

DOI: 10.3969/j.issn.0488-5368.2026.04.001

· 育种 · 生理 ·

盐碱胁迫下生物基磺酸盐对骆驼蓬种子萌发 及幼苗生长的影响

李杭霏¹, 钱大益^{1,2}, 安丽媛¹, 王蓉¹, 王晓娜², 汪群慧², 李紫薇¹

(1. 伊犁师范大学 化学化工学院 新疆生物质资源清洁转化与高值利用重点实验室, 新疆 伊宁 835000;

2. 北京科技大学 能源与环境工程学院, 北京 100083)

摘要:以骆驼蓬(*Peganum harmala*)为试验材料,探究盐碱胁迫条件下施用生物基磺酸盐水溶肥对其种子萌发及幼苗耐盐碱特性的调控作用,以期通过水溶肥施用结合提升耐盐碱骆驼蓬的种植,为改良新疆盐碱地提供新思路。试验设置三种盐碱胁迫水平(轻度A组、中度B组、重度C组)和三种水溶肥稀释倍数(100倍、300倍、500倍)。结果表明,盐碱胁迫普遍抑制骆驼蓬种子的萌发与幼苗生长,其中重度盐碱胁迫的抑制作用最为显著,相对盐害率达22.80%;中度盐碱胁迫抑制作用最弱,相对盐害率为4.88%。施用不同稀释倍数的生物基磺酸盐水溶肥均能有效缓解盐碱胁迫,提高骆驼蓬的萌发率、生长及生理指标,其中300倍稀释处理效果最优。在重度盐碱胁迫条件下,较对照组(C-0),300倍稀释处理组(C-300)骆驼蓬幼苗的可溶性糖、叶绿素含量、过氧化物酶、过氧化氢酶和超氧化物歧化酶活性分别提高38.10%、22.60%、30.68%、6.24%和27.94%。综合隶属函数分析结果进一步表明,中度盐碱胁迫条件下施用300倍稀释水溶肥最有利于缓解幼苗盐碱伤害。研究结果验证了生物基磺酸盐水溶肥在提升骆驼蓬耐盐碱性方面有积极作用,也为骆驼蓬在盐碱地上的育苗与推广提供了理论依据。

关键词:水溶肥;盐碱胁迫;骆驼蓬;隶属函数分析

中图分类号:S336 文献标识码:A 文章编号:0488-5368(2026)04-0001-09

Effects of Bio-Based Sulfonates on Seed Germination and Growth of *Peganum harmala* Under Saline-Alkali Stress

LI Hangfei¹, QIAN Dayi^{1,2}, AN Liyuan¹, WANG Rong¹, WANG Xiaona², WANG Qunhui², LI Ziwei¹

(1. School of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang Key Laboratory of Clean Conversion and High-Value Utilisation of Biomass Resources, Yili Normal University, Yining, Xinjiang 835000, China;

2. School of Energy and Environmental Engineering, Beijing University of Science and Technology, Beijing 100083, China)

Abstract: *Peganum harmala* was used as a test material to investigate the effects of bio-based sulfonate water-soluble fertilizer on seed germination and seedling salt tolerance under saline - alkali stress, aiming to provide new strategies for the improvement of saline - alkali land in Xinjiang. The experiment included three levels of saline stress (mild, moderate, and severe; groups A, B, and C) and three dilution levels of water-soluble fertilizer (100-, 300-, and 500-fold). The results showed that saline stress generally inhibited seed germination and seedling growth of *Peganum harmala*, with the strongest inhibitory effect observed under severe saline stress (22.80%) and the weakest under moderate saline stress (4.88%). The application of different dilutions of bio-based sulfonate water-soluble fertilizer effectively alleviated saline stress and improved germination rate, growth, and physiological indices, among which the 300-fold dilution treatment showed the best performance.

收稿日期:2025-04-29 修回日期:2025-05-26

基金项目:新疆维吾尔自治区重点研发任务专项课题(2022B02021-1)。

第一作者简介:李杭霏(1999-),女,在读硕士研究生,主要从事环境化学分析研究。

通信作者:李紫薇。

Under severe saline stress, soluble sugar content, chlorophyll content, peroxidase, catalase, and superoxide dismutase activities in seedlings under the 300-fold dilution treatment (C-300) increased by 38.10%, 22.60%, 30.68%, 6.24%, and 27.94%, respectively, compared with the control (C-0). Comprehensive membership function analysis further indicated that the 300-fold dilution treatment under moderate saline stress was the most effective in alleviating salinity injury. This study demonstrates that bio-based sulfonate water-soluble fertilizer enhances salt tolerance in *Peganum harmala* and provides a scientific basis for seedling cultivation and large-scale application in saline - alkali land.

Key words: Water-soluble fertilizer; Salt-alkali stress; *Peganum harmala*; Membership function analysis

生物基磺酸盐水溶肥作为新型水溶性肥料能够改善土壤理化性质,提高土壤养分、酶活性与微生物数量等^[1],还可提高植物出苗率^[2]。以农林业固体废弃物(如秸秆)为原料,通过磺化秸秆中木质素制得的生物基磺酸盐水溶肥,既保留了木质素的高分子结构特性,又具备良好的水溶性,有利于作物充分吸收利用^[3]。近年来,有研究表明生物基磺酸盐水溶肥在改良盐碱胁迫环境方面有较大潜力,牟帅等人^[4]发现其钙基组分通过形成保水膜抑制蒸发并阻断盐分迁移,同时借助络合吸附降低土壤盐分;保雄伟等^[5]进一步指出生物基磺酸盐水溶肥可同步调节土壤 pH 值、提升养分与固沙性能,且经济性优于传统技术;曹皓等^[6]揭示生物基磺酸盐水溶肥的羟基与磺酸根协同增强保水成膜效应,为盐碱地改良提供理论支撑。土壤盐渍化是自然气候、地形条件、土壤特性以及人类活动等共同作用的结果。由于特殊的地理位置和气候条件,新疆已成为我国盐碱地面积最大的省份。新疆盐碱地面积占我国盐碱地总面积的 22%,占我国总耕地面积的 1/3,大部分盐碱地分布在绿洲区域^[7]。环境因素和植物适应性共同促成了耐盐碱植物在新疆广泛分布。其中骆驼蓬作为一种抗旱、耐盐碱植物多见于新疆干旱草地和盐碱荒漠等地

