



盐碱地增施氮肥对重金属污染盐地碱蓬铅富集量的影响

侯小兰 李晓刚 封晓辉

Effects of increased nitrogen fertilizer on lead accumulation of *Suaeda salsa* in heavy metal-contaminated saline land

HOU Xiaolan, LI Xiaogang, FENG Xiaohui

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0297>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

咸水滴灌对盐地碱蓬生育规律的影响

Effect of saline water drip irrigation on the growth regularity of *Suaeda salsa*

草业科学. 2023, 40(10): 2528 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0791>

重金属复合污染下不同种植密度香根草的生长及富集特征

Absorption characteristics of vetiver grass to the heavy metals in the soil of a heavy metal compound-polluted mining area

草业科学. 2023, 40(8): 2028 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0115>

种植7种牧草对北疆盐碱地土壤改良效果的评价

Soil improvement effect of planting seven gramineous plants in saline-alkali soil in the northern Xinjiang

草业科学. 2023, 40(5): 1210 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0625>

盐地碱蓬青贮发酵进程

Study on the fermentation process of *Suaeda salsa* silage

草业科学. 2024, 41(7): 1729 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2023-0219>

柳枝稷对滨海盐碱地的改良效果及饲用价值

Panicum virgatum improvement of coastal saline-alkali soil and its feeding values

草业科学. 2023, 40(6): 1551 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0406>

13个紫花苜蓿品种在沧州盐碱地的生产性能和营养价值

Comparison and analysis of production performance and nutritional value of 13 alfalfa varieties in the Cangzhou saline-alkali area

草业科学. 2023, 40(7): 1823 <https://doi.org/10.11829/j.issn.1001-0629.2022-0563>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.11829/j.issn.1001-0629.2024-0297

侯小兰, 李晓刚, 封晓辉. 盐碱地增施氮肥对重金属污染盐地碱蓬铅富集量的影响. 草业科学, 2025, 42(2): 295-305.

HOU X L, LI X G, FENG X H. Effects of increased nitrogen fertilizer on lead accumulation of *Suaeda salsa* in heavy metal-contaminated saline land. Pratacultural Science, 2025, 42(2): 295-305.

盐碱地增施氮肥对重金属污染盐地碱蓬 铅富集量的影响

侯小兰^{1,2}, 李晓刚¹, 封晓辉²

(1. 河北农业大学林学院, 河北 保定 071000; 2. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心, 河北 石家庄 050022)

摘要: 盐生植物是盐碱地重金属污染生物修复的主要植物。为探究重度盐碱地增施氮肥对盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)生长和铅(Pb)富集的影响, 本研究采用盆栽试验, 在3个土壤盐分水平下设置3种氮肥处理, 分析了盐地碱蓬的生长、Pb富集和渗透调节特征。结果表明, 施氮肥可显著增加盐地碱蓬地上部生物量, 且底肥效果大于追肥($P < 0.05$)。施底肥时, 高盐下盐地碱蓬地上部的Pb含量最高, 为 $34.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 同时Pb富集量也最高, 为 350.77 mg ; 而追肥处理时, 中、高盐条件下盐地碱蓬地上部干重和Pb富集量均高于不施肥处理; 氮肥影响渗透调节物质, 施底肥时以脯氨酸为主, 而不施肥和追肥以可溶性糖为主, 底肥显著增加了 Ca^{2+} 的积累。结果证明, 以底肥的形式增施氮肥可以提高盐地碱蓬的生物量, 增强盐生植物对盐碱地Pb污染的生物修复效果。

关键词: 盐地碱蓬; 盐碱地; 氮肥; 土壤铅污染; 生物修复; 渗透调节; 植物离子

文献标识码: A 文章编号: 1001-0629(2025)02-0295-11

Effects of increased nitrogen fertilizer on lead accumulation of *Suaeda salsa* in heavy metal-contaminated saline land

HOU Xiaolan^{1,2}, LI Xiaogang¹, FENG Xiaohui²

(1. College of Forestry, Agricultural University of Hebei, Baoding 071000, Hebei, China;

2. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology,
Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, Hebei, China)

Abstract: Halophytes are the most commonly used plants for bioremediation of heavy metal pollution in saline lands. To assess the effects of nitrogen fertilizer on the growth and lead (Pb)-accumulating capacity of *Suaeda salsa* in heavy metal-contaminated saline land, we conducted a pot experiment to analyze the growth, Pb accumulation, and osmotic regulation characteristics of *S. salsa* at three soil salt levels. The results revealed that nitrogen fertilization can promote significant increases in the aboveground biomass of plants, and that in this regard, the effects of base fertilization were more pronounced than those attributable to topdressing ($P < 0.05$). In response to the application of base fertilizer under high salt conditions, the highest Pb content in the aboveground parts was $34.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, and the highest Pb enrichment was 350.77 mg . In addition, under moderate- and high-salt conditions, the dry weight and Pb content of plants were higher than those in plants without fertilizer treatment. Nitrogen fertilization was also found to have an effect on osmotic regulatory substances. Proline was the main osmotic regulator detected in plants receiving base fertilizer, whereas soluble sugars were the main osmotic

收稿日期: 2024-05-11 接受日期: 2024-08-04

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDA0440402); 中国科学院工程实验室建设项目(KFJ-PTXM-017); 河北省重点研发计划项目(22326416D)

第一作者: 侯小兰(2000-), 女, 四川巴中人, 在读硕士生, 研究方向为恢复生态学. E-mail: 3289473770@qq.com

通信作者: 李晓刚(1984-), 男, 河北武安人, 讲师, 博士, 研究方向为退化生态系统恢复. E-mail: xiaogang1217@126.com

regulators in plants receiving no fertilizer or a topdressing. Furthermore, base fertilization promoted a significant increase in Ca^{2+} accumulation. These findings reveal that by promoting increases in aboveground biomass, the application of nitrogen fertilizer in Pb-polluted saline soil can contribute to enhancing the biological remediation effects of halophytes.

Keywords: *Suaeda salsa*; saline land; nitrogen fertilizer; soil Pb pollution; bioremediation; osmoregulation; plant ions

Corresponding author: LI Xiaogang E-mail: xiaogang1217@126.com

铅 (Pb) 是土壤污染中最典型的重金属元素之一, 具有高毒性、难降解、迁移能力强等特点。Pb 在土壤中过量积累会抑制种子萌发和植株生长, 并积累在植株体内和果实中, 对作物的生长发育及农产品的产量和品质产生不利影响^[1]。随着我国沿海地区工业快速发展, 部分沿海盐碱地土壤中的重金属含量已超标, 滨海盐碱地的土壤 Pb 污染已经成为当前必须重视的环境问题之一^[2]。植物修复能够通过植物对重金属的吸收将土壤中的重金属富集到植物体内, 对植物进行收割和处理, 将重金属转变为可控制风险的安全状态^[3], 具有易实施、成本低等优点, 在重金属污染农田修复上被广泛应用^[4], 但同时也存在修复周期较长、生长速度慢、修复效率低等方面的问题^[5], 需要采用合理的辅助措施来提高植物修复的效率^[6]。

盐生植物有特殊的结构和生理机制来适应盐胁迫环境, 其对高盐环境具有较强的耐受性。如减少盐离子的吸收或限制盐离子的向上运输, 通过盐腺将盐离子分泌到体外或者主动将盐离子和重金属离子进行区域化隔离, 同时盐生植物对重金属有一定的吸收作用。因此, 盐生植物是盐渍化土壤重金属污染修复的主要植物^[7-10]。盐地碱蓬 (*Suaeda salsa*) 是一种真盐生植物, 生长于海滨、荒漠等盐碱荒地上, 肉质的叶片以及独特的耐盐机制, 具有极强的耐盐性, 能够在 3% 的重盐碱地中生长, 并且可以显著降低土壤盐分、改良土壤结构^[11]。研究表明, 盐地碱蓬对重金属铜 (Cu)、锌 (Zn)、铅 (Pb)、镉 (Cd) 的吸收率最高能达到 31、101、34、62 $\text{mg} \cdot (\text{kg} \cdot \text{d})^{-1}$ ^[12], 其根际微生物互作也能够降低土壤中重金属 Cd 的毒性^[13]; 因此, 盐地碱蓬在重金属污染的土壤修复中具有显著的效果。但是在盐碱土条件下的盐地碱蓬对重金属污染的生物修复效果研究尚未开展。

