

NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思 幼苗生长和根形态的影响

罗倩¹, 陈灿^{1,①}, 袁锋¹, 江传阳², 高倩倩¹, 谢安强¹, 林勇明¹, 吴承祯^{1,3}

(1. 福建农林大学林学院 森林生态系统过程与经营福建省高校重点实验室, 福建 福州 350002;

2. 福建省晋江垵头国有防护林场, 福建 泉州 362200; 3. 武夷学院生态与资源工程学院, 福建 南平 354300)

摘要: 参考沿海防护林高盐低磷的实际情况, 设置 0(N0)、2(N1)、4(N2)、6(N3) 和 8(N4) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ NaCl 5 个单一处理组以及 N2-P1[$0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$]、N2-P2[$1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$]、N3-P1、N3-P2、N4-P1 和 N4-P2 6 个复合处理组, 研究不同浓度 NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思 (*Acacia confusa* Merr.) 幼苗干物质积累、根形态及营养元素含量的影响。结果显示: 总体上看, NaCl 单一胁迫及低浓度 ($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷均会明显减少台湾相思幼苗根干质量、总干质量、总根长、总根表面积和总根体积; 中浓度 ($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷对幼苗干物质积累和根形态的改善效果不显著, 但施 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 后幼苗根干质量和总干质量高于 NaCl 单一胁迫。从不同级别根直径 (D) 看, 低径级 ($0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$) 的根对 NaCl 单一胁迫较为敏感, 且在低浓度 NaCl 胁迫下施磷后受抑制更加明显; 而高径级 ($D > 5.0 \text{ mm}$) 的根对 NaCl 单一胁迫有一定抗性, 中浓度 NaCl 胁迫下施磷后的总根长、总根表面积和总根体积明显高于 NaCl 单一胁迫。与对照 [$0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{NaCl}$, $0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] 相比, NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷会使根中 Na 含量明显增加, 其他 7 种元素含量总体下降。高浓度 ($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫导致幼苗死亡, 而施磷后幼苗对 NaCl 胁迫有一定的抵抗作用, 其中以施 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的效果较好。相关性分析结果显示: NaCl 单一胁迫下台湾相思幼苗根中 P 含量与总根长、根尖数、根分枝数和根组织密度呈显著或极显著正相关, 与平均根直径呈显著负相关; NaCl 胁迫下施磷后幼苗根中 Mn 和 K 含量与根干质量、总干质量、总根长、总根表面积和总根体积均呈显著或极显著正相关。综上所述, 在沿海种植台湾相思幼苗时, 建议低盐土壤不施磷, 中高盐土壤可根据具体土壤盐胁迫程度添加磷, 同时适量添加 Mn 和 K。

关键词: 台湾相思; NaCl 胁迫; 施磷; 干物质积累; 根形态; 营养元素

中图分类号: Q945.78; Q944.54; S192.12 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)05-0078-11

DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.05.08

Effects of NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress on the growth and root morphology of *Acacia confusa* seedlings LUO Qian¹, CHEN Can^{1,①}, YUAN Feng¹, JIANG Chuanyang², GAO Qianqian¹, XIE Anqiang¹, LIN Yongming¹, WU Chengzhen^{1,3} (1. Collegiate Key Lab of Forest-Ecosystem Process and Management in Fujian, College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2. Diantou State-owned Protective Forest Farm of Jinjiang in Fujian, Quanzhou 362200, China; 3. Department of Ecology and Engineering, Wuyi University, Nanping 354300, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(5): 78-88

Abstract: Considering the actual situation of high salt and low phosphorus of coast protection forest, five single treatment groups namely 0 (N0), 2 (N1), 4 (N2), 6 (N3), and 8 (N4) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ NaCl and six

收稿日期: 2022-11-12

基金项目: 福建省林业科技项目(2021FKJ22); 福州市科技项目(2021-P-034); 福建农林大学优秀研究生学位论文资助基金项目(1122YS01010)

作者简介: 罗倩(1998—), 女, 土家族, 湖北恩施人, 硕士研究生, 主要从事海岸带森林与环境研究。

①通信作者 E-mail: canchen@fafu.edu.cn

引用格式: 罗倩, 陈灿, 袁锋, 等. NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思幼苗生长和根形态的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2023, 32(5): 78-88.

combined treatment groups namely N2-P1 [$0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], N2-P2 [$1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], N3-P1, N3-P2, N4-P1, and N4-P2 were set in this study, effects of NaCl single stress at different concentrations and phosphorus application under NaCl stress on dry matter accumulation, root morphology, and nutrient element contents of *Acacia confusa* Merr. were studied. The results show that on the whole, NaCl single stress and phosphorus application under low concentration ($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl stress will evidently decrease root dry mass, total dry mass, total root length, total root surface area, and total root volume of *A. confusa* seedlings; the improved effect of phosphorus application under medium concentration ($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl stress on dry matter accumulation and root morphology of seedlings is not significant, but the root dry mass and total dry mass of seedlings after applying $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ are higher than those under NaCl single stress. From the different levels of root diameter (D), roots in low diameter class ($0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$) are relatively sensitive to NaCl single stress, and are more evidently suppressed after phosphorus application under low concentration NaCl stress; while roots in high diameter class ($D > 5.0 \text{ mm}$) possess some resistance to NaCl single stress, total root length, total root surface area, and total root volume after phosphorus application under medium concentration NaCl stress are obviously higher than those under NaCl single stress. Compared with the control [$0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ NaCl}$, $0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$], NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress will evidently increase Na content in roots, while contents of the other seven elements decrease in general. High concentration ($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl stress causes seedling death, while seedlings are partially tolerant to NaCl stress after phosphorus application, in which, the effect of applying $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{ Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ is better. The correlation analysis result shows that P content in roots of *A. confusa* seedlings shows significant or extremely significant positive correlations with total root length, number of root tip, number of root branch, and root tissue density under NaCl single stress, and shows a negative correlation with average of root diameter; both Mn and K contents in roots of seedlings after phosphorus application under NaCl stress show significant or extremely significant positive correlations with root dry mass, total dry mass, total root length, total root surface area, and total root volume. In conclusion, it is suggested to apply phosphorus according to the specific soil salt stress degree in medium and high salt soil and supplement suitable amount of Mn and K but not apply phosphorus in low salt soil when planting *A. confusa* seedlings in coastal areas.