带。骆驼蓬(*Peganum harmala*)属蒺藜科骆驼蓬属多年生草本植物,有止咳平喘,祛风湿,消肿等功效^[8],对肝癌、胃癌、肠癌、乳腺癌及肺癌等均有较好的治疗效果。骆驼蓬抗旱和抗盐碱能力很强,是荒漠生态系统的建群种与优势种,是优良的固沙植物^[9]。此外,霜后干枯的骆驼蓬可供骆驼和羊食用,是家畜冬季饲料之一^[10]。本研究以新疆的骆驼蓬为试验材料,研究盐碱环境中生物基磺酸盐水溶肥对骆驼蓬耐盐碱性的影响,旨在深入了解骆驼蓬耐盐碱机制,为骆驼蓬在盐碱地引种栽培提供参考依据,同时也为生物基磺酸盐水溶肥在新疆等盐碱化地区的推广应用提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

骆驼蓬供试种子均于 2023 年 8 月采自新疆伊宁市霍城县(43.677647 °N, 81.164562 °E, 海拔 842.3 m),采收后挑选除杂并用密封袋装好置于通风干燥处保存备用,供试种子的基本性质见表 1。

本试验所使用的生物基磺酸盐水溶肥(以下简称“水溶肥”)的基本理化性质见表 2。

表 1 骆驼蓬种子的基本性质

| 种子形态 | | | 千粒重/g | | 含水量 | 吸水率 | 生活力 |
|--------------------|--------------------|-----------------|-----------------|-------|-----------------|--------|-------|
| 纵径/ μm | 横径/ μm | 纵横比 | 平均值 | 变异系数 | /% | /% | /% |
| 927.25 \pm 44.37 | 416.48 \pm 18.46 | 2.25 \pm 0.09 | 2.69 \pm 0.01 | 3.71% | 4.66 \pm 0.01 | 133.00 | 91.00 |

表 2 生物基磺酸盐水溶肥的基本理化性质

| pH 值 | 电导率(EC) (mS/cm) | 氮磷钾总养分 /% | 有机质 /% | 腐殖酸 /% | 钙(Ca) /% | 固含量 /% |
|------|--------------------|--------------|-------------|-----------|-------------|-----------|
| 6.85 | 534.00 | 6.00 | 40.00~45.00 | 30.00 | 3.50~4.00 | 50.00 |

注:固含量 50%即表示每 100 g 水溶肥中含 50 g 固体有效成分,其余为水分或可挥发物。

1.2 试验设计

盐碱胁迫处理参考冯焱的方法^[11]并稍加改

动,采用 NaCl、Na₂SO₄、NaHCO₃、Na₂CO₃ 四种盐进行模拟,调配成不同盐碱度的混合溶液,分别为轻

度盐碱 A 组、中度盐碱 B 组、重度盐碱 C 组以及无盐碱胁迫 CK 对照组,共 4 个盐碱度处理,具体见表 3。水溶肥稀释 100 倍、稀释 300 倍、稀释 500

倍,未施加水溶肥的清水作为对照,各处理重复 3 次,具体处理设置见表 4。

表 3 各处理的不同盐分组成

| 处理 | 盐碱溶液比例 | | | | pH 值 | 盐度 (mmol/L) |
|----|--------|---------------------------------|--------------------|---------------------------------|------|----------------|
| | NaCl | Na ₂ SO ₄ | NaHCO ₃ | Na ₂ CO ₃ | | |
| CK | 0 | 0 | 0 | 0 | 7.00 | 0 |
| A | 1 | 1 | 0 | 0 | 7.35 | 30 |
| B | 1 | 2 | 1 | 0 | 8.36 | 60 |
| C | 1 | 1 | 1 | 1 | 9.82 | 90 |

表 4 盐碱胁迫处理设置

| 处理浓度 | 无盐碱胁迫 | 轻度盐碱 A 组 | 中度盐碱 B 组 | 重度盐碱 C 组 |
|-------------|--------|----------|----------|----------|
| 清水对照 | CK-0 | A-0 | B-0 | C-0 |
| 水溶肥稀释 100 倍 | CK-100 | A-100 | B-100 | C-100 |
| 水溶肥稀释 300 倍 | CK-300 | A-300 | B-300 | C-300 |
| 水溶肥稀释 500 倍 | CK-500 | A-500 | B-500 | C-500 |

试验选取大小均匀、光泽饱满且发育良好的种子,采用 75%乙醇溶液消毒 10 s,取出后用蒸馏水冲洗 3 次,均匀摆放于铺有双层滤纸的 9 cm 培养皿中。每皿放置 50 粒种子,并加入 5 mL 混合盐碱溶液和 5 mL 不同稀释倍数的水溶肥或清水(对照组)。将培养皿置于光照培养箱中,设置培养条件为:温度 25 ℃、光照/黑暗各 12 h 交替、光照强度(50±1)%、湿度(75±1)%。每日定时观察并记录骆驼蓬种子发芽情况,同时更换滤纸并补充相应溶液,以维持稳定的发芽环境。当胚芽长度约为种子长度的 1/2 时,视为种子萌发,在种子萌发第 14 天时测定骆驼蓬幼苗根长、苗长、鲜干质量、可溶性糖含量、叶绿素含量、过氧化物酶活性、过氧化氢酶活性、超氧化物歧化酶活性等指标。

1.3 测定指标及方法

1.3.1 种子萌发指标测定 待试验第 4 天时开始记录种子发芽情况,并计算种子发芽率、发芽势、发芽指数^[12,13] 发芽率=(种子发芽数/供试种子总数)×100%,发芽势=(发芽高峰期种子发芽数/供试种子总数)×100%,发芽指数=∑(种子每日发芽数/发芽日数);试验结束后计算其相对盐害率^[12],相对盐害率=(对照组发芽数-各处理发芽数)/对照组的发芽数×100%,并用游标卡尺测其根长和苗长^[13];分析天平称量其鲜质量,70 ℃烘干至恒重,称量其干质量^[14]。