盐碱地往往氮供应不足, 不利于植物的生长, 限制了盐生植物对重金属的生物富集量, 因此增施氮肥是盐碱地重金属污染生物修复有效的增效措施。施肥不仅直接影响植物对重金属的吸收, 施加

氮肥还会引起土壤酸度的变化, 改变金属离子的水解平衡从而改变其可溶性, 影响重金属的生物有效性^[14]。目前, 氮肥对盐碱地重金属修复研究主要集中在不同形态的氮肥, 而在不同施肥方式方面对盐生植物生物修复效果的研究较少。为探究施氮肥对重盐碱地盐地碱蓬土壤 Pb 污染的修复效果, 本研究采用盆栽试验方法, 分析不同氮肥施用方式对不同盐胁迫条件下盐地碱蓬生长和 Pb 富集特征的影响, 探索不同盐分条件下氮肥施用方式对盐地碱蓬 Pb 富集的影响效应, 以期对盐碱地 Pb 污染的植物修复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验在中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心温室进行。盐地碱蓬的种子采集于河北省海兴县滨海盐碱地 (117°32'~117°58' E, 38°19'~38°29' N)。供试土壤采集于海兴县滨海轻度盐碱地 0—20 cm 的表层土壤, 土壤中可溶性盐含量为 1.59 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, Pb 含量为 3.20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮含量为 0.630 $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 。本试验中设置土壤 Pb 含量为 20 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 将定量的醋酸铅 $[(\text{CH}_3\text{COOH})_2\text{Pb}]$ 溶液均匀喷淋至定量的摊平风干土上, 混合均匀, 填装入直径 14 cm、高 18 cm 的圆形塑料花盆中, 每盆装风干土 2 kg。土壤盐分设 3 个水平, 以初始土壤含盐量为对照 (S_0), 在此基础上分别外加 NaCl 5 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S_1) 和 10 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ (S_2) 溶液, 配制 NaCl 溶液分次浇灌直至目标盐分含量以模拟不同盐分含量的盐碱土, 对照处理浇灌相同体积的清水。设 3 种施肥处理, 按照施肥方式分别设置不施肥 (N_0)、底肥 (N_1) 和追肥 (N_2)。将种子预先播种于育苗盘中, 待幼苗长至 4~5 cm 时, 选取生长健康、长势一致的幼苗移栽至花盆中, 每盆保留幼苗 3 株, 待幼苗在花盆中缓苗 7 d 后开始进行施肥和盐胁迫处理。施肥处理所施氮肥为尿素, 施肥量为 150 $\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$, 底肥处理 (N_1) 在幼

苗移栽前将尿素与 NaCl 混合溶液浇入盆中, 追肥处理 (N_2) 待盐地碱蓬移栽 15 d 后将尿素溶液浇入盆中。为防止盐分和养分的淋洗, 花盆放在托盘上, 托盘中的渗出液用注射器吸取返还盆中土壤。温室中温度为 15~25 °C, 为防止盐地碱蓬开花, 试验的光周期为 13 h/11 h (光照/黑暗), 试验处理 60 d 后对盐地碱蓬进行采样及各项指标的测定。

1.2 测定项目与方法

1.2.1 生长特征及生物量测定

定期测定盐地碱蓬地株高, 试验结束后收割地上部, 称地上部鲜重, 然后置于烘箱 105 °C 杀青 30 min, 于 75 °C 烘干至恒重, 测定干重, 并计算植株含水量。

1.2.2 Pb 含量和盐离子测定

将地上部样品粉碎研磨后, 称 0.10 g 样品加 6 mL 浓硝酸, 过夜后放置在消解箱中消解 2 h, 取出后加 0.5 mL 高氯酸再消煮 2 h 至溶液变成透明黄豆大小液滴, 冷却后定容至 50 mL。利用电感耦合等离子体质谱仪 (ICP-MS, Thermo SCIENTIFIC, USA) 测定消煮液中 Pb^{2+} 浓度。 Na^+ 、 K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 利用原子吸收光谱仪 (WYX-420C, JASCO Corporation, Japan) 测定。

1.2.3 渗透调节物质测定

采用苯酚硫酸法测定可溶性糖含量, 称取 0.10 g 样品加入 5~10 mL 蒸馏水, 在沸水中提取 30 min, 吸取 0.5 mL 提取液于试管中, 依次加入 1.5 mL 蒸馏水、1 mL 的 9% 苯酚溶液, 摇匀后, 加入 5 mL 浓硫酸, 最后利用分光光度计测定 485 nm 下的吸光值, 并按照标准曲线计算可溶性糖含量。采用茚三酮比色法测定游离脯氨酸含量, 称取 0.10 g 样品加 5 mL 3% 的磺基水杨酸, 沸水浴中提取 15 min 得到脯氨酸的提取液, 吸取 2 mL 提取液、2 mL 冰醋酸及 2 mL 酸性茚三酮试剂, 沸水浴中加热 30 min, 冷却之后, 加入 4 mL 甲苯, 振荡 30 s, 放置一段时间, 取上层液至 10 mL 的离心管内, 以 3 000 r·min⁻¹ 离心 5 min, 利用分光光度计测定 520 nm 下的吸光值, 并按照标准曲线计算脯氨酸的含量。

1.3 数据分析

用 SPSS 26.0 软件 (IBM Corp., Armonk, NY, USA) 对数据进行统计分析。对数据进行单因素方差分析、双因素方差分析、Duncan 多重比较和 Pearson 相关性分析, $P < 0.05$ 为差异显著, $P < 0.01$ 为差异极显著。利用 Origin 软件进行数据绘图, 图表中数据

为平均值 $\pm$ 标准误差。

2 结果与分析

2.1 盐地碱蓬地上部分生长特征

双因素方差分析结果表明 (图 1), 盐分和氮肥均显著影响盐地碱蓬株高、植株含水量 ($P < 0.05$), 盐分和氮肥互作对植株含水量影响极显著 ($P < 0.01$)。与 S_0 相比, S_1 盐分水平下株高并无显著变化, 但均显著增加了 N_1 、 N_2 处理下植株含水量, 与 S_0 的各施肥处理相比, S_1 、 S_2 盐分水平下 N_0 、 N_1 、 N_2 施肥处理植株含水量分别降低了 0.79% 和上升了 8.09%、3.57% 和 1.59%、12.31%、6.16%; 与 N_0 相比, N_1 处理显著降低了株高, 并且在 S_2 盐分水平下株高最低, N_1 、 N_2 处理显著增加了 S_1 、 S_2 盐分水平下植株含水量, 且随着盐胁迫的加剧增幅越大; 与 N_0 的各盐分水平相比, N_1 处理下 S_0 、 S_1 、 S_2 盐分水平的株高分别下降了 13.91%、22.09%、34.75%, 而植株含水量分别上升了 0.10%、9.06%、10.66%, 在 N_1S_2 处理下株高最低, 植株含水量达最大; N_2 处理下, S_0 、 S_1 、 S_2 盐分水平株高并无显著差异, 较 N_0 处理中不同施肥处理 S_0 盐分水平的植株含水量增幅 (3.27%) 均低于 S_1 、 S_2 盐分水平的增幅 (7.81% 和 7.93%), 且 N_1 处理下 S_1 、 S_2 盐分水平的植株含水量增幅均高于 N_2 处理, 但株高却显著低于 N_2 处理。如图 2 所示, 在 N_0 、 N_2 处理下, 随着盐分的增加株高变化并不明显, 但在 N_1 处理下, S_2 盐分条件显著降低了株高, N_1 、 N_2 处理下盐地碱蓬的生长状况较好, 与 N_0 处理相比有更多的侧枝, 且侧枝生长旺盛, 也未出现 N_0 处理下的植株变黄和枯萎的现象。