Key words: *Acacia confusa* Merr.; NaCl stress; phosphorus application; dry mass accumulation; root morphology; nutrient element

高盐低磷是影响中国沿海防护林树种生长的关键因子。一方面,土壤盐渍化是全球范围内限制植物生产力的一个主要环境因子^[1],目前中国盐渍化土壤面积约 $3.5 \times 10^7 \text{ hm}^2$,约占世界盐渍化土壤面积的4%^[2],其中滨海盐碱地面积约 $1.0 \times 10^6 \text{ hm}^2$ ^[3],且仍在不断扩大^[4]。盐胁迫对植物生长发育^[5]有明显影响,包括降低光合电子传递活性与 CO_2 同化能力^[6]、降低养分利用效率^[7-8]以及破坏离子生态^[9]等。另一方面,亚热带地区土壤全磷含量约为 $0.35 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,低于全球土壤全磷含量的平均水平($0.50 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$),且磷易被含量较高的活性铁和铝强烈吸附,形成难溶性磷酸铁和磷酸铝等,导致有效磷含量降低^[10],阻碍植物养分的吸收与积累^[11],损害幼苗的生长发育^[12]。刁娟等^[13]研究了不同施磷量对盐渍化土壤玉米(*Zea mays* Linn.)磷素吸收及产量的影响,发现高盐环境下缺磷极有可能加剧盐害作用。因此,沿海

防护林土壤中高盐低磷共同作用会对沿海防护林树种产生危害,不利于沿海防护林的可持续经营和发展。

台湾相思 (*Acacia confusa* Merr.) 为豆科 (Fabaceae) 相思树属 (*Acacia* Mill.) 常绿乔木,是沿海防护林的先锋树种,在防风固沙、保持水土以及改良盐碱地等方面具有十分重要的作用^[14-15],但有关台湾相思根系适应盐碱胁迫的形态变化和养分吸收的研究相对较少。相关研究表明:植物根系在土壤中发生养分交换,其变化可以直接反映外界环境条件的变化^[16]。植物根系在环境胁迫条件下较其他器官更为敏感^[17-18],且对不同浓度盐胁迫的响应不同^[19-21]。通过补充植物体内短缺元素可一定程度上提高其对盐胁迫的抗性,这为沿海防护林的可持续经营提供了补磷抗盐的思路。目前,台湾相思幼苗的根形态和养分吸收特征等在不同盐分水平下的变化以及高盐环境下施磷对台湾相思幼苗的影响尚不明确。

本文以台湾相思幼苗为研究对象,研究 NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思幼苗干物质积累、根形态及营养元素含量的影响,以期探讨台湾相思耐盐机制以及沿海防护林的自我更新和可持续经营提供理论参考依据。

1 材料和方法

1.1 实验地概况

实验地位于福建省福州市福建农林大学林学院田间科技园(东经 119°13'42"、北纬 26°05'15")内。该区属亚热带季风气候,年平均降水量约 1 817 mm,年日照时数 1 700~1 980 h,年均空气相对湿度约 77%,无霜期约 326 d^[22];试验期间(2021 年 3 月至 7 月)温度 17℃~38℃,平均温度 24℃。

1.2 材料

采用土培法,选用广州瑞景园林种苗批发中心培育的当年生台湾相思幼苗作为供试材料。将幼苗种植于避光塑料盆(直径 18 cm、高 19 cm)内,每盆装沙土 4.5 kg,每盆种植 1 株幼苗。参考苏祖荣^[23]的方法模拟沿海防护林实际情况,设置沙土质量比为 3:1,供试基质土壤与细沙均采集于福建省泉州市惠安县赤湖国有林场(东经 24°54'35"、北纬 118°54'33"),基质电导率(17.50±2.59) $\mu\text{S} \cdot \text{cm}^{-1}$ 、含盐量 0.03%、速效氮含量(0.40±0.05) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效磷含量(0.70±0.05) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、速效钾含量(1.80±0.70) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$,pH 6.26 至 pH 6.34。幼苗种植后缓苗 1 个月,进行胁迫实验。

1.3 方法

1.3.1 实验设置 参考文献[23]中的方法模拟滨海盐碱地生长条件(土壤含盐量一般在 0.32%~0.78%之间),设置 0(N0)、2(N1)、4(N2)、6(N3)和 8(N4) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ NaCl 5 个盐浓度处理,为防止死亡分 4 次施入,每次间隔 1 周,但 N4 处理由于 NaCl 浓度过高在第 4 次施入后植株部分叶片开始变黄,收苗时该处理条件下的植株全部死亡(无数据),NaCl 购自福州仓山区柏思生物科技有限公司;在 NaCl 达到终浓度后一次性施入磷,设置 0.0(P0)、0.5(P1)和 1.5(P2) $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 3 个供磷水平^[24], $\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 中有效磷含量大于等于 16%,水溶性磷含量大于等于 11%,购自福州仓山区柏思生物科技有限公司。作者所在项目组的前期研究结果表明:N1 处理对台

湾相思种子萌发具有促进作用,且显著高于 N0 处理^[25],不符合沿海防护林高盐低磷恶劣环境下的实际情况,因此,仅设置 N2-P1、N2-P2、N3-P1、N3-P2、N4-P1 和 N4-P2 6 个复合处理组。共 11 个处理,每个处理各 9 盆,共 99 盆。