1.3.2 幼苗生理指标测定 待试验结束后采用蒽酮比色法^[15]测定可溶性糖(SS)含量;采用乙醇-

丙酮混合液直接浸提法^[16]测定叶绿素(Chl)含量;采用愈创木酚法^[17]测定过氧化物酶(POD)活性;采用紫外吸收法^[17]测定过氧化氢酶(CAT)活性;采用邻苯三酚自氧化法^[17]测定超氧化物歧化酶(SOD)活性。

1.4 数据统计与分析

用 Excel 2021 软件进行数据处理,使用 Spss 26 软件进行方差和相关性分析,并对骆驼蓬幼苗生长和生理指标进行隶属函数分析,运用 Origin 2022 软件进行绘图。

2 结果与分析

2.1 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发指标的影响

由表 5 可知,在未施加水溶肥的条件下,各盐碱胁迫处理组与无盐碱胁迫对照组 CK 之间均存在显著($P<0.05$)差异,不同程度盐碱胁迫均对骆驼蓬种子发芽产生抑制作用,随着盐碱胁迫程度的增加,种子发芽率和发芽势均呈现先升后降的趋势,而发芽指数则呈下降趋势。其中,中度盐碱胁迫(B 组)对种子萌发的抑制作用最弱,较 CK-0 组而言,B-0 组的发芽率、发芽势、发芽指数分别降低 5.15%、12.27%、31.38%。这一结果表明,骆驼蓬种子在中度盐碱环境中具有较好的适应性,这可能是其在新疆盐碱环境中长期进化而形成的特性^[18]。

不同稀释倍数的水溶肥对不同程度盐碱胁迫

下种子的萌发影响各异,高稀释倍数(≥ 300 倍)的水溶肥对种子萌发的促进作用尤为显著($P < 0.05$)。较清水对照(A-0、B-0、C-0),A-300、B-300、C-300组的发芽率分别提高7.81%、2.33%、4.76%,发芽势分别提高17.45%、5.37%、7.03%,发芽指数分别提高7.55%、0.16%、9.80%。可见,

适当稀释倍数的水溶肥能够有效缓解盐碱胁迫对种子萌发的抑制作用,这一现象可能与水溶肥中的有机质成分有关,其能够通过吸附盐碱离子,降低 Na^+ 的离子毒害作用,并缓解高渗透压引起的渗透胁迫,从而改善种子的萌发环境。

表5 各处理组盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发及相对盐害率的影响

| 处理 | 发芽率/% | 发芽势/% | 发芽指数 | 相对盐害率/% | |
|-------|--------|---------------|----------------|---------------|--------------|
| 无盐碱胁迫 | CK-0 | 90.67±3.06a | 70.67±2.36ab | 54.18±2.09a | / |
| | CK-100 | 88.00±2.00a | 70.00±2.30ab | 53.86±1.70a | / |
| | CK-300 | 92.00±3.46a | 72.67±2.03a | 57.75±1.74a | / |
| | CK-500 | 91.33±2.43a | 73.33±2.93a | 57.00±1.99a | / |
| A组 | A-0 | 81.00±2.25abc | 42.00±1.11efg | 38.93±1.30bcd | 10.46±0.46ab |
| | A-100 | 71.33±2.08c | 41.33±1.03efg | 36.46±0.36cd | 18.77±0.83ab |
| | A-300 | 87.33±1.16abc | 49.33±1.81def | 41.84±1.54bc | 4.96±0.16ab |
| | A-500 | 79.33±2.11abc | 58.00±1.43bcd | 45.70±1.89b | 12.86±0.51ab |
| B组 | B-0 | 86.00±2.00ab | 62.00±2.30abcd | 37.16±1.01cd | 4.88±0.19ab |
| | B-100 | 85.33±1.16ab | 52.67±1.16cde | 35.66±1.08cd | 3.01±0.27b |
| | B-300 | 88.00±2.72ab | 65.33±2.16abcd | 37.24±1.17cd | 4.50±0.19ab |
| | B-500 | 78.00±2.00abc | 64.00±2.30abcd | 36.98±1.03cd | 14.39±0.68ab |
| C组 | C-0 | 70.00±3.00c | 38.00±1.72fg | 31.64±1.02d | 22.80±1.06a |
| | C-100 | 68.67±1.81c | 34.67±1.31g | 32.54±1.84d | 22.01±1.03ab |
| | C-300 | 73.33±2.69bc | 40.67±1.57efg | 34.72±1.03d | 20.05±0.81ab |
| | C-500 | 70.00±3.47c | 36.67±1.31fg | 33.35±1.01d | 22.91±1.02a |

注:不同小写字母表示在 $P < 0.05$ 水平上差异显著。下表同。

2.2 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗相对盐害率的影响

由表5可知,在清水处理条件下,A-0、B-0、C-0组的相对盐害率分别为10.46%、4.88%、22.80%,其中C-0组显著高于其他两组($P < 0.05$)。而在同一盐碱胁迫水平下,经稀释300倍水溶肥处理后,各盐碱胁迫水平下的相对盐害率均呈现不同程度的下降趋势,表明施加稀释300倍水溶肥在缓解盐碱胁迫方面效果最佳。其中A-300组相对盐害率降至4.96%,较A-0组降低了52.58%;B-300组相对盐害率为4.50%,较B-0组降低了7.79%;C-300组相对盐害率为20.05%,较C-0组降低了12.06%。可见,盐碱胁迫显著抑制骆驼蓬种子的萌发过程,而施加适当稀释倍数(300倍)的水溶肥不仅能够为植株生长提供必需营养元素,还可有效调节体系内的离子平衡^[19],显著缓解盐碱胁迫对种子萌发的抑制作用,从而增强植株的抗逆性。

2.3 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗根长和苗长的影响

由表6可知,在未施加水溶肥条件下,不同程

度的盐碱胁迫均对骆驼蓬幼苗的根和苗的生长抑制作用显著($P < 0.05$)。A-0、B-0、C-0组较CK-0组而言,根长分别降低25.35%、4.28%、48.88%,苗长分别降低13.24%、1.32%、22.77%。其中,C-0组的抑制作用最为显著,其根长和苗长分别为25.57和28.76 mm,显著低于其他处理组($P < 0.05$)。这表明盐碱胁迫不仅抑制根系发育,还导致植株生长迟缓,出现明显的矮化现象。