2.2 盐地碱蓬地上部分生物量

双因素方差分析表明 (图 3), 盐分、施肥和两者互作均极显著影响盐地碱蓬的干重和鲜重 ($P < 0.01$)。与 S_0 相比, S_1 盐胁迫均显著增加了盐地碱蓬的干重和鲜重 ($P < 0.05$), S_2 盐胁迫下在不同施肥处理变化有所不同, 但随着盐胁迫的加剧干重和鲜重的增幅逐渐下降; 与 S_0 的各施肥处理相比, S_1 盐胁迫下 N_0 、 N_1 、 N_2 施肥处理干重和鲜重分别显著增加 26.10%、34.63%、41.84% 和 22.88%、89.38%、65.64%, S_2 盐胁迫下 N_0 、 N_1 、 N_2 施肥处理盐地碱蓬的干重和鲜重分别显著增加 31.29%、-32.43%、39.91% 和 39.79%、19.12%、77.26%; 与 N_0 相比, N_1 、 N_2 处理

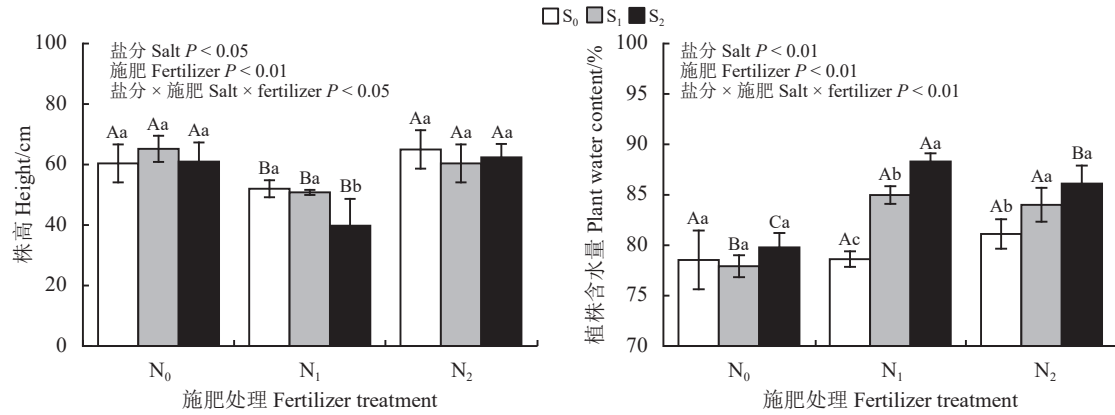


图 1 施氮肥对盐胁迫下地碱蓬株高和植株含水量的影响

Figure 1 Effects of nitrogen fertilizer application on the plant height and water content of *Suaeda salsa* under salt stress

N₀、N₁、N₂ 分别表示不施肥、施底肥和施追肥；S₀、S₁、S₂ 分别表示 0、5 和 10 g·kg⁻¹ 外加 NaCl 盐分水平。不同小写字母表示相同施肥水平下不同盐分处理差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示相同盐分水平在不同施肥处理差异显著 ($P < 0.05$), 下图同。

N₀, N₁, and N₂ indicate no fertilization, base fertilization, and topdressing, respectively. S₀, S₁, and S₂ indicate 0, 5 and 10 g·kg⁻¹ NaCl salt levels, respectively. Different lowercase letters for the same fertilization level indicate significant differences among salt treatments at the 0.05 level, and different uppercase letters for the same salt level indicate significant differences among different fertilization treatments at the 0.05 level.

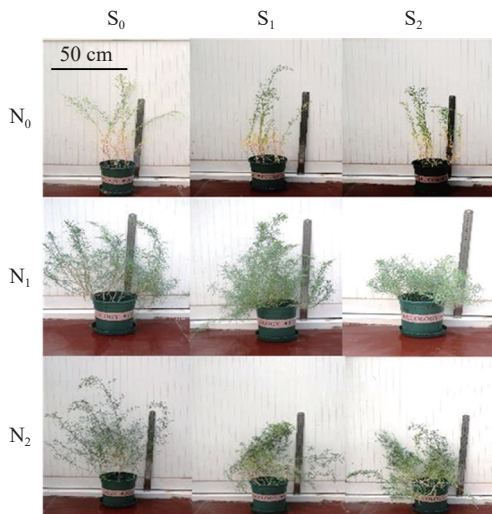


图 2 施氮肥对盐胁迫下地碱蓬的生长状况

Figure 2 Effects of nitrogen fertilizer application on the growth of *Suaeda salsa* under different salt stress

均显著增加了盐地碱蓬地上部干重和鲜重的积累, 且积累效应表现为 N₁ > N₂ > N₀, N₁ 处理下盐地碱蓬的干重和鲜重随着盐胁迫的加剧其增幅下降, 而在 N₂ 处理下干重和鲜重随着盐胁迫的加剧其增幅趋于稳定; 其中, 与 N₀ 的各盐分水平相比, N₁ 处理下 S₀、S₁、S₂ 盐分水平的干重和鲜重分别显著增加 285.94%、289.68%、92.97% 和 292.00%、504.20%、234.12%, 干重和鲜重积累量在 N₁S₁ 处理下达到最大; N₂ 处理下各盐分水平的干重和鲜重分别增加 149.94%、180.46%、165.87% 和 181.00%、280.00%、257.00%, 且与 N₀ 处理相比 N₂ 处理各盐分水平下干

重和鲜重的平均增幅 (165.42% 和 239.33%) 均小于 N₁ 处理 (285.53% 和 343.44%)。

2.3 盐地碱蓬铅吸收特征

双因素方差分析表明 (图 4), 盐分对盐地碱蓬 Pb 含量和 Pb 富集量影响极显著 ($P < 0.01$), 但是施用氮肥对 Pb 含量无显著影响 ($P > 0.05$), 却极显著增加了 Pb 富集量, 盐分和施肥两者互作显著影响 Pb 含量和 Pb 富集量 ($P < 0.05$)。随着盐分的增加盐地碱蓬的 Pb 含量和 Pb 富集量均有所增加。与 S₀ 相比, S₁、S₂ 盐分水平下 N₀、N₂ 处理的盐地碱蓬 Pb 含量均有所上升但差异不显著, S₂ 盐分水平显著降低了 N₂ 处理下盐地碱蓬 Pb 含量, 且在相同施肥处理下, S₂ 盐分水平下 Pb 含量均高于其他盐分处理, 在 N₁S₂ 处理下 Pb 含量达最大; S₁、S₂ 盐分水平下 N₁、N₂ 施肥处理的 Pb 富集量较 N₀ 处理均显著增加。不同施肥处理下盐地碱蓬 Pb 含量变化有所不同, 但施肥均显著增加了 Pb 富集量。与 N₀ 相比, N₁ 处理降低了 S₀、S₁ 盐分水平下的 Pb 含量, 但差异不显著; N₂ 处理下 Pb 含量在 S₀、S₁ 盐分水平下并无显著差异, 但 S₂ 盐分却显著降低了 Pb 含量, N₁、N₂ 处理均显著增加了 Pb 富集量。与 N₀ 的各盐分水平相比, N₁ 处理的 S₀、S₁、S₂ 盐分水平下 Pb 含量分别下降了 28.0%、21.7% 和增加了 22.7%, N₁、N₂ 处理下 Pb 富集量在 S₀、S₁、S₂ 盐分水平下分别增加了 178.9%、222.4%、188.5% 和 121.4%、208.2%、