1.3.2 指标测定

1.3.2.1 幼苗干物质积累和根形态相关指标测定方法 于 7 月末从各处理组分别采集长势良好的幼苗 6 株,分为地上部和根部,清洗后使用千分之一电子天平称量根鲜质量,于 105℃ 杀青 30 min 后,于 80℃ 烘干至恒质量,称量地上部干质量和根干质量,并计算总干质量。使用 Epson Expression 10000 XL 扫描仪(美国 Epson 公司)扫描根形态,使用 WinRHIZO Pro 2009c 根系图像分析仪(加拿大 Regent 公司)获得总根长、总根表面积、总根体积、平均根直径、根尖数和根分枝数;并参考文献[26]中的方法,基于根直径(D)将根分为 $0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$ 、 $0.5 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$ 、 $2.0 \text{ mm} < D \leq 5.0 \text{ mm}$ 和 $D > 5.0 \text{ mm}$ 4 个径级^[26],统计各径级的总根长、总根表面积和总根体积;计算根冠比、根含水量、比根长及根组织密度,计算公式分别为根冠比=根干质量/地上部干质量、根含水量=[(根鲜质量-根干质量)/根鲜质量]×100%、比根长=总根长/根干质量、根组织密度=根干质量/总根体积。每个处理重复 6 次,每个指标重复测定 3 次,结果取平均值。

1.3.2.2 根中营养元素含量测定方法 根烘干后粉碎,过孔径 0.149 mm 筛,根据 GB 7830~7892—1987 中的方法,采用 $\text{H}_2\text{SO}_4\text{-HClO}_4$ 消煮法消解,使用 Optima 2100 DV 等离子体发射光谱仪(美国 PekinElmer 公司)测定 P、Fe、Mn、Mg、Ca、Al、Na 和 K 含量。

1.4 数据处理和分析

使用 EXCEL 2016 软件进行数据统计和分析,使用 SPSS 27.0 软件进行单因素方差分析(one-way ANOVA)和 Pearson 相关性分析(双尾检验),检验不同处理间的差异显著性,并分析 NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷后幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关性。

2 结果和分析

2.1 对幼苗干物质积累和根形态的影响

NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思

幼苗干物质积累和根形态的影响见表1。

2.1.1 对幼苗干物质积累的影响 结果显示:NaCl 单一胁迫下,随 NaCl 浓度的增加,各处理组台湾相思幼苗的根干质量和总干质量呈降低的趋势,根冠比呈先升高后趋于稳定的趋势,且上述3个指标与对照 [0 g · kg⁻¹NaCl,0.0 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂] 总体差异显著;根含水量与对照差异不显著。施磷后,各复合处理组的根干质量和总干质量明显低于对照,根含水量与对照差异不明显,4 g · kg⁻¹NaCl 与 1.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N2-P2) 以及 8 g · kg⁻¹NaCl 与 1.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N4-P2) 复合处理组的根冠比明显高于对照。

4 g · kg⁻¹NaCl 与 0.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N2-

P1) 以及 N2-P2 复合处理组台湾相思幼苗的根干质量、总干质量和根含水量低于 4 g · kg⁻¹NaCl(N2) 单一处理组,且多数复合处理组与 N2 单一处理组差异显著;而根冠比显著高于 N2 单一处理组。6 g · kg⁻¹NaCl 与 0.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N3-P1) 以及 6 g · kg⁻¹NaCl 与 1.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N3-P2) 复合处理组的根干质量、总干质量和根含水量与 6 g · kg⁻¹NaCl(N3) 单一处理组差异不显著;N3-P1 复合处理组的根冠比显著高于 N3 单一处理组,N3-P2 复合处理组的根冠比与 N3 单一处理组差异不显著。8 g · kg⁻¹NaCl 与 0.5 g · kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N4-P1) 以及 N4-P2 复合处理组可明显缓解 NaCl 胁迫对幼苗干物质积累的影响。

表1 NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思幼苗干物质积累和根形态的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress on dry matter accumulation and root morphology of *Acacia confusa* Merr. seedling ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

| 编号 No. | 处理 ²⁾ Treatment ²⁾ | | 根干质量/g Root dry mass | 总干质量/g Total dry mass | 根冠比 Root/shoot ratio | 根含水量/% Root water content | 总根长/cm Total root length | 总根表面积/cm ² Total root surface area |
|-----------|---|-----|-------------------------|--------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------------|--|
| | N | P | | | | | | |
| CK | 0 | 0.0 | 1.908±0.723A | 8.756±1.331A | 0.276±0.090B | 78.961±2.308A | 1404.968±76.616A | 213.938±8.134A |
| N1 | 2 | 0.0 | 1.770±0.174A | 7.260±0.748B | 0.331±0.068A | 79.302±3.531A | 1116.881±119.386B | 228.470±30.346A |
| N2 | 4 | 0.0 | 1.618±0.469Ba | 6.448±0.989Ba | 0.331±0.059Ac | 79.034±3.379Aa | 726.804±83.413Ca | 178.560±27.165Ba |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 1.126±0.166b | 4.154±0.580b | 0.373±0.028b | 78.472±2.807a | 601.463±53.437b | 129.196±10.501b |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 1.336±0.219a | 4.236±0.659b | 0.465±0.062a | 75.949±4.747b | 658.329±83.677b | 140.978±13.666b |
| N3 | 6 | 0.0 | 1.084±0.253Ca | 4.466±0.825Cab | 0.325±0.072Ab | 78.504±2.565Aa | 640.802±75.840Ca | 139.247±13.027Ca |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 1.124±0.285a | 4.136±0.475b | 0.378±0.103a | 78.617±6.730a | 612.117±71.561b | 112.114±14.067b |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 1.178±0.208a | 5.030±0.969a | 0.310±0.040b | 78.040±3.398a | 583.606±107.351b | 124.871±14.556a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 1.160±0.480a | 4.092±0.671a | 0.396±0.167b | 77.019±6.973a | 508.659±81.969a | 114.274±22.903a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 0.920±0.346a | 2.817±0.622b | 0.476±0.133a | 78.701±2.544a | 441.680±27.728b | 99.601±20.432b |