在不同盐碱胁迫下,施加生物基硫酸盐水溶肥后,各处理组幼苗的生长均得到显著($P < 0.05$)促进作用。其中,使用稀释300倍的水溶肥时促进作用最明显。A-300、B-300、C-300组骆驼蓬根长较清水对照(A-0、B-0、C-0)分别增长52.22%、17.96%、24.79%,苗长分别增长3.81%、5.69%、5.35%。可见,施加适当浓度的水溶肥可缓解盐碱胁迫,促进植株生长。生物基硫酸盐水溶肥含N、P、K等元素,能为骆驼蓬幼苗生长提供必要的营养。并且,其速效性可促进根系生长发育,形成发达的根系网络,有利于植株根系迅速吸收水分和养分,进而促进幼苗生长。

表 6 各处理组盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬生长指标的影响

| 处理 | 根长/mm | 苗长/mm | 鲜质量/mg | 干质量/mg | |
|-------|--------|---------------|--------------|-----------------|---------------|
| 无盐碱胁迫 | CK-0 | 50.02±2.13bcd | 37.24±1.25cd | 202.67±3.45ab | 17.23±0.85ab |
| | CK-100 | 52.86±2.34bcd | 36.67±1.19de | 195.20±7.72abc | 17.07±0.68ab |
| | CK-300 | 72.70±2.49a | 40.79±1.84a | 214.83±8.62a | 19.83±0.93a |
| | CK-500 | 56.34±2.30bcd | 40.42±1.16ab | 204.00±6.54ab | 19.60±0.56a |
| A组 | A-0 | 37.34±1.89e | 32.31±1.29g | 167.50±8.03cdef | 15.73±0.40b |
| | A-100 | 32.68±1.76ef | 30.67±1.27h | 166.87±3.50cdef | 15.67±0.23b |
| | A-300 | 56.84±2.16bcd | 33.54±1.39fg | 182.10±4.29bcd | 15.93±0.70b |
| | A-500 | 54.20±2.49bcd | 32.97±1.23g | 175.90±6.16bcde | 15.80±0.63b |
| B组 | B-0 | 47.88±1.67cd | 36.75±1.19de | 180.23±7.82bcd | 16.83±0.81abc |
| | B-100 | 45.91±1.06d | 35.12±1.15ef | 176.13±7.94bcde | 16.47±0.64abc |
| | B-300 | 56.48±2.47bcd | 38.84±1.28bc | 185.10±7.74abc | 17.17±0.21abc |
| | B-500 | 51.84±2.06bcd | 37.17±1.22cd | 184.73±8.37abc | 16.87±0.76abc |
| C组 | C-0 | 25.57±1.42fg | 28.76±0.99ij | 138.03±5.56fg | 15.03±0.72b |
| | C-100 | 22.28±1.07g | 27.27±0.82j | 133.60±6.14g | 14.43±0.78b |
| | C-300 | 31.91±1.34ef | 30.30±1.37hi | 151.47±6.89defg | 15.30±0.50b |
| | C-500 | 28.11±1.05fg | 28.85±1.31ij | 147.30±6.38efg | 15.17±0.69b |

2.4 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗鲜质量和干质量的影响

盐碱胁迫通过干扰植物细胞内的酶活性与代谢途径,影响能量供给和生物合成过程,从而抑制植物生长和生物量积累^[20]。由表 6 可知,在未施加生物基磷酸盐水溶肥条件下,盐碱胁迫显著抑制了骆驼蓬幼苗生物量的积累($P<0.05$)。较 CK-0 组而言,A-0、B-0、C-0 组幼苗鲜质量分别降低 17.37%、11.10%、31.92%,干质量分别降低 8.72%、2.33%、12.79%。其中,C-0 组的抑制作用最为显著,其鲜质量和干质量分别仅为 138.03 和 15.03 mg,显著低于其他处理组($P<0.05$)。因此,盐碱胁迫会抑制幼苗的生长发育,导致其鲜干质量降低,与以往研究结果一致。

生物基磷酸盐水溶肥的施加显著改善了盐碱

胁迫下幼苗的生物量积累($P<0.05$)。当稀释倍数达到 300 倍和 500 倍时,水溶肥表现出促进生长作用(图 1)。较清水对照(A-0、B-0、C-0),A-300、B-300、C-300 组幼苗鲜质量分别提高 8.72%、2.72%、9.78%,干质量分别提高 1.27%、2.38%、2.00%;A-500、B-500、C-500 组的幼苗鲜质量分别提高 5.01%、2.50%、6.74%,干质量分别提高 0.64%、0.60%、1.33%。稀释 300 倍处理的效果优于稀释 500 倍处理,其中 A-300 组的鲜质量达到 182.10 mg,显著高于 A-500 组的 175.90 mg($P<0.05$)。可见,施加适当浓度(稀释 300 倍)的水溶肥能有效促进盐碱胁迫下骆驼蓬幼苗生物量的积累,生物基磷酸盐水溶肥中的氮磷钾总养分能为植物生长供给营养,有利于植物更好地吸收和利用养分,提高生物量的积累。

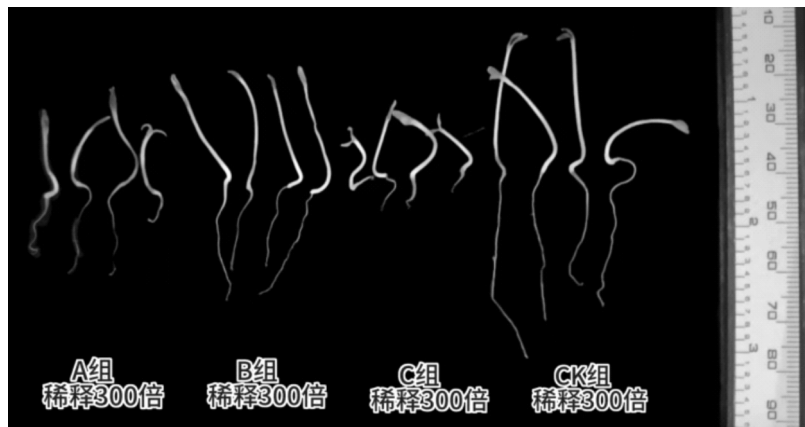


图 1 各处理组盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗生长的影响

2.5 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗可溶性糖和叶绿素含量的影响

由表 7 可知,在未施加水溶肥条件下,随着盐碱胁迫程度的增加,幼苗可溶性糖 SS 含量呈上升趋势($P<0.05$)。与 CK-0 组相比,A-0、B-0、C-0 组的 SS 含量分别提高 57.14%、123.81%、200.00%。其中,C-0 组的 SS 含量显著高于其他处理组($P<0.05$),表明重度盐碱胁迫导致细胞严重失水,促使植物通过积累渗透调节物质来维持细胞渗透平衡。幼苗叶绿素 Chl 含量对盐碱胁迫的响应呈现先升后降的趋势。B-0 组的 Chl 含量达到 10.42 $\mu\text{g}/\text{mL}$,较 CK-0 组显著提高 63.33% ($P<0.05$),而 C-0 组的 Chl 含量则降至 4.38 $\mu\text{g}/\text{mL}$,较 CK-0 组降低 31.31%。这一变化可能与盐碱胁迫