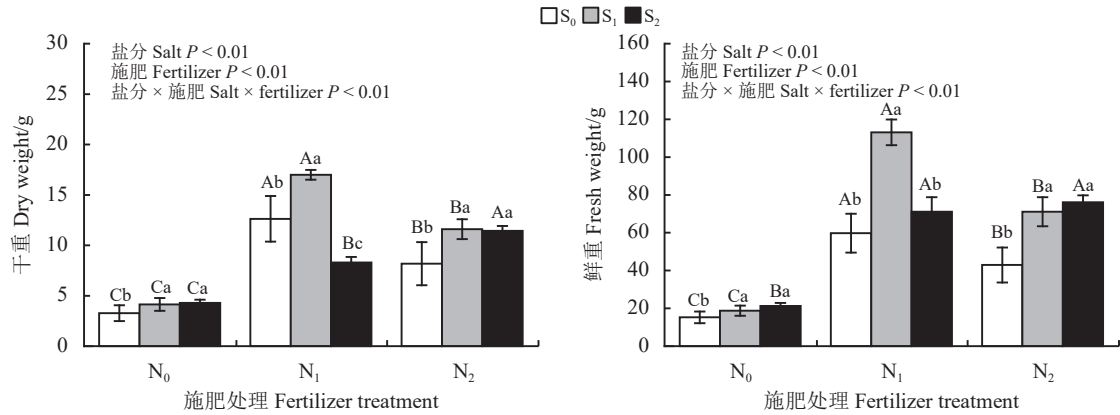


图3 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬干重和鲜重的影响

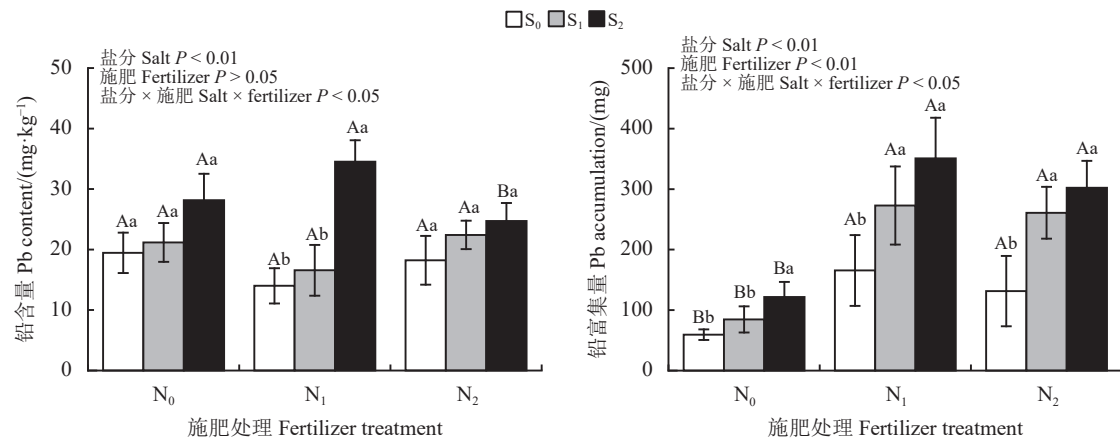
Figure 3 Effects of nitrogen fertilizer application on the dry and fresh weights of *Suaeda salsa* under salt stress

图4 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬铅含量和铅富集量的影响

Figure 4 Effects of nitrogen fertilizer application on lead content and accumulation in *Suaeda salsa* under salt stress

148.6%, 且在 N₁S₂ 处理下达到最大。

2.4 盐地碱蓬盐离子含量

施肥对盐地碱蓬地上部 Ca²⁺、Mg²⁺、Na⁺、K⁺和 K⁺/Na⁺均具有极显著影响 ($P < 0.01$), 盐分和施肥互作对 Na⁺、Cl⁻含量及 K⁺/Na⁺有极显著影响 ($P < 0.01$), 盐肥互作对 K⁺含量具有显著影响, 但盐肥互作对 Mg²⁺、Ca²⁺含量无显著影响 ($P > 0.05$) (图5)。与 S₀ 相比, S₁、S₂ 盐分水平降低了 N₀、N₂ 处理下 Mg²⁺ 含量, 但却显著增加了 Na⁺ 含量; 与 S₀ 的各施肥相比, S₁ 和 S₂ 盐胁迫下 N₀、N₁、N₂ 施肥处理 K⁺ 分别下降 48.52%、2.97%、10.24% 和 38.24%、-71.14%、3.35%, Na⁺ 离子含量分别显著增加 40.07%、98.62%、47.63% 和 66.45%、108.00%、74.36%, K⁺/Na⁺ 分别下降 63.18%、52.39%、38.97% 和 62.77%、20.60%、40.25%; 与 N₀ 相比, N₁ 处理显著增加了不同盐分水平下盐地碱蓬地上部 Ca²⁺ 含量, 且随着盐分胁迫的增加其增幅越大; N₂ 处理对 Ca²⁺ 含量并无显著影响; 其中, 与

N₀ 的各盐分水平相比, N₁ 处理下 S₀、S₁、S₂ 盐分水平的 Ca²⁺ 含量分别增加了 35.06%、39.54%、50.77%, 且 Ca²⁺ 含量在 N₁S₂ 处理下达最大。N₁、N₂ 处理显著降低了 K⁺ 含量和 K⁺/Na⁺, 显著增加了 S₁、S₂ 盐分条件下 Na⁺、Cl⁻ 含量; N₁ 处理下, S₀ 盐分水平的 K⁺ 下降幅度 (73.60%) 均高于 S₁ 和 S₂ 盐分水平的下降幅度 (50.25% 和 26.86%), K⁺/Na⁺ 下降幅度 (69.30%) 均高于 S₁、S₂ 盐分水平的下降幅度 (60.30% 和 34.53%), S₁ 盐分水平下的 Na⁺ 的增幅 (96.57%) 低于 S₂ 盐分水平下的增幅 (108.00%); N₂ 处理下, S₀ 盐分水平的 K⁺ 下降幅度 (51.84%) 均高于 S₁ 和 S₂ 盐分水平的下降幅度 (16.03% 和 24.64%), K⁺/Na⁺ 下降幅度 (55.66%) 均高于 S₁、S₂ 盐分水平的下降幅度 (26.50% 和 28.85%), S₁ 盐分水平下的 Na⁺ 的增幅 (47.63%) 低于 S₂ 盐分水平下的增幅 (61.76%)。