| 编号 No. | 处理 ²⁾ Treatment ²⁾ | | 总根体积/cm ³ Total root volume | 平均根直径/mm Average of root diameter | 根尖数 Number of root tip | 根分枝数 Number of root branch | 比根长 Specific root length | 根组织密度/(g · cm ⁻³) Root tissue density |
|-----------|---|-----|---|--------------------------------------|---------------------------|-------------------------------|-----------------------------|--|
| | N | P | | | | | | |
| CK | 0 | 0.0 | 7.068±0.486A | 0.582±0.016C | 4648.0±224.1A | 11384.5±1126.5A | 8.219±2.190A | 0.283±0.068A |
| N1 | 2 | 0.0 | 7.151±1.274A | 0.685±0.064B | 2580.4±428.9B | 5948.0±870.6B | 6.565±0.453AB | 0.238±0.023A |
| N2 | 4 | 0.0 | 7.202±1.671Aa | 0.806±0.050Aa | 1821.8±145.8Cb | 4455.0±100.9Ca | 4.772±0.973Ba | 0.250±0.073Aa |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 4.617±1.329b | 0.763±0.050ab | 1856.6±136.8b | 3836.6±180.3a | 5.441±0.480a | 0.242±0.026a |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 4.587±0.526b | 0.733±0.031b | 2347.4±206.3a | 4525.0±506.7a | 4.931±0.855a | 0.299±0.051a |
| N3 | 6 | 0.0 | 4.674±0.664Ba | 0.739±0.056Aab | 2098.2±380.8Ba | 3749.0±857.2Ca | 6.379±0.702ABa | 0.219±0.015Aa |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 4.957±1.627a | 0.809±0.147a | 2313.4±341.0a | 3984.4±609.0a | 5.688±1.030a | 0.244±0.062a |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 4.777±0.909a | 0.716±0.055b | 2200.6±358.9a | 3892.4±268.0a | 4.829±0.870a | 0.262±0.039a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 4.419±1.023a | 0.796±0.116a | 1660.4±196.0a | 3611.4±426.7a | 4.986±1.213a | 0.231±0.027a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 3.888±0.498b | 0.781±0.077a | 1305.3±98.8a | 2173.0±528.3b | 5.252±1.078b | 0.244±0.060a |

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示在 NaCl 单一胁迫处理组及对照间差异显著 ($P < 0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences among the NaCl single stress treatment groups and the control; 同列中不同的小写字母表示在同一 NaCl 浓度下不同磷浓度处理组间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P < 0.05$) differences between different phosphorus concentration treatment groups under the same NaCl concentration. —: 无数据 No datum.

²⁾ N: NaCl ($g \cdot kg^{-1}$); P: Ca(H₂PO₄)₂ ($g \cdot kg^{-1}$).

2.1.2 对幼苗根形态的影响 结果还显示:NaCl 单一胁迫下,各处理组台湾相思幼苗的总根长、总根表面积、根尖数和根分枝数总体显著低于对照;根组织密度低于对照,但差异不显著;平均根直径显著高于对照;N3 单一处理组的总根体积显著低于对照,其余处理组与对照差异不显著;N2 单一处理组的比根长显著低于对照,其余处理组与对照差异不显著。施磷后,各复合处理组的总根长、总根表面积、总根体积、根尖数、根分枝数、比根长和根组织密度总体明显低于对照,平均根直径明显高于对照。

N2-P1 和 N2-P2 复合处理组台湾相思幼苗的总根长、总根表面积、总根体积和平均根直径总体显著低于 N2 单一处理组;根尖数高于 N2 单一处理组,其中 N2-P2 复合处理组与 N2 单一处理组差异显著;根分枝数、比根长和根组织密度与 N2 单一处理组差异不显著。N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的总根长和总根表面积总体显著低于 N3 单一处理组,其余 6 个指标与 N3 单一处理组差异不显著。N4-P1 和 N4-P2

复合处理组可明显缓解 NaCl 胁迫对幼苗根形态的影响。

总体上看,与对照相比,各胁迫处理组台湾相思幼苗的根尖和根分枝数量减少、根变短小、平均根直径增加。NaCl 单一胁迫及低浓度 ($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷均会抑制台湾相思幼苗干物质积累,改变根形态;中浓度 ($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷对幼苗干物质积累和根形态的改善效果不显著,但施 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 后根干质量和总干质量高于 NaCl 单一胁迫;在高浓度 ($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷可对 NaCl 胁迫具有一定的缓解作用,其中以施 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的效果较好。

2.1.3 对幼苗不同径级根形态的影响 基于根直径 (D) 对台湾相思幼苗不同径级的根形态指标进行进一步分析,结果 (表 2) 显示:NaCl 单一胁迫下, $0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级内各处理组台湾相思幼苗的总根长、总根表面积和总根体积随 NaCl 浓度的增加呈降低的趋势,且与对照差异显著; $0.5 \text{ mm} < D \leq 2.0 \text{ mm}$

表 2 NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思幼苗不同径级根形态指标的影响 ($\bar{X} \pm SD$)

Table 2 Effects of NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress on morphology of roots in different diameter classes of *Acacia confusa* Merr. seedling ($\bar{X} \pm SD$)

| 编号 No. | 处理 Treatment | | 不同径级的总根长/cm ¹⁾ Total root length of different diameter classes ¹⁾ | | | |
|-----------|------------------------------|---|---|---------------------|---------------------|---------------|
| | NaCl/(g · kg ⁻¹) | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ /(g · kg ⁻¹) | 0.0 mm < D ≤ 0.5 mm | 0.5 mm < D ≤ 2.0 mm | 2.0 mm < D ≤ 5.0 mm | D > 5.0 mm |
| CK | 0 | 0.0 | 921.171±60.588A | 452.438±30.175A | 27.272±2.449A | 4.087±0.309B |
| N1 | 2 | 0.0 | 593.953±111.467B | 493.249±29.136A | 25.437±3.256A | 4.241±1.123AB |
| N2 | 4 | 0.0 | 349.425±63.143Ca | 346.674±18.040Ba | 25.966±6.822Aa | 4.739±0.899Aa |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 295.903±25.060b | 283.561±39.337b | 19.588±1.990b | 2.411±0.613b |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 327.563±46.277a | 309.012±39.887b | 18.862±4.223b | 2.892±1.938b |
| N3 | 6 | 0.0 | 309.162±50.736Ca | 311.269±50.307Ba | 17.869±3.702Ba | 2.502±0.674Cb |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 314.571±41.472a | 276.126±60.245b | 17.187±1.900a | 4.233±1.226a |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 311.377±53.801a | 251.831±58.930b | 15.874±4.814a | 4.524±1.166a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 263.978±32.149a | 228.136±53.715a | 12.839±2.917b | 3.707±1.062a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 195.561±29.013b | 224.123±4.021a | 19.415±3.706a | 2.581±1.011b |