下气孔导度下降导致的 CO_2 同化受阻有关。

生物基磷酸盐水溶肥的施加显著改善了盐碱胁迫对幼苗生理指标的影响($P<0.05$)。当稀释倍数 ≥ 300 倍时,水溶肥表现出更好的缓解效果。C-300 与 C-500 组的幼苗 SS 含量较 C-100 组分别提高 31.82%和 28.79%。同时,A-300、B-300、C-300 组幼苗的 Chl 含量较清水对照(A-0、B-0、C-0)而言,分别提高 21.11%、46.62%、22.66%。可见,生物基磷酸盐水溶肥中含有的多种微量元素对植物在盐碱环境中的水分平衡、细胞渗透压的维持以及细胞膜的保护具有重要作用。此外,施加高稀释倍数(≥ 300 倍)的水溶肥可改善盐碱胁迫对植株光合作用造成的抑制,并且可提供适量 N 元素促进叶片 Chl 的合成。

表 7 各处理组盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬生理指标的影响

| 处理 | SS/% | Chl($\mu\text{g}/\text{mL}$) | POD($\text{U}/\text{g}\cdot\text{min}$) | CAT($\text{U}/\text{g}\cdot\text{min}$) | SOD(U/g) | |
|-------|--------|--------------------------------|---|---|----------------------------|---------------------|
| 无盐碱胁迫 | CK-0 | 0.21 \pm 0.01i | 6.38 \pm 0.04efg | 155.92 \pm 3.03n | 38.01 \pm 0.75i | 57.14 \pm 0.71j |
| | CK-100 | 0.26 \pm 0.01h | 5.88 \pm 0.04fg | 162.69 \pm 5.91n | 38.46 \pm 0.92i | 62.86 \pm 1.17j |
| | CK-300 | 0.32 \pm 0.02g | 8.24 \pm 0.06d | 188.95 \pm 6.12lm | 41.09 \pm 0.85h | 97.14 \pm 2.56i |
| | CK-500 | 0.29 \pm 0.01g | 6.70 \pm 0.04ef | 169.09 \pm 6.69mn | 38.93 \pm 0.73i | 77.14 \pm 1.30j |
| | A-0 | 0.33 \pm 0.01g | 6.11 \pm 0.18efg | 208.69 \pm 5.86kl | 46.95 \pm 1.11g | 102.86 \pm 2.47i |
| A 组 | A-100 | 0.42 \pm 0.01f | 5.53 \pm 0.05fgh | 221.85 \pm 5.67jk | 49.06 \pm 0.87ef | 117.14 \pm 2.56hi |
| | A-300 | 0.45 \pm 0.01ef | 7.40 \pm 0.19de | 258.53 \pm 9.83i | 51.85 \pm 0.85d | 157.14 \pm 1.90g |
| | A-500 | 0.43 \pm 0.01f | 6.13 \pm 0.24efg | 231.63 \pm 5.60j | 50.48 \pm 0.74de | 131.43 \pm 1.47h |
| | B-0 | 0.47 \pm 0.01e | 10.42 \pm 0.14c | 506.75 \pm 8.87d | 54.10 \pm 0.65c | 305.71 \pm 10.30c |
| | B 组 | B-100 | 0.48 \pm 0.01de | 8.17 \pm 0.17d | 564.04 \pm 8.99c | 56.00 \pm 0.77b |
| B-300 | | 0.56 \pm 0.01c | 15.28 \pm 0.17a | 678.13 \pm 8.58a | 58.00 \pm 0.94a | 351.43 \pm 8.57a |
| B-500 | | 0.51 \pm 0.01d | 13.19 \pm 0.01b | 627.46 \pm 9.01b | 56.85 \pm 0.93ab | 331.43 \pm 2.86b |
| C-0 | | 0.63 \pm 0.01b | 4.38 \pm 0.01h | 301.94 \pm 9.12h | 48.86 \pm 0.81f | 194.29 \pm 2.90f |
| C 组 | | C-100 | 0.66 \pm 0.01b | 2.80 \pm 0.05i | 371.48 \pm 6.65f | 49.09 \pm 0.86ef |
| | C-300 | 0.87 \pm 0.02a | 5.37 \pm 0.09fgh | 394.59 \pm 9.42e | 51.91 \pm 0.82d | 248.57 \pm 7.56d |
| | C-500 | 0.85 \pm 0.01a | 5.22 \pm 0.27gh | 341.81 \pm 11.34g | 49.40 \pm 1.08ef | 231.43 \pm 4.95de |

2.6 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬幼苗抗氧化酶活性的影响

由表 7 可知,在 3 种盐碱环境下,骆驼蓬幼苗的过氧化物酶 POD、过氧化氢酶 CAT、超氧化物歧化酶 SOD 活性与无盐碱胁迫对照组 CK 均存在显著差异($P<0.05$)。在未施加水溶肥条件下,幼苗的 POD、CAT、SOD 活性在中度盐碱 B 处理组达到峰值,其活性大小表现为 B-0>C-0>A-0,B-0 较 CK-0 组的 POD、CAT、SOD 活性分别提高 225.01%、42.33%、435.00%。这表明,盐碱胁迫会诱导植物体内活性氧的积累,从而激活抗氧化酶系统