2.5 盐地碱蓬地上部渗透调节物质

双因素方差分析结果表明 (图6), 盐分、施肥和

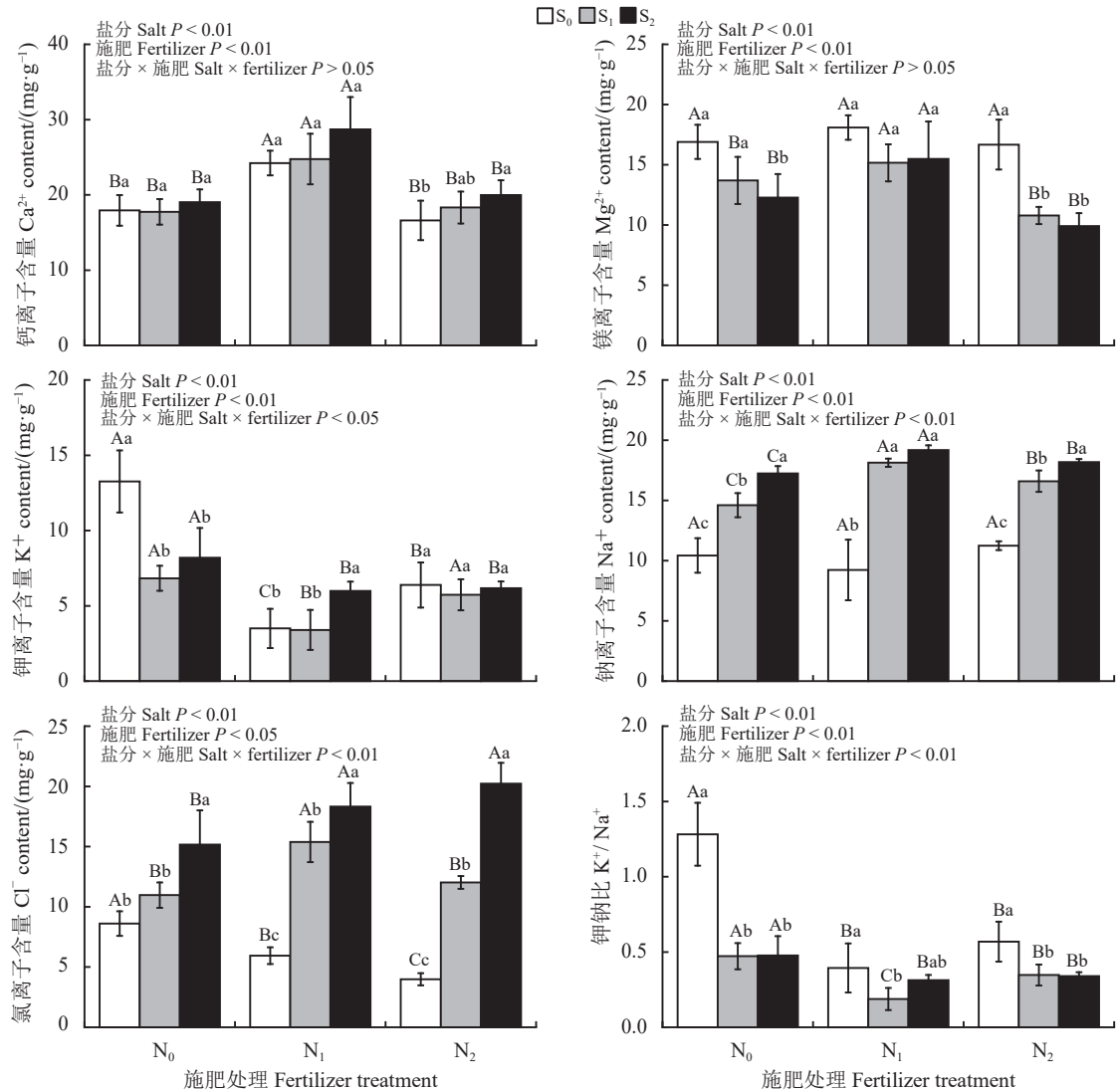


图 5 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬离子含量的影响

Figure 5 Effects of nitrogen fertilizer application on the ion content of *Suaeda salsa* under salt stress

两者互作均极显著影响盐地碱蓬地上部可溶性糖含量 ($P < 0.01$), 施肥也极显著影响脯氨酸含量, 盐分和盐肥互作显著影响脯氨酸含量 ($P < 0.05$)。与 S_0 相比, S_1 、 S_2 盐分水平降低了 N_0 处理下可溶性糖含量, 对 N_1 处理下可溶性糖含量并无显著影响 ($P > 0.05$), S_2 盐分水平显著降低了 N_2 处理下可溶性糖含量; S_2 盐分水平均显著增加了 N_1 处理下脯氨酸含量, 对 N_2 处理下脯氨酸含量无显著影响; 与 S_0 的各施肥相比, S_1 、 S_2 盐胁迫下 N_0 、 N_2 施肥处理可溶性糖含量分别下降 12.12%、14.31% 和 42.18%、39.09%; 与 N_0 相比, N_1 处理显著降低了 S_0 、 S_1 盐分水平下可溶性糖含量, 但却显著增加了脯氨酸含量, N_2 处理下可溶性糖含量在 S_0 、 S_1 盐分水平下显著下降, 但脯氨酸含量并无显著变化。其中, 与

N_0 的各盐分水平相比, N_1 处理可溶性糖含量在 S_0 、 S_1 、 S_2 盐分水平下分别下降 51.82%、44.41%、2.94%, 而脯氨酸含量分别增加 230.34%、202.43%、367.98%, 在 N_1 处理下可溶性糖含量和脯氨酸含量均随着盐胁迫的增加增幅逐渐增加; 而 N_2 处理盐地可溶性糖分别下降了 14.42%、16.55%、9.85%, 脯氨酸含量与 N_0 处理差异并不显著。说明在 N_1 处理下盐地碱蓬的主要有机渗透调节物质为脯氨酸, 而在 N_2 处理下主要有机渗透调节物质是可溶性糖。

2.6 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬各指标之间的相关性分析

相关性分析结果表明 (表 1), 盐地碱蓬 Pb 富集量与 Pb 含量、生物量、 Na^+ 含量、脯氨酸含量极显著正相关 ($P < 0.01$), 与 Ca^{2+} 、 K^+ 、可溶性糖含量显著

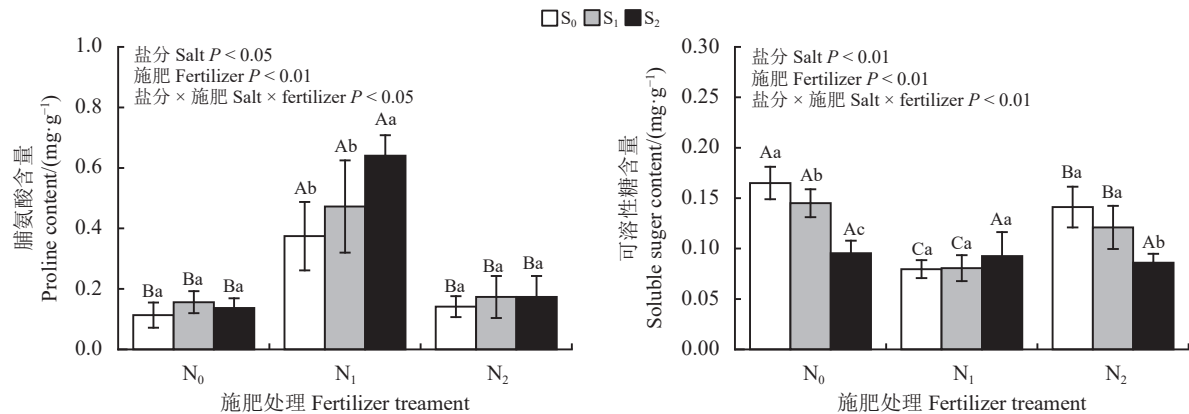


图 6 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬可溶性糖含量和脯氨酸含量的影响

Figure 6 Effects of nitrogen fertilizer application on the soluble sugar and proline contents of *Suaeda salsa* under salt stress

表 1 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬各指标相关性分析

Table 1 Correlation analysis of between different indices of *Suaeda salsa* under salt stress and increases in applied nitrogen fertilizer

指标 Index	PH	B	Pbc	Pba	SS	Pro	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Na ⁺	K ⁺
株高 Height (PH)	1.000									
生物量 Biomass (B)	-0.304*	1.000								
铅含量 Pb content (Pbc)	-0.217	-0.269	1.000							
铅富集 Pb accumulation (Pba)	-0.481**	0.620**	0.463**	1.000						
可溶性糖 Soluble sugar (SS)	0.364*	-0.601**	-0.134	-0.575**	1.000					
脯氨酸 Proline (Pro)	-0.747**	0.445**	0.216	0.630**	-0.536**	1.000				
Ca ²⁺ 含量 Ca ²⁺ content (Ca ²⁺)	0.020	-0.472**	-0.044	-0.381**	0.373*	-0.120	1.000			
Mg ²⁺ 含量 Mg ²⁺ content (Mg ²⁺)	-0.072	-0.392**	0.157	-0.224	0.012	-0.015	0.456**	1.000		
Na ⁺ 含量 Na ⁺ content (Na ⁺)	-0.256	0.304*	0.329*	0.581**	-0.317*	0.296*	-0.218	0.201	1.000	
K ⁺ 含量 K ⁺ content (K ⁺)	0.248	-0.350*	-0.034	-0.348*	-0.351*	0.161	-0.110	0.364*	-0.198	1.000

*, $P < 0.05$; **, $P < 0.01$.