| 编号 No. | 处理 Treatment | | 不同径级的总根表面积/cm ^{2 1)} Total root surface area of different diameter classes ¹⁾ | | | |
|-----------|------------------------------|---|---|---------------------|---------------------|---------------|
| | NaCl/(g · kg ⁻¹) | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ /(g · kg ⁻¹) | 0.0 mm < D ≤ 0.5 mm | 0.5 mm < D ≤ 2.0 mm | 2.0 mm < D ≤ 5.0 mm | D > 5.0 mm |
| CK | 0 | 0.0 | 77.481±2.580A | 103.787±6.216C | 24.907±0.927A | 7.764±0.397B |
| N1 | 2 | 0.0 | 51.997±5.594B | 145.208±29.432A | 22.236±3.092A | 9.029±1.996A |
| N2 | 4 | 0.0 | 33.043±6.874Ca | 114.259±22.211BCa | 21.951±2.468Aa | 9.307±2.502Aa |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 26.398±2.188b | 80.784±9.639b | 16.809±1.867b | 5.204±0.758b |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 29.341±5.458ab | 89.012±8.266b | 17.024±3.515b | 5.602±1.394b |
| N3 | 6 | 0.0 | 24.244±4.667Ca | 91.362±9.980Ca | 16.858±2.806Ba | 6.783±1.313Bb |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 23.580±4.559a | 64.997±17.935b | 15.178±1.406a | 8.360±1.722a |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 24.812±3.405a | 75.942±11.703b | 15.406±2.333a | 8.712±2.026a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 23.225±8.027a | 66.831±13.511a | 17.141±9.416a | 7.078±3.061a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 14.975±4.187b | 63.129±10.503a | 16.380±4.865a | 5.117±1.714b |

续表2 Table 2 (Continued)

| 编号 No. | 处理 Treatment | | 不同径级的总根体积/cm ³ ¹⁾ Total root volume of different diameter classes ¹⁾ | | | |
|-----------|----------------------------|---|---|-----------------|-----------------|---------------|
| | NaCl/(g·kg ⁻¹) | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ /(g·kg ⁻¹) | 0.0 mm<D≤0.5 mm | 0.5 mm<D≤2.0 mm | 2.0 mm<D≤5.0 mm | D>5.0 mm |
| CK | 0 | 0.0 | 0.627±0.077A | 3.090±0.337A | 1.953±0.337A | 1.398±0.098B |
| N1 | 2 | 0.0 | 0.460±0.070B | 3.449±1.039A | 1.641±0.298A | 1.602±0.327B |
| N2 | 4 | 0.0 | 0.291±0.066Ca | 2.967±0.600Ba | 1.877±0.403Aa | 2.067±0.897Aa |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 0.231±0.010b | 2.077±0.671b | 1.346±0.518b | 0.963±0.263b |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 0.254±0.052b | 2.217±0.306b | 1.323±0.235b | 0.794±0.305b |
| N3 | 6 | 0.0 | 0.226±0.053Ca | 2.207±0.600Ba | 1.262±0.354Ba | 0.980±0.364Cb |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 0.221±0.051a | 2.159±0.121a | 1.484±0.601a | 1.093±0.247b |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 0.244±0.070a | 1.976±0.605a | 1.154±0.223a | 1.403±0.379a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 0.201±0.073a | 1.759±0.341a | 1.198±0.517a | 1.261±0.632a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 0.160±0.036b | 1.615±0.335a | 1.305±0.282a | 0.808±0.215b |

¹⁾D: 根直径 Root diameter. 同列中不同的大写字母表示在 NaCl 单一胁迫处理组及对照间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences among the NaCl single stress treatment groups and the control; 同列中不同的小写字母表示在同一 NaCl 浓度下不同磷浓度处理组间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different phosphorus concentration treatment groups under the same NaCl concentration. —: 无数据 No datum.

径级内各处理组的总根长、总根表面积和总根体积随 NaCl 浓度的增加呈先升高后降低的趋势, N2 和 N3 单一处理组的总根长和总根体积显著低于对照, $2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{NaCl}$ (N1) 单一处理组的总根表面积显著高于对照; $2.0\text{ mm}<D\leq 5.0\text{ mm}$ 径级内各处理组的总根长、总根表面积和总根体积随 NaCl 浓度的增加变化各异, 但均低于对照, N3 单一处理组的上述 3 个指标与对照差异显著; $D>5.0\text{ mm}$ 径级内各处理组的总根长、总根表面积和总根体积随 NaCl 浓度的增加呈先升高后降低的趋势, N2 单一处理组的上述 3 个指标显著高于对照, N3 单一处理组的上述 3 个指标总体显著低于对照, N1 单一处理组的总根表面积显著高于对照。 $0.0\text{ mm}<D\leq 0.5\text{ mm}$ 、 $0.5\text{ mm}<D\leq 2.0\text{ mm}$ 和 $2.0\text{ mm}<D\leq 5.0\text{ mm}$ 径级内各复合处理组的总根长、总根表面积和总根体积明显低于对照; $D>5.0\text{ mm}$ 径级内 N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的总根长和总根表面积以及 N3-P2 复合处理组的总根体积均高于对照, 其余复合处理组的上述 3 个指标低于对照。

$0.0\text{ mm}<D\leq 0.5\text{ mm}$ 径级内 N2-P1 和 N2-P2 复合处理组的总根长、总根表面积和总根体积低于 N2 单一处理组, 且 N2-P1 复合处理组的上述 3 个指标以及 N2-P2 复合处理组的总根体积与 N2 单一处理组差异显著; N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的总根长、总根表面积和总根体积与 N3 单一处理组无显著差异。 $0.5\text{ mm}<D\leq 2.0\text{ mm}$ 径级内 N2-P1 和 N2-P2 复合处理组的总根长、总根表面积和总根体积显著低于

