et al. Arid old-field restoration: native perennial grasses suppress weeds and erosion, but also suppress native shrubs [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2014, 184: 135-144.
- [15] Millennium ecosystem assessment M E A. Ecosystems and Human Well-being [M]. Washington D C: Island Press, 2005.
- [16] James J J, Svejcar T J, Rinella M J. Demographic processes limiting seedling recruitment in arid grassland restoration [J]. Journal of Applied Ecology, 2011, 48(4): 961-969.
- [17] Lewandrowski W, Erickson T E, Dixon K W, et al. Increasing the germination envelope under water stress improves seedling emergence in two dominant grass species across different pulse rainfall events [J]. Journal of Applied Ecology, 2017, 54(3): 997-1007.
- [18] Metternicht G, Zinck A. Remote Sensing of Soil Salinization: Impact on Land Management [M]. Boca Raton: CRC Press, 2008.
- [19] 陈小兵, 杨劲松, 刘春卿, 等. 大农业条件下新疆土壤盐碱化及其调控对策(1) [J]. 土壤, 2007, 39(3): 347-353.
- [20] 鲁佳, 方维萱, 王磊. 干旱盐渍化土壤与绿色矿山发展 [J]. 地质论评, 2020, 66(S1): 179.
- [21] Trevisan S, Francioso O, Quaggiotti S, et al. Humic substances biological activity at the plant-soil interface: From environmental aspects to molecular factors [J]. Plant Signaling & Behavior, 2010, 5(6): 635-643.
- [22] Zanin L, Tomasi N, Cesco S, et al. Humic substances contribute to plant iron nutrition acting as chelators and biostimulants [J]. Frontiers in Plant Science, 2019, 10: 675.
- [23] Zhang X, Ervin E H, Schmidt R E. Plant growth regulators can enhance the recovery of Kentucky bluegrass sod from heat injury [J]. Crop Science, 2003, 43(3): 952-956.
- [24] 王国华, 陈蕴琳, 缙倩倩. 荒漠绿洲过渡带不同年限雨养梭梭(*Haloxylon ammodendron*)对土壤水分变化的响应 [J]. 生态学报, 2021, 41(14): 5658-5668.
- [25] 司朗明, 刘彤, 刘斌, 等. 古尔班通古特沙漠西部梭梭种群退化原因的对比分析 [J]. 生态学报, 2011, 31(21): 6460-6468.
- [26] 李中赫, 刘彤. 古尔班通古特沙漠西部退化梭梭群落多样性与土壤理化性质的关系 [J]. 应用与环境生物学报,

- 2018,24(5):1165-1170.
- [27] Hu Hongchuang, Wang Genxu, Liu Guangsheng, et al. Influences of alpine ecosystem degradation on soil temperature in the freezing-thawing process on Qinghai-Tibet Plateau [J]. *Environmental Geology*, 2009,57(6):1391-1397.
- [28] Wang Genxu, Wang Yibo, Li Yuanshou, et al. Influences of alpine ecosystem responses to climatic change on soil properties on the Qinghai-Tibet Plateau, China [J]. *Catena*, 2007,70(3):506-514.
- [29] 张元明,潘惠霞,潘伯荣.古尔班通古特沙漠不同地貌部位生物结皮的选择性分布[J].*水土保持学报*,2004,18(4):61-64.
- [30] Zhao D, Lei Q, Shi Y, et al. Role of species and planting configuration on transpiration and microclimate for urban trees [J]. *Forests*, 2020,11(8):1-18.
- [31] Li Ming Shun. Ecological restoration of mineland with particular reference to the metalliferous mine wasteland in China: a review of research and practice [J]. *Science of the Total Environment*, 2006,357(1/3):38-53.
- [32] He Junyu, Ren Yanfang, Chen Xiulan, et al. Protective roles of nitric oxide on seed germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) under cadmium stress [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2014,108:114-119.
- [33] Iwai C B, Oo A N, Topark-ngarm B. Soil property and microbial activity in natural salt affected soils in an alternating wet-dry tropical climate [J]. *Geoderma*, 2012,189:144-152.
- [34] Farhangi-Abri S, Ghassemi-Golezani K. How can salicylic acid and jasmonic acid mitigate salt toxicity in soybean plants? [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018,147:1010-1016.
- [35] Zhumabekova Z, Xu Xinwen, Wang Yongdong, et al. Effects of sodium chloride and sodium sulfate on *Haloxylon ammodendron* seed germination [J]. *Sustainability*, 2020,12(12):4927-4946.
- [36] Manai J, Gouia H, Corpas F J. Redox and nitric oxide homeostasis are affected in tomato (*Solanum lycopersicum*) roots under salinity-induced oxidative stress [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014,171(12):1028-1035.
- [37] Karimi E, Shirmardi M, Dehestani Ardakani M, et al. The effect of humic acid and biochar on growth and nutrients uptake of calendula (*Calendula officinalis* L.) [J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2020,51(12):1658-1669.
- [38] Giehl R F H, Gruber B D, von Wirén N. It's time to make changes: modulation of root system architecture by nutrient signals [J]. *Journal of Experimental Botany*, 2014,65(3):769-778.
- [39] 董桂春,陈琛,袁秋梅,等.氮肥处理对氮素高效吸收水稻根系性状及氮肥利用率的影响[J].*生态学报*,2016,36(3):642-651.
- [40] Türkmenö, Dursun A, Turan M, et al. Calcium and humic acid affect seed germination, growth, and nutrient content of tomato (*Lycopersicon esculentum* L.) seedlings under saline soil conditions [J]. *Acta Agriculturae Scandinavica (Section B: Soil & Plant Science)*, 2004,54(3):168-174.
- [41] Khaled H, Fawy H A. Effect of different levels of humic acids on the nutrient content, plant growth, and soil properties under conditions of salinity [J]. *Soil and Water Research*, 2011,6(1):21-29.

(上接第 94 页)

- [28] Song Shuang, Wang Shaohan, Shi Mengxi, et al. Influence of landscape pattern type on soil erosion [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2022,29(5):85-92.
- [29] Song Daping, Li Hong, Liu Shanjiang, et al. A geostatistic investigation of the comprehensive evaluation of fertility and spatial heterogeneity of forest soil nutrients in hilly and mountainous regions of Southern China [J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2019,12(9):1-9.
- [30] 蒙仲举,王猛,王淮亮,等.基于数字成像技术的风蚀地表颗粒空间异质性[J].*干旱区研究*,2016,33(6):1270-1277.
- [31] 胡广录,樊立娟,王德金,等.荒漠—绿洲过渡带斑块植被表层土壤颗粒的空间异质性[J].*兰州交通大学学报*,2013,32(6):159-164.
- [32] Hou Kai, Qian Hui, Zhang Yuting, et al. Relationship between fractal characteristics of grain-size and physical properties: Insights from a typical loess profile of the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2021,207:105653.
- [33] 傅伯杰,陈利顶,邱扬,等.黄土丘陵小流域土壤物理性质的空间变异[J].*地理学报*,2002,57(5):587-594.