($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 负相关; 生物量与脯氨酸含量极显著正相关, 与地上部 Na^+ 含量显著正相关, 与 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 和可溶性糖含量极显著负相关, 与株高显著负相关; Na^+ 与可溶性糖含量显著负相关, 与脯氨酸含量显著正相关; K^+ 与可溶性糖含量显著负相关; Ca^{2+} 与可溶性糖含量显著正相关, 与铅富集量和生物量极显著负相关; Mg^{2+} 含量与生物量极显著负相关, 与 Ca^{2+} 含量极显著正相关; 脯氨酸含量与可溶性糖含量极显著负相关。

3 讨论

3.1 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬生长的影响

植物面对胁迫时会通过改变自身的形态结构来

提高对逆境的适应能力。本研究发现, 底肥显著降低了盐地碱蓬的株高, 并且在 S_2 盐分水平下盐地碱蓬的株高进一步下降, 而追肥和不施肥处理对盐地碱蓬的株高并无显著影响。这与王界平和田长彦^[15]的研究结果有所不同, 该研究表明施用氮肥均明显促进了株高的生长。这种差异可能是该试验中氮肥的施入都采用同一种施肥方式, 并且不涉及重金属的影响, 而本研究不仅存在施肥方式的差异还有重金属 Pb 的影响。此外, 底肥和追肥处理下盐地碱蓬侧枝生长得更好并且植株更茂盛, 但随着盐分的增加盐地碱蓬的侧枝逐渐减少, 并且植株有发黄枯萎的现象。相关性分析表明盐地碱蓬的株高与生物量积累显著负相关, 说明盐胁迫时增施氮肥盐地碱蓬会

通过增加侧枝的生长来提高生物量积累,并且在底肥处理下盐地碱蓬会通过降低株高来减轻环境压力,植株株高下降有利于根部的营养物质和水分向上运输促进植物的生长^[16]。盐地碱蓬的干重和鲜重在施肥处理下均显著增加,在盐分和施盐肥互作下也显著增加,但在高盐胁迫下施肥处理不同变化不同。底肥处理下,盐地碱蓬地上部生物量随着盐分的变化呈现出先增加后下降的变化趋势,在中盐条件下生物量积累达到最大,这表明适宜的盐分是盐生植物生长必不可少的条件之一,并且能够有效缓解逆境对植物带来的伤害^[17],但过高的盐分则不利于盐地碱蓬的生长。

重金属 Pb 是植物生长的一种非必需元素,过量的 Pb 进入植物体内会造成毒害,当植物体内 Pb 过量时,植物会出现根系减少、叶片失绿,导致植物地上部的生物量下降^[18]。相关性分析结果表明盐地碱蓬生物量与 Pb 富集量呈极显著正相关关系,说明在盐胁迫下增施氮肥盐地碱蓬主要通过增加生物量积累来增加对 Pb 的富集。李志贤等^[19]对玉米 (*Zea mays*) 在不同施氮水平下吸收和富集重金属 Cd、Pb 的研究中发现,施尿素能够促进玉米生长,并能显著增强玉米对重金属的吸收与转运。施炳等^[20]通过盆栽试验发现不同水平的氮肥能够显著增强小麦 (*Triticum aestivum*) 对重金属的吸收和富集。这与本研究结果一致,说明底肥和追肥对盐地碱蓬的生长有促进作用,且增加了盐地碱蓬对 Pb 的富集量。植物富集重金属的主要部位是地上部,要利用植物对重金属污染进行修复就要增加植物地上部生物量积累。而氮素是盐碱地限制植物生长的主要因素,增施氮肥能够促进盐碱地重金属生物修复的主要原因就是氮肥能够促进植物生长、增加生物量。

3.2 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬铅富集的影响

本研究发现,施肥处理显著增加了盐地碱蓬 Pb 富集量,并显著促进盐地碱蓬地上部生物量积累;这与王学文等^[21]研究结果相反,主要原因是本研究中盐地碱蓬通过地上部富集重金属,而不是增加对重金属的耐受来达到重金属修复目的。土壤中的重金属的存在形态将直接影响植物对重金属的吸收与积累^[22],有研究表明,施肥会影响土壤 pH、植物生长和生理代谢过程、带入重金属离子和提供

能沉淀、络合重金属的基团从而影响植物对重金属的吸收^[23]。徐明岗等^[24]认为氮肥的施入首先改变了土壤的 pH,并且随着土壤盐分的增加,土壤溶液的导电率增加,从而增加土壤中重金属的溶解度。与 S₀ 相比, S₁ 盐分水平对盐地碱蓬 Pb 含量并无显著影响, S₂ 盐分水平显著增加底肥处理下盐地碱蓬 Pb 含量并达最大值,而追肥处理的各盐分水平下,盐地碱蓬 Pb 含量没有显著差异。Pb 是冶炼、采矿和自然气候过程导致土壤污染的主要重金属离子^[25-26],相较于追肥,底肥与土壤充分混合对土壤性质影响更大,增加了土壤中有效态 Pb 含量,从而使 Pb 更容易被盐地碱蓬吸收。

本研究中,盐胁迫、施肥处理及盐肥互作均显著增加了盐地碱蓬地上部的 Pb 富集量,且随着盐胁迫的增加 Pb 富集量也逐渐增加,但 S₁、S₂ 盐分水平下盐地碱蓬 Pb 富集量差异并不显著,说明盐分能够促进盐地碱蓬对重金属 Pb 的富集;这一结果与吴玉洁等^[27]研究结果一致。有研究表明,与 0.1% NaCl 相比, 1% NaCl 下根际可吸收 Pb 的浓度提高 35% 左右^[28]。说明一定的土壤盐分有助于提升盐生植物对重金属的吸收能力,盐胁迫可以调节植物体内的渗透相关酶系统进而减轻和缓解重金属胁迫对植物造成的损伤和对细胞渗透稳态的影响;盐分的增加可增加盐地碱蓬对无机离子的吸收,保持金属离子与矿物质的平衡^[29]。

3.3 施氮肥对盐胁迫下盐地碱蓬生理的影响

植物面临盐胁迫时会通过无机离子来平衡体内渗透势。研究表明, K⁺ 通常是非盐生植物的渗透调节物质,高浓度的 K⁺ 可以提高植物的耐盐性,而盐生植物的渗透调节物质主要是 Na⁺ 和 Cl⁻; 其中,无机渗透调节以 Na⁺、K⁺ 为主,有着较低的 K⁺/Na⁺^[30]。本研究发现,盐胁迫、施肥处理及盐肥互作均显著增加盐地碱蓬地上部 Na⁺、Cl⁻ 含量。与不施肥处理的各盐分水平相比, S₁、S₂ 盐分水平下底肥和追肥处理均增加了盐地碱蓬地上部 Na⁺、Cl⁻ 含量,降低了 K⁺ 含量和 K⁺/Na⁺,但在 S₁ 盐分条件下 N₀ 处理与 N₂ 处理 Cl⁻ 含量和 K⁺ 含量差异并不显著。Cl⁻ 含量在 S₁ 盐分水平时底肥处理达最大值,在 S₂ 盐分水平时,追肥处理下达最大值。这与段德玉^[31]研究结果一致,在相同盐分水平下,随着氮肥的施入,盐地碱蓬地上部 Na⁺ 含量显著增加,并且在高盐处理下

这种增加更明显。在本研究中,底肥处理的各盐分水平下盐地碱蓬地上部 Ca^{2+} 含量显著增加。大量研究表明 Ca^{2+} 是一种信号传导物质对维持细胞稳定具有重要作用^[32];植物受到盐胁迫时, Na^+ 在体内大量聚集,会破坏细胞的离子平衡、影响质膜功能,细胞质膜上的 Ca^{2+} 就会被 Na^+ 取代,结合 Ca^{2+} 的酶就会失去活性,从而导致细胞膜磷脂的降解,使细胞膜的结构受到破坏,严重影响植物的生长发育^[33]。说明底肥处理下随着盐分的增加盐地碱蓬会增加 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量维持细胞膜的稳定结构和离子平衡。