N2 单一处理组; N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的总根长和总根表面积显著低于 N3 单一处理组, 总根体积低于 N3 单一处理组但差异不显著。 $2.0\text{ mm}<D\leq 5.0\text{ mm}$ 和 $D>5.0\text{ mm}$ 径级内 N2-P1 和 N2-P2 复合处理组的总根长、总根表面积和总根体积显著低于 N2 单一处理组; $2.0\text{ mm}<D\leq 5.0\text{ mm}$ 径级内 N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的上述 3 个指标与 N3 单一处理组差异不显著, $D>5.0\text{ mm}$ 径级内 N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的上述 3 个指标总体显著高于 N3 单一处理组。

总体上看, 低径级 ($0.0\text{ mm}<D\leq 0.5\text{ mm}$) 台湾相思幼苗根对 NaCl 单一胁迫较为敏感, 根变短小; 而高径级 ($D>5.0\text{ mm}$) 的根对 NaCl 单一胁迫有一定抗性, 变化不大。 低浓度 NaCl 胁迫下施磷, 各径级的根受抑制更加明显, 根变短小; 中浓度 NaCl 胁迫下施磷对高径级 ($D>5.0\text{ mm}$) 的根生长有明显促进作用, 根变粗大, 而 $0.5\text{ mm}<D\leq 2.0\text{ mm}$ 径级的根受抑制更加明显; 高浓度 NaCl 胁迫下施磷对各径级的根生长均具有一定的促进作用。

2.2 对幼苗根中营养元素含量的影响

NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷对台湾相思幼苗根中营养元素含量的影响见表 3。 结果显示: NaCl 单一胁迫下, 各处理组台湾相思幼苗根中 P 和 Ca 含量总体显著低于对照 [$0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{NaCl}$, $0.0\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$]; Fe、Al 和 K 含量与对照差异不显著; $4\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{NaCl}$ (N2) 和 $6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}\text{NaCl}$ (N3) 单一处理组的 Mn 含量显著高于对照, Mg 含量显著低于

表3 NaCl单一胁迫及NaCl胁迫下施磷对台湾相思幼苗根中营养元素含量的影响($\bar{X}\pm SD$)Table 3 Effects of NaCl single stress and phosphorus application under NaCl stress on nutrient element contents in roots of *Acacia confusa* Merr. seedling ($\bar{X}\pm SD$)

| 编号 No. | 处理 Treatment | | 各营养元素含量/(g·kg ⁻¹) ¹⁾ Content of each nutrient element ¹⁾ | | | |
|-----------|----------------------------|---|--|---------------|---------------|---------------|
| | NaCl/(g·kg ⁻¹) | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ /(g·kg ⁻¹) | P | Fe | Mn | Mg |
| CK | 0 | 0.0 | 0.694±0.007A | 3.215±0.167A | 0.044±0.006B | 2.032±0.013A |
| N1 | 2 | 0.0 | 0.559±0.078B | 3.142±0.116A | 0.038±0.006B | 2.222±0.252A |
| N2 | 4 | 0.0 | 0.488±0.040Bb | 3.216±0.084Aa | 0.061±0.003Aa | 1.521±0.094Ba |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 0.566±0.037b | 2.962±0.057a | 0.032±0.003b | 1.302±0.111a |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 0.710±0.008a | 3.374±0.213a | 0.040±0.002ab | 1.500±0.059a |
| N3 | 6 | 0.0 | 0.492±0.019Bb | 3.499±0.823Aa | 0.054±0.016Aa | 1.532±0.006Bb |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 0.537±0.004ab | 2.136±0.050b | 0.027±0.002b | 1.366±0.045b |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 0.595±0.017a | 2.502±0.277b | 0.032±0.010b | 1.766±0.102a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 0.466±0.015b | 3.246±0.078a | 0.039±0.004a | 1.348±0.083a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 0.548±0.001a | 3.572±0.104a | 0.020±0.006a | 1.099±0.028a |

| 编号 No. | 处理 Treatment | | 各营养元素含量/(g·kg ⁻¹) ¹⁾ Content of each nutrient element ¹⁾ | | | |
|-----------|----------------------------|---|--|---------------|----------------|----------------|
| | NaCl/(g·kg ⁻¹) | Ca(H ₂ PO ₄) ₂ /(g·kg ⁻¹) | Ca | Al | Na | K |
| CK | 0 | 0.0 | 4.365±0.089AB | 5.797±0.075A | 5.968±0.152B | 5.280±0.130AB |
| N1 | 2 | 0.0 | 3.498±0.556C | 5.752±0.263A | 7.644±1.779B | 5.964±0.945A |
| N2 | 4 | 0.0 | 3.702±0.090Cb | 5.922±0.046Aa | 10.330±0.988Aa | 5.159±0.436ABa |
| N2-P1 | 4 | 0.5 | 4.347±0.394a | 5.080±0.850b | 8.638±0.641b | 3.826±0.145b |
| N2-P2 | 4 | 1.5 | 3.792±0.098b | 5.633±0.830a | 8.447±0.149b | 4.541±0.099b |
| N3 | 6 | 0.0 | 3.989±0.136BCb | 6.384±1.878Aa | 7.535±0.898Bb | 4.646±0.065Ba |
| N3-P1 | 6 | 0.5 | 4.203±0.029ab | 3.068±0.466b | 10.618±0.036a | 3.722±0.039b |
| N3-P2 | 6 | 1.5 | 4.521±0.029a | 4.251±0.155b | 9.764±0.060a | 4.673±0.158a |
| N4 | 8 | 0.0 | — | — | — | — |
| N4-P1 | 8 | 0.5 | 4.049±0.285a | 5.111±0.570a | 10.157±0.369a | 3.622±0.145a |
| N4-P2 | 8 | 1.5 | 3.461±0.021b | 5.702±0.721a | 7.948±0.141b | 2.862±0.030b |

¹⁾ 同列中不同的大写字母表示在 NaCl 单一胁迫处理组及对照间差异显著 ($P<0.05$) Different uppercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences among the NaCl single stress treatment groups and the control; 同列中不同的小写字母表示在同一 NaCl 浓度下不同磷浓度处理组间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant ($P<0.05$) differences between different phosphorus concentration treatment groups under the same NaCl concentration. —: 无数据 No datum.