以应对氧化应激。然而,在重度盐碱胁迫下,由于植物细胞结构和功能受到严重破坏,抗氧化酶的活性反而下降。

在盐碱胁迫条件下,施加稀释 300 倍水溶肥的骆驼蓬幼苗 POD、CAT、SOD 活性均显著高于同盐碱水平下的其他处理组($P<0.05$)。在中度盐碱 B 处理组中,施加稀释 300 倍水溶肥的 B-300 组幼苗 POD、CAT、SOD 活性均达到峰值,显著优于其他处理组($P<0.05$),较 B-0 而言,幼苗 POD、CAT、SOD 活性分别提高 33.82%、7.21%、14.96%。这表明,生物基磷酸盐水溶肥在缓解盐碱胁迫对骆驼

蓬幼苗的氧化损伤方面具有显著效果,尤其是在施加稀释 300 倍水溶肥条件下,能够显著提升抗氧化酶的活性,从而增强植物的抗逆性。

2.7 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长生理指标的相关性分析

研究盐碱胁迫下 12 个指标之间的相关性,揭示植物生理适应与生长发育之间的内在联系。骆驼蓬种子萌发和幼苗生长生理指标的相关性热图可见图 2。由图 2 可知,发芽率与发芽势、发芽指数、根长、苗长、鲜质量、干质量、Chl 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关,与 CAT 活性呈显著 ($P<0.05$) 负相关;发芽势与发芽指数、根长、苗长、鲜质量、干质量、Chl 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关,与 CAT 活性呈显著 ($P<0.05$) 负相关;发芽指数与根长、苗长、鲜质量、干质

量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量、POD、CAT、SOD 活性呈极显著 ($P<0.01$) 负相关;根长与苗长、鲜质量、干质量、Chl 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关;苗长与鲜质量、干质量、Chl 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关;鲜质量与干质量、Chl 含量呈极显著 ($P<0.01$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关,与 CAT、SOD 活性呈显著 ($P<0.05$) 负相关;干质量与 Chl 含量呈显著 ($P<0.05$) 正相关,与 SS 含量呈极显著 ($P<0.01$) 负相关,与 CAT 活性呈显著 ($P<0.05$) 负相关;SS 含量与 POD、CAT、SOD 活性呈极显著 ($P<0.01$) 正相关;Chl 含量与 POD、CAT、SOD 活性呈极显著 ($P<0.01$) 正相关;POD 活性与 CAT、SOD 活性呈极显著 ($P<0.01$) 正相关;CAT 活性与 SOD 活性呈极显著 ($P<0.01$) 正相关。

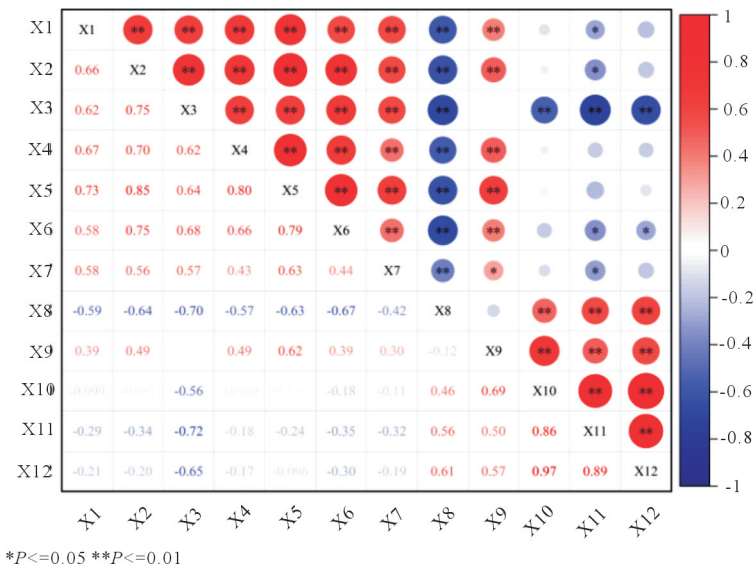


图 2 骆驼蓬种子萌发和幼苗生长生理指标的相关性分析

注:图表中 X1 为发芽率,X2 为发芽势,X3 为发芽指数,X4 为根长,X5 为苗长,X6 为鲜质量,X7 为干质量,X8 为可溶性糖含量,X9 为叶绿素含量,X10 为过氧化物酶活性,X11 为过氧化氢酶活性,X12 为超氧化物歧化酶活性。* * 表示在 $P<0.01$ 水平上显著相关,* 表示在 $P<0.05$ 水平上显著相关。下表同。

2.8 盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长的综合评价

为明确不同盐碱程度对骆驼蓬的胁迫效应,并筛选出能够有效缓解盐碱胁迫、促进骆驼蓬生长的最佳水溶肥稀释倍数,采用隶属函数法对不同处理下的 12 个指标展开综合评价。盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长的综合评价如表 8 所示。由表 8 可知,3 种盐碱处理对骆驼蓬造成的胁迫强度存在显著差异 ($P<0.05$),其胁迫程度由

高到低依次为:C 处理(重度盐碱胁迫)>A 处理(轻度盐碱胁迫)>B 处理(中度盐碱胁迫),这一结果与各处理组的生长生理指标变化趋势相一致。与此同时,不同稀释倍数水溶肥处理对缓解效应方面表现出显著差异 ($P<0.05$),其盐碱胁迫缓解效果由高到低依次为:稀释 300 倍>稀释 500 倍>稀释 100 倍,这一趋势在各处理组的生长生理指标变化中均得到验证。