可溶性糖和脯氨酸是重要的有机渗透调节物质,其含量是植物维持渗透平衡能力的重要表现。在 S_0 、 S_1 盐分条件下施肥显著降低了盐地碱蓬地上部可溶性糖含量, S_2 盐分条件下施肥对可溶性糖含量并无显著影响;底肥显著增加了盐地碱蓬地上部脯氨酸含量,随盐胁迫的增加脯氨酸含量逐渐增加。大量研究表明在一定盐分范围内,随盐分浓度升高,盐地碱蓬可溶性糖和脯氨酸含量都升高,但是随盐浓度的持续升高,脯氨酸的含量开始下降,可溶性糖含量却持续升高^[34-36],这与本研究结果不一致。底肥与追肥处理下,盐地碱蓬地上部可溶性糖含量在 S_0 、 S_1 盐分水平下显著下降;底肥处理下脯氨酸含量显著升高,而追肥处理与无肥处理并无显著差异;相关性分析结果表明,盐地碱蓬地上部

的脯氨酸和可溶性糖含量呈极显著负相关关系。这可能是由于底施氮肥可以有效地为盐地碱蓬提供氮源,并合成氨基酸进行渗透调节适应盐胁迫的环境,而不施肥或者追肥条件下,植株氮肥缺少,在缺少氨基酸渗透调节的条件下,积累可溶性糖类进行渗透调节; Ca^{2+} 与脯氨酸含量呈负相关关系,这可能是由于胞内 Ca 水平的提高可以通过诱导脯氨酸合成酶的转录来增加脯氨酸的生物合成,控制植物细胞的渗透调节作用,以对外界刺激做出积极响应^[37-38]。

4 结论

施用氮肥促进盐地碱蓬的 Pb 富集,特别是在高盐土壤中,且底肥效果大于追肥,氮肥通过促进盐地碱蓬侧枝生长,增加地上部生物量,进而增加 Pb 富集量。盐胁迫下,施肥方式影响渗透调节物质脯氨酸的积累,底施氮肥显著增加 Ca^{2+} 的含量,并参与了渗透调节。因此,可采用底施氮肥的方法促进盐地碱蓬生长,以提高盐地碱蓬对盐碱地 Pb 污染的生物修复效果。本研究结果为利用盐生植物进行盐碱地土壤重金属污染的生物修复提供了依据。但本研究主要探讨了盐地碱蓬地上部重金属 Pb 富集量的变化,施肥对盐地碱蓬根系的影响及其对重金属的吸收需要进一步深入探讨。

参考文献 References:

- [1] 文晓阳, 饶巍, 李春萍, 覃德华, 郭芳阳, 王慧, 董昆乐, 杨瑞辉, 陈明灿. 铅胁迫对不同基因型烟草铅吸收、运转及积累的影响. 山东农业科学, 2022, 54(9): 106-112.
WEN X Y, RAO W, LI C P, QIN D H, GUO F Y, WANG H, DONG K L, YANG R H, CHEN M C. Effects of lead stress on lead uptake, transport and accumulation in different genotypes of tobacco. Journal of Shandong Agricultural Sciences, 2022, 54(9): 106-112.
- [2] 郑义. 渤海西海岸潮上带湿地重金属积累性风险及溯源分析. 天津: 天津理工大学硕士学位论文, 2018.
ZHENG Y. Risk and traceability analysis of heavy metal accumulation in supratidal wetlands of the West coast of Bohai Sea. Master Thesis. Tianjin: Tianjin University of Technology, 2018.
- [3] 孙养存, 尹紫良, 葛菁萍. 土壤中重金属污染物的来源及治理方式. 中国农学通报, 2022, 38(6): 75-79.
SUN C Y, YIN Z L, GE J P. Sources and treatment methods of heavy metal pollutants in soil. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, 38(6): 75-79.
- [4] 杜艺彤, 亢涵, 刘艳. 土壤重金属污染修复研究进展. 绿色科技, 2023, 25(2): 177-181.
DU Y T, KANG H, LIU Y. Research progress on remediation of soil heavy metal pollution. Green Science and Technology, 2023, 25(2): 177-181.
- [5] 韩承龙, 于雪, 莫训强, 卢学强. 我国盐生植物在土壤重金属污染修复中的应用述评. 江苏农业科学, 2022, 50(4): 17-23.
HAN C L, YU X, MO X Q, LU X Q. Review on application of halophytes in remediation of soil heavy metal pollution in China. Jiangsu Agricultural Sciences, 2022, 50(4): 17-23.
- [6] 廖晓勇, 陈同斌, 阎秀兰, 聂灿军. 提高植物修复效率的技术途径与强化措施. 环境科学学报, 2007(6): 881-893.

- LIAO X Y, CHEN T B, YAN X L, NIE C J. Technical approaches and strengthening measures to improve the efficiency of phytoremediation. *Journal of Environmental Sciences*, 2007(6): 881-893.
- [7] 梁丽琛, 刘维涛, 张雪, 陈晨, 霍晓慧, 李松. 盐土植物提取修复重金属污染盐土研究进展. *农业环境科学学报*, 2016, 35(7): 1233-1241.
- LIANG L C, LIU W T, ZHANG X, CHEN C, HUO X H, LI S. Research progress on extraction and remediation of heavy metal contaminated saline soils by plants. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2016, 35(7): 1233-1241.
- [8] AMARI T, GHNAYA T, ABDELLY C. Nickel, cadmium and lead phytotoxicity and potential of halophytic plants in heavy metal extraction. *South African Journal of Botany*, 2017, 36(111): 99-110.
- [9] MANOUSAKI E, KALOGERAKIS N. Halophytes present new opportunities in phytoremediation of heavy metals and saline soils. *Industrial & Engineering Chemistry Research*, 2011, 50(2): 656-660.
- [10] BRIAT J F, LEBRUN M. Plant responses to metal toxicity. *Comptes Rendus Del'Académie des Sciences*, 1999, 322(1): 43-54.
- [11] 朱紫檀, 洪晓松, 张晓宁, 申祺. 盐地碱蓬耐盐碱响应机制研究进展. *现代农业科技*, 2024(6): 94-97.
- ZHU Z T, HONG X S, ZHANG X N, SHEN Q. Research progress on salt-alkali tolerance response mechanism of salt-alkali salt-alkali ponderum. *Modern Agricultural Science and Technology*, 2024(6): 94-97.
- [12] 何洁, 高钰婷, 王晓庆, 贺莹莹, 周一兵. 翅碱蓬对重金属吸收的研究. 乌鲁木齐: 2011 年中国环境科学学会学术年会, 2011.
- HE J, GAO Y T, WANG X Q, HE Y Y, ZHOU Y B. Study on the absorption of heavy metals by *Suaeda alba*. Urumqi: 2011 Annual Conference of the Chinese Society of Environmental Sciences, 2011.
- [13] 刘欢. 翅碱蓬根系分泌物对细菌去除 Cd 作用的影响. 大连: 大连海洋大学硕士学位论文, 2020.
- LIU H. Effect of root exudates from *Suaeda salsa* on bacterial Cd removal. Master Thesis. Dalian: Dalian Ocean University, 2020.
- [14] 王绍坤, 牛小云, 邸东柳, 孙湃, 黄大庄, 闫海霞. 施加氮肥、硫肥对杞柳提取土壤中铅、镉的影响. *东北林业大学学报*, 2021, 49(10): 104-109.
- WANG S K, NIU X Y, DI D L, SUN P, HUANG D Z, YAN H X. Effect of nitrogen fertilizer and sulfur fertilizer on extraction of lead and cadmium from soil by willow. *Journal of Northeast Forestry University*, 2021, 49(10): 104-109.
- [15] 王界平, 田长彦. 施用氮磷肥对盐土中碱蓬生长及矿物质吸收累积特征的影响. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2010, 38(11): 201-208.
- WANG J P, TIAN C Y. Effects of nitrogen and phosphate fertilizer application on the growth and mineral absorption and accumulation characteristics of alkali-coated soil. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2010, 38(11): 201-208.
- [16] 蔡燕子, 崔保山, 邓佳凤. 三角洲滨海盐沼湿地盐地碱蓬表型性状对土壤盐分的响应. 广州: 中国自然资源学会 2012 学术年会, 2012.
- CAI Y Z, CUI B S, DEBG J F. Response of the phenotypic traits of salt-soil alpinia in the Delta coastal salt marsh wetland to soil salinity. Guangzhou: 2012 Academic Annual Meeting of the Chinese Society for Natural Resources, 2012.
- [17] GHNAYA T, GHORVEL M H, ABDELLY C. Cd-induced growth reduction in the halophyte *Sesuvium portulacastrum* is significantly improved by NaCl. *Jouranal Plant Research*, 2007, 120(2): 309-311.
- [18] 李文誉, 李德明. 盐碱及重金属对植物生长发育的影响. *北方园艺*, 2010(8): 221-224.
- LI W Y, LI D M. Effects of salinity and heavy metals on plant growth and development. *Northern Horticulture*, 2010(8): 221-224.
- [19] 李志贤, 向言词, 李会东, 陈章. 施氮水平对玉米吸收和富集重金属 Cd、Pb 的影响. *水土保持学报*, 2014, 28(6): 143-147, 166.
- LI Z X, XIANG Y Y, LI H D, CHEN Z. Effects of nitrogen application levels on absorption and enrichment of heavy metals Cd and Pb in maize. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 143-147, 166.
- [20] 施娴, 刘艳红, 张德刚, 何芳芳, 王田涛. 施氮水平对小麦幼苗吸收和富集重金属的影响. *江苏农业科学*, 2017, 45(21): 63-65.
- SHI X, LIU Y H, ZHANG D G, HE F F, WANG T T. Effects of nitrogen application levels on heavy metal uptake and enrichment in wheat seedlings. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(21): 63-65.
- [21] 王学文, 刘鸿雁, 何进. 重金属复合污染下不同种植密度香根草的生长及富集特征. *草业科学*, 2023, 40(8): 2028-2037.
- WANG X W, LIU H Y, HE J. Growth and enrichment characteristics of vetiver with different planting densities under heavy metal combined pollution. *Pratacultural Science*, 2023, 40(8): 2028-2037.
- [22] 王艳红, 艾绍英, 李盟军, 杨少海, 姚建武. 氮肥对污染农田土壤中铅的调控效应. *环境污染与防治*, 2008(7): 39-42, 46.
- WANG Y H, AI S Y, LI M J, YANG S H, YAO J B. Regulation effect of nitrogen fertilizer on lead in polluted farmland soil. *Environmental Pollution and Control*, 2008(7): 39-42, 46.
- [23] 崔文文, 王小飞, 王明锐, 姚晶晶. 土壤重金属污染及修复. *中南农业科技*, 2022, 43(6): 90-91, 95.