对照;Na 含量明显高于对照,仅 N2 单一处理组与对照差异显著。施磷后,各复合处理组的 Mn、Mg、Al 和 K 含量低于对照,但多数复合处理组与对照间差异不明显;Na 含量仍明显高于对照;4 g·kg⁻¹NaCl 与 1.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N2-P2)复合处理组的 P 含量略高于对照,其余复合处理组明显低于对照;4 g·kg⁻¹NaCl 与 0.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N2-P1)复合处理组的 Fe 含量略低于对照,6 g·kg⁻¹NaCl 与 0.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N3-P1)以及 6 g·kg⁻¹NaCl 与 1.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N3-P2)复合处理组的 Fe 含量明显低于对照,其余复合处理组的 Fe 含量略高于对照;N3-P2 复合处理组的 Ca 含量略高于对照,其余复合处理组的 Ca 含量低于对照,其中,N2-P2 以及 8 g·kg⁻¹NaCl 与 1.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N4-P2)复合处理组的 Ca 含量明显低于对照。

2 g·kg⁻¹NaCl 与 0.5 g·kg⁻¹Ca(H₂PO₄)₂(N2-P1)和 N2-P2 复合处理组台湾相思幼苗根中 Mn、Al、Na 和 K 含量总体显著低于 N2 单一处理组;Fe 和 Mg 含量与 N2 单一处理组差异不显著;N2-P2 复合处理组的 P 含量和 N2-P1 复合处理组的 Ca 含量显著高于 N2 单一处理组。N3-P1 和 N3-P2 复合处理组的 Fe、Mn 和 Al 含量显著低于 N3 单一处理组,Na 含量显著高于 N3 单一处理组;N3-P2 复合处理组的 P、Mg 和 Ca 含量显著高于 N3 单一处理组;N3-P1 复合处理组的 K 含量显著低于 N3 单一处理组。N4-P1 和 N4-P2 复合处理组可明显缓解 NaCl 胁迫对幼苗根中营养元素含量的影响。

总体上看,与对照相比,NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷后台湾相思幼苗根中 Na 含量明显增加,其他 7 种元素含量下降。

2.3 幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关性分析

NaCl 单一胁迫下台湾相思幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关系数见表 4, NaCl 胁迫下施磷后台湾相思幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关系数见表 5。

结果(表 4)显示: NaCl 单一胁迫下台湾相思幼苗根中 P 含量与总根长和根组织密度呈显著 ($P<0.05$) 正相关, 与根尖数和根分枝数呈极显著

($P<0.01$) 正相关, 与平均根直径呈显著负相关, 相关系数分别为 0.957、0.983、0.991、0.991 和 -0.954; Fe 含量与根含水量和根体积呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.970 和 -0.976; Al 含量与根干质量、总根表面积和总根体积呈显著负相关, 相关系数分别为 -0.974、-0.954 和 -0.961; Na 含量与比根长呈显著负相关, 相关系数为 -0.983; K 含量与根含水量呈显著正相关, 相关系数为 0.952; 其他指标间相关性均不显著。

结果(表 5)显示: NaCl 胁迫下施磷后台湾相思

表 4 NaCl 单一胁迫下台湾相思幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关系数

Table 4 Correlation coefficient of indexes related dry matter accumulation and root morphology with nutrient element contents in root of *Acacia confusa* Merr. seedling under NaCl single stress

| 指标 Index | 相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient ¹⁾ | | | | | | | |
|--------------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | P 含量 P content | Fe 含量 Fe content | Mn 含量 Mn content | Mg 含量 Mg content | Ca 含量 Ca content | Al 含量 Al content | Na 含量 Na content | K 含量 K content |
| 根干质量 Root dry mass | 0.718 | -0.925 | -0.494 | 0.718 | 0.061 | -0.974 * | -0.205 | 0.750 |
| 总干质量 Total dry mass | 0.863 | -0.806 | -0.530 | 0.724 | 0.290 | -0.895 | -0.403 | 0.629 |
| 根冠比 Root/shoot ratio | -0.892 | 0.030 | 0.262 | -0.289 | -0.924 | 0.200 | 0.761 | 0.136 |
| 根含水量 Root water content | 0.269 | -0.970 * | -0.505 | 0.701 | -0.512 | -0.930 | 0.138 | 0.952 * |
| 总根长 Total root length | 0.957 * | -0.624 | -0.742 | 0.842 | 0.404 | -0.752 | -0.699 | 0.586 |
| 总根表面积 Total root surface area | 0.648 | -0.914 | -0.751 | 0.909 | -0.147 | -0.954 * | -0.302 | 0.923 |
| 总根体积 Total root volume | 0.419 | -0.976 * | -0.266 | 0.530 | -0.214 | -0.961 * | 0.166 | 0.756 |
| 平均根直径 Average of root diameter | -0.954 * | 0.259 | 0.740 | -0.734 | -0.621 | 0.423 | 0.925 | -0.307 |
| 根尖数 Number of root tip | 0.991 ** | -0.300 | -0.531 | 0.586 | 0.746 | -0.464 | -0.811 | 0.198 |
| 根分枝数 Number of root branch | 0.991 ** | -0.439 | -0.500 | 0.603 | 0.678 | -0.589 | -0.707 | 0.285 |
| 比根长 Specific root length | 0.866 | -0.094 | -0.772 | 0.703 | 0.597 | -0.259 | -0.983 * | 0.233 |
| 根组织密度 Root tissue density | 0.983 * | -0.380 | -0.723 | 0.759 | 0.591 | -0.537 | -0.861 | 0.379 |

¹⁾ * : $P<0.05$; ** : $P<0.01$.