表 8 各处理组盐碱胁迫下水溶肥对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长的综合评价

| 处理 | 各指标隶属函数值 | | | | | | | | | | | | 综合评 价值 | 排序 |
|--------|----------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|-----------|----|
| | X1 | X2 | X3 | X4 | X5 | X6 | X7 | X8 | X9 | X10 | X11 | X12 | | |
| CK-0 | 0.94 | 0.93 | 0.86 | 0.55 | 0.74 | 0.85 | 0.52 | 0 | 0.29 | 0 | 0 | 0 | 0.47 | 7 |
| CK-100 | 0.83 | 0.91 | 0.85 | 0.61 | 0.7 | 0.76 | 0.49 | 0.07 | 0.25 | 0.01 | 0.02 | 0.02 | 0.46 | 9 |
| CK-300 | 1 | 0.98 | 1 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.16 | 0.44 | 0.06 | 0.15 | 0.14 | 0.66 | 2 |
| CK-500 | 0.97 | 1 | 0.97 | 0.68 | 0.97 | 0.87 | 0.96 | 0.12 | 0.31 | 0.03 | 0.05 | 0.07 | 0.58 | 5 |
| A-0 | 0.53 | 0.19 | 0.28 | 0.3 | 0.37 | 0.42 | 0.24 | 0.18 | 0.26 | 0.1 | 0.45 | 0.16 | 0.29 | 12 |
| A-100 | 0.11 | 0.17 | 0.18 | 0.21 | 0.25 | 0.41 | 0.23 | 0.31 | 0.22 | 0.13 | 0.55 | 0.2 | 0.25 | 14 |
| A-300 | 0.8 | 0.38 | 0.39 | 0.69 | 0.46 | 0.6 | 0.28 | 0.36 | 0.37 | 0.2 | 0.69 | 0.34 | 0.46 | 8 |
| A-500 | 0.46 | 0.6 | 0.54 | 0.63 | 0.42 | 0.52 | 0.25 | 0.32 | 0.27 | 0.14 | 0.62 | 0.25 | 0.42 | 10 |
| B-0 | 0.74 | 0.71 | 0.21 | 0.51 | 0.7 | 0.57 | 0.44 | 0.39 | 0.61 | 0.67 | 0.8 | 0.84 | 0.6 | 4 |
| B-100 | 0.71 | 0.47 | 0.15 | 0.47 | 0.58 | 0.52 | 0.38 | 0.4 | 0.43 | 0.78 | 0.9 | 0.86 | 0.55 | 6 |
| B-300 | 0.83 | 0.79 | 0.21 | 0.68 | 0.86 | 0.63 | 0.51 | 0.52 | 1 | 1 | 1 | 1 | 0.75 | 1 |
| B-500 | 0.4 | 0.76 | 0.2 | 0.59 | 0.73 | 0.63 | 0.45 | 0.45 | 0.83 | 0.9 | 0.94 | 0.93 | 0.65 | 3 |
| C-0 | 0.06 | 0.09 | 0 | 0.07 | 0.11 | 0.05 | 0.11 | 0.64 | 0.13 | 0.28 | 0.54 | 0.47 | 0.21 | 15 |
| C-100 | 0 | 0 | 0.03 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0.68 | 0 | 0.41 | 0.55 | 0.56 | 0.19 | 16 |
| C-300 | 0.2 | 0.16 | 0.12 | 0.19 | 0.22 | 0.22 | 0.16 | 1 | 0.21 | 0.46 | 0.7 | 0.65 | 0.36 | 11 |
| C-500 | 0.06 | 0.05 | 0.07 | 0.12 | 0.12 | 0.17 | 0.14 | 0.96 | 0.19 | 0.36 | 0.57 | 0.59 | 0.28 | 13 |

3 结论与讨论

3.1 盐碱胁迫下生物基磷酸盐水溶肥对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长的影响

盐碱胁迫对植物的生长发育具有显著 ($P < 0.05$) 的抑制作用。研究发现,不同程度的盐碱胁迫对骆驼蓬种子的萌发特性(发芽率、发芽势和发芽指数)有一定的抑制作用。其中,中度盐碱的抑制效果最弱,这一现象可能与骆驼蓬在长期自然选择过程中形成的适应性机制有关,通过调节自身的生理代谢途径来适应中低度盐碱环境^[21-22]。同时,在无水溶肥处理条件下,盐碱胁迫会影响骆驼蓬的生物量积累和根系发育,其中重度盐碱下抑制效果最为突出。在中低度盐碱胁迫下,骆驼蓬通过增加生物量积累来增强其对逆境的适应能力,促进根系发育以更好地吸收水分和营养物质^[23]。然而,重度盐碱下则导致植株生长受阻,表现为根系发育不良和植株矮化现象^[24],这与表 4 中 C 处理组较低的综合评价值(0.21~0.36)相吻合。

生物基磷酸盐水溶肥的应用改善了盐碱胁迫对骆驼蓬的不利影响,其中施加稀释 300 倍水溶肥的综合效果最佳,尤其是在重度盐碱胁迫下表现最为突出。施加适当稀释倍数的水溶肥可有效缓解盐碱胁迫中高浓度的 Na^+ 造成的离子毒害作用以及外界过高渗透压造成的渗透胁迫^[25,26],这一发现与表 4 中 C-300 处理组相对较高的综合评价值(0.36)相一致。水溶肥中含有的 N、P、K 等必需营养元素为幼苗生长提供了充足的养分支持,其中的有机质成分促进了根际微生物群落的活性,改善

了根际环境^[27]。此外,水溶肥的保水特性降低了植株的蒸腾作用,提高了水分利用效率^[4]。其速效性使得根系能够迅速吸收到养分,从而促进根系的生长和发育,形成更加发达的根系系统^[28],有利于植物对水分和养分的吸收,促进植株生长,提高生物量的积累^[29]。这些效应共同促进了根系发育和植株生长,与表 4 中 B-300 处理组多项指标隶属函数值达到 1.00 的结果相印证。

3.2 盐碱胁迫下生物基磷酸盐水溶肥对骆驼蓬幼苗生理特性的影响

盐碱胁迫对植株的生理指标影响各异。研究发现,在未施加水溶肥条件下,随着盐碱胁迫程度的增加骆驼蓬幼苗的 Chl、POD、CAT、SOD 含量呈现先升后降的趋势。这一变化可能与盐碱胁迫初期诱导光合色素合成有关,而过高浓度的盐分则会破坏叶绿体结构,抑制光合作用^[30]。这一发现与表 4 中 B 组 Chl 含量隶属函数值(0.43~1.00)显著 ($P < 0.05$) 高于 A 组 Chl 含量隶属函数值(0.22~0.37)和 C 组 Chl 含量隶属函数值(0.00~0.21)的结果相一致。在抗氧化酶系统方面,骆驼蓬幼苗通过启动复杂的应激防御网络来应对盐碱胁迫。在胁迫初期,POD、CAT、SOD 活性升高以清除过量产生的活性氧,维持细胞氧化还原平衡。然而,随着胁迫程度的加剧,高浓度盐分导致酶蛋白结构变性或基因表达下调,最终表现为酶活性下降^[31,32]。这一趋势在表 7 中得到验证,其中 C 组的 POD、CAT、SOD 隶属函数值(0.28~0.70)显著 ($P < 0.05$) 低于 B 组隶属函数值(0.67~1.00)。此外,骆驼蓬幼苗的 SS 含量与盐碱胁迫程度呈正相