- CUI W W, WANG X F, WANG M R, YAO J J. Soil heavy metal pollution and remediation. *Central South Agricultural Science and Technology*, 2022, 43(6): 90-91, 95.
- [24] 徐明岗, 刘平, 宋正国, 张青. 施肥对污染土壤中重金属行为影响的研究进展. *农业环境科学学报*, 2006(S1): 328-333.
XU M G, LIU P, SONG Z G, ZHANG Q. Research progress on the effects of fertilization on the behavior of heavy metals in contaminated soil. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2006(S1): 328-333.
- [25] 熊礼明. 施肥与植物的重金属吸收. *农业环境科学学报*, 1993(5): 217-222.
XIONG L M. Fertilization and heavy metal absorption in plants. *Journal of Agro-Environmental Sciences*, 1993(5): 217-222.
- [26] GHORI N H, GHORI T, HAYAT M Q. Heavy metal stress and responses in plants. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16(3): 1807-1828.
- [27] 吴玉洁, 封晓辉, 张睿, 李静, 刘小京. 盐镉互作下盐地碱蓬和碱蓬生长及镉吸收的比较研究. *中国生态农业学报 (中英文)*, 2022, 30(7): 1186-1193.
WU Y J, FENG X H, ZHANG R, LI J, LIU X J. Comparative study on the growth and cadmium uptake of salt-to-cadmium interaction. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(7): 1186-1193.
- [28] HUSSAIN T, LI J S, FENG X H, HINA A, BILQUEES G, LIU X J. Salinity induced alterations in photosynthetic and oxidative regulation are ameliorated as a function of salt secretion. *Journal of Plant Research*, 2021, 134(4): 779-796.
- [29] 刘岚钰. NaCl 缓解盐地碱蓬 Cd 毒性机制研究. 西安: 陕西科技大学硕士学位论文, 2023.
LIU L Y. Study on the mechanism of NaCl alleviating Cd toxicity of salt-ground soda. Master Thesis. Xi'an: Shaanxi University of Science and Technology, 2023.
- [30] 黄慧灵. 八种抗碱盐生植物适应盐碱生境的渗透调节和离子平衡机制比较. 长春: 东北师范大学硕士学位论文, 2012.
HUANG H L. Comparison of osmotic regulation and ion balance mechanism of eight alkali-resistant halophytes adapted to saline-alkali habitat. Master Thesis. Changchun: Northeast Normal University, 2012.
- [31] 段德玉, 刘小京, 李存桢, 乔海龙. N 素营养对 NaCl 胁迫下盐地碱蓬幼苗生长及渗透调节物质变化的影响. *草业学报*, 2005(1): 63-68.
DUAN D Y, LIU X J, LI C Z, QIAO H L. Effects of N Nutrient on growth and osmoregulatory substances of *Alpinia halophylla* seedlings under NaCl stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005(1): 63-68.
- [32] 刘雅辉, 王秀萍, 刘广明, 孙建平, 姚玉涛, 杨雅华. 滨海盐土区 4 种典型耐盐植物盐分离子的积累特征. *土壤*, 2017, 49(4): 782-788.
LIU Y H, WANG X P, LIU G M, SUN J P, YAO Y T, YANG Y H. Accumulation characteristics of salt ions in four typical salt-tolerant plants in coastal saline soils. *Soils*, 2017, 49(4): 782-788.
- [33] 刘佳. 钙离子对植物生长发育的研究概况. *现代盐化工*, 2021, 48(5): 137-138, 145.
LIU J. Overview of studies on calcium ions on plant growth and development. *Modern Salt Chemical Industry*, 2021, 48(5): 137-138, 145.
- [34] BAJJI M, KINET J M, LUTTS S. Osmotic and ionic effects of NaCl on germination, early seedling growth, and ion content of *Atriplex halimus* (Chenopodiaceae). *Canadian Journal of Botany*, 2002, 80(3): 297-304.
- [35] 陈文翰, 蔡恒江, 赵玥茹, 王伟光, 刘远, 陈淼. 盐胁迫对翅碱蓬种子萌发及幼苗渗透调节物质的影响. *安徽农业科学*, 2018, 46(16): 65-67.
CHEN W H, CAI H J, ZHAO Y R, WANG W G, LIU Y, CHEN M. Effects of salt stress on seed germination and osmoregulatory substances of *Suaeda salsa* seedlings. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2018, 46(16): 65-67.
- [36] 苏芳莉, 孙旭, 孙权, 李海福, 王铁良. 湿地翅碱蓬生长及渗透调节物质对盐度的响应. *生态学杂志*, 2018, 37(7): 1997-2002.
SU F L, SUN X, SUN Q, LI H F, WANG T L. Responses of growth and osmoregulatory substances to salinity of *Suaeda salsa* in wetland. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37(7): 1997-2002.
- [37] 徐勤松, 施国新, 计汪栋, 杜开和, 许晔. Zn 对苣荬菜叶片保护酶活性、渗透调节物质含量和 Ca^{2+} 定位分布的影响. *水生生物学报*, 2009, 33(4): 613-619.
XU Q S, SHI G X, JI W D, DU K H, XU Y. Influence of Zn on the protective enzyme activity, permeability regulator content and Ca^{2+} location distribution in leaves of *Limnan*. *Chinese Journal of Hydrobiology*, 2009, 33(4): 613-619.
- [38] 郑远, 陈兆进. 植物细胞器钙信号研究进展. *植物生理学报*, 2015, 51(8): 1195-1203.
ZHENG Y, CHEN Z J. Advances in calcium signaling in plant organelles. *Chinese Journal of Plant Physiology*, 2015, 51(8): 1195-1203.

(责任编辑 魏晓燕)