关,这可能与植物的渗透调节机制密切相关。随着胁迫程度的增加,骆驼蓬通过积累SS降低细胞渗透势,从而增强其渗透调节能力和抗逆性^[33]。这一适应性反应在表4中表现为C组SS含量隶属函数值(0.64~1.00)显著($P<0.05$)高于A组隶属函数值(0.18~0.36)和B组隶属函数值(0.39~0.52)。

适当浓度的生物基磺酸盐水溶肥能够显著($P<0.05$)提高骆驼蓬幼苗的光合作用效率和抗逆性。研究发现,在重度盐碱胁迫条件下,施加稀释300倍的水溶肥(C-300)可显著($P<0.05$)促进Chl的合成,其隶属函数值达到0.21,显著($P<0.05$)高于C-100的隶属函数值(0.00)和C-500的隶属函数值(0.19)(表4)。这一促进作用主要归因于水溶肥中的N元素能够有效促进叶片叶绿素的合成^[34]。在重度盐碱胁迫条件下,施加稀释300倍的水溶肥(C-300)还可显著($P<0.05$)提高骆驼蓬幼苗的SS、POD、CAT、SOD含量。C-300处理组的SS含量隶属函数值为1.00,显著($P<0.05$)高于C-100的隶属函数值(0.68)和C-500的隶属函数值(0.96);POD、CAT、SOD活性的隶属函数值分别达到0.46、0.70、0.65,均显著($P<0.05$)优于其他处理组(表4)。这一现象表明,适当浓度的水溶肥能够提供均衡的营养元素,与植物的自身调节机制形成协同效应,从而增强其对盐碱胁迫的适应能力^[35]。

本研究采用混合盐溶液模拟新疆地区不同程度的盐碱环境,研究不同稀释倍数的生物基磺酸盐水溶肥在不同盐碱程度下对骆驼蓬种子萌发、幼苗生长及其耐盐碱性的影响。研究得到的主要结论为:盐碱胁迫对骆驼蓬种子萌发和幼苗生长均有抑制作用,而水溶肥能够在一定程度上降低盐碱胁迫对骆驼蓬的不利影响;三种盐碱处理对骆驼蓬造成的胁迫强度由高到低为:C>A>B,其中中度盐碱胁迫下的抑制效果最弱,表明骆驼蓬自身具有一定的耐盐碱性;适当稀释倍数的水溶肥对骆驼蓬的萌发、生长表现出积极效应,其对盐碱胁迫的缓解效果表现为:稀释300倍>稀释500倍>稀释100倍。研究结果以期为耐盐碱植物骆驼蓬的人工栽培及水溶肥的适配方法提供依据。

参 考 文 献:

[1] 陈亚兰,保雄伟,尹应武,等. 生物基磺酸盐对荒漠土壤的改良效果[J]. 安徽农业大学学报, 2019, 46(5): 853-858.
[2] 杨跃文,张文军,黄海广,等. 生物基磺酸盐固沙性能及其对种子萌发和出苗的影响[J]. 扬州大学学

报(农业与生命科学版), 2023, 44(6): 56-61.

- [3] 尹应武,李德中,马杜媚,等. 水溶性生物基磺酸盐营养液在食用菌培养上的应用研究[J]. 食用菌, 2021, 29(2): 144-147.
[4] 牟帅,胡磊,尹应武,等. 柠条沙柳生物基磺酸盐的保水固沙和生态修复性能研究[J]. 西南师范大学学报(自然科学版), 2022, 47(11): 105-114.
[5] 尹应武,保雄伟,李德中,等. 生物基磺酸盐在土壤沙漠化治理中的应用研究[J]. 现代农业科技, 2021(1): 185-192.
[6] 曹皓. 生物基磺酸盐生态修复盐碱地机理研究[D]. 重庆:西南大学, 2020.
[7] 梁永辉,王振华,李海强,等. 不同改良措施对新疆盐碱土壤特性及玉米和油菜生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2024, 41(6): 1332-1341.
[8] 夏丽英. 现代中药毒理学[M]. 天津:天津科技翻译出版公司, 2005.
[9] 郭新新,岳平,李香云,等. 降水量对荒漠草原骆驼蓬(Peganum harmala)地上生物量的影响[J]. 中国沙漠, 2022(2): 164-172.
[10] 黄蓉,杨永花,张建新,等. 兰州市荒山植物群落结构及优势种调查[J]. 干旱区资源与环境, 2016(6): 129-135.
[11] 冯焱,赵颖,魏小红. NO₃⁻对不同盐碱胁迫下藜麦幼苗生长及氮代谢的影响[J]. 草业科学, 2023, 40(9): 2320-2329.
[12] 李兴美,何勇,周艳苹,等. 荞麦种子萌发的抗逆性研究[J]. 饲料研究, 2022, 45(11): 76-79.
[13] 王建丽,张莹莹,张冬梅,等. 紫花苜蓿资源萌发期耐碱性评价[J]. 饲料研究, 2024, 47(16): 92-97.
[14] 刘杰淋,彭大庆,孔晓蕾,等. 5个饲用燕麦品种在松嫩平原盐碱地的生产性能及营养价值评价[J]. 饲料研究, 2023, 46(22): 132-136.
[15] Guo J, Zhan L, Su X, et al. Physiological responses and quality alterations of pea sprouts under salt stress: implications for salt-tolerant mechanism[J]. Horticulturae, 2024, 10(9): 966-966.
[16] Jingyao G, Jingyong W, Sasa X, et al. Spectroscopic determination of chlorophyll content in sugarcane leaves for drought stress detection[J]. Precision Agriculture, 2023, 25(2): 543-569.
[17] 马光恕,姜博,廉华,等. 棘孢木霉对向日葵幼苗抗氧化酶活性及菌核病防效的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2023, 41(5): 246-255.
[18] 龚颖,张丹,黄文娟. 盐分、pH值及二者耦合条件对骆驼蓬种子萌发的影响[J]. 黑龙江生态工程职业学院学报, 2016, 29(1): 7-11.

(下转第76页)