表 5 NaCl 胁迫下施磷后台湾相思幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关系数

Table 5 Correlation coefficient of indexes related dry matter accumulation and root morphology with nutrient element contents in root of *Acacia confusa* Merr. seedling after phosphorus application under NaCl stress

| 指标 Index | 相关系数 ¹⁾ Correlation coefficient ¹⁾ | | | | | | | |
|--------------------------------|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|-------------------|
| | P 含量 P content | Fe 含量 Fe content | Mn 含量 Mn content | Mg 含量 Mg content | Ca 含量 Ca content | Al 含量 Al content | Na 含量 Na content | K 含量 K content |
| 根干质量 Root dry mass | 0.048 | -0.005 | 0.747 * | 0.485 | -0.108 | 0.180 | 0.467 | 0.781 * |
| 总干质量 Total dry mass | -0.178 | -0.180 | 0.782 * | 0.700 | 0.178 | 0.096 | 0.489 | 0.888 ** |
| 根冠比 Root/shoot ratio | 0.460 | 0.378 | -0.490 | -0.668 | -0.589 | 0.094 | -0.292 | -0.622 |
| 根含水量 Root water content | -0.600 | -0.199 | 0.017 | -0.164 | -0.001 | -0.067 | 0.082 | -0.053 |
| 总根长 Total root length | 0.130 | -0.141 | 0.773 * | 0.597 | 0.116 | 0.125 | 0.203 | 0.881 ** |
| 总根表面积 Total root surface area | -0.031 | 0.188 | 0.901 ** | 0.509 | -0.132 | 0.448 | 0.132 | 0.875 ** |
| 总根体积 Total root volume | -0.275 | -0.115 | 0.724 * | 0.389 | -0.102 | 0.112 | 0.515 | 0.707 * |
| 平均根直径 Average of root diameter | -0.603 | -0.113 | 0.002 | -0.566 | -0.339 | -0.209 | 0.544 | -0.342 |
| 根尖数 Number of root tip | 0.481 | -0.537 | 0.206 | 0.688 | 0.523 | -0.394 | 0.185 | 0.580 |
| 根分枝数 Number of root branch | 0.255 | -0.306 | 0.629 | 0.671 | 0.350 | -0.106 | 0.405 | 0.808 * |
| 比根长 Specific root length | 0.060 | -0.188 | -0.020 | 0.100 | 0.333 | -0.079 | -0.465 | 0.064 |
| 根组织密度 Root tissue density | 0.686 | 0.263 | -0.074 | 0.105 | -0.025 | 0.133 | -0.181 | 0.015 |

¹⁾ * : $P<0.05$; ** : $P<0.01$.

幼苗根中 Mn 含量与根干质量、总干质量、总根长、总根表面积和总根体积均呈显著或极显著正相关,相关系数分别为 0.747、0.782、0.773、0.901 和 0.724;K 含量与根干质量、总干质量、总根长、总根表面积、总根体积和根分枝数均呈显著或极显著正相关,相关系数分别为 0.781、0.888、0.881、0.875、0.707 和 0.808。

3 讨 论

3.1 对幼苗干物质积累和根形态的影响

干物质积累是植物根系响应环境变化的直接体现^[17]。根据植物对盐胁迫生理反应的广泛研究,盐胁迫下植物根干质量下降可能是由离子毒性、氧化胁迫和渗透胁迫造成的^[27]。本研究结果显示:NaCl 单一胁迫下,台湾相思幼苗根干质量与总干质量随 NaCl 浓度的增加呈降低的趋势,这与华建峰等^[28]的研究结果类似,说明在 NaCl 胁迫下台湾相思幼苗会通过减少干物质积累来减少能耗以抵抗逆境胁迫^[29]。低浓度($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷会明显减少台湾相思幼苗干物质积累;中浓度($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷可增加干物质积累,但效果不显著,以施 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的效果较好;高浓度($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 胁迫下施磷可明显缓解 NaCl 胁迫对干物质积累的影响,以施 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 的效果较好。说明在沿海地区防护林经营过程中应根据具体的土壤盐胁迫程度进行补磷。

根形态很大程度上受土壤环境的影响^[30]。土壤施加外源物质、激素干扰和微生物群落等^[31-33]均会改变根形态。本研究中,NaCl 单一胁迫下,根含水量和根组织密度随 NaCl 浓度的增加变化不大,这与洋金凤 [*Caesalpinia pulcherrima* (Linn.) Sw.] 和凤凰木 [*Delonix regia* (Boj.) Raf.] 等植物不同,NaCl 胁迫下洋金凤幼苗根含水量显著降低,凤凰木幼苗根含水量呈先升高后降低的趋势^[34]。这可能与不同植物在 NaCl 胁迫下的细胞渗透性以及木质部栓塞程度不同有关^[35]。作者所在项目组的前期研究结果表明^[36]:台湾相思幼苗叶相对含水量随 NaCl 浓度的增加呈先降低后升高的趋势,高浓度 NaCl 胁迫下台湾相思幼苗叶相对含水量较对照显著升高。本文中 NaCl 胁迫下施磷后幼苗根含水量与对照 [$0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{NaCl}$, $0.0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$] 差异也不大,说明 NaCl 单一胁迫下及 NaCl 胁迫下施磷后根汲取水分可能并非台湾

相思应对 NaCl 胁迫的策略。NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷后幼苗根尖和根分枝数量均少于对照,根变短小,这可能是由于 NaCl 胁迫占据主导地位,NaCl 胁迫使细胞分裂和细胞延伸速率减缓或细胞延伸时间减少^[37],幼苗会通过降低根尖数、根分枝数、总根长、总根表面积和总根体积等来减少盐分毒害区。

本研究还发现, $0.0 \text{ mm} < \text{根直径}(D) \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级台湾相思幼苗根在 NaCl 单一胁迫下的总根长、总根表面积和总根体积显著低于对照,说明细根对 NaCl 胁迫响应更敏感,主要是由于台湾相思幼苗 $0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$ 径级内的根数量多、表皮更薄,盐分易渗透,根体积小也导致根细胞内液泡对盐离子的缓冲区间少,且相较于 $D > 0.5 \text{ mm}$ 径级的根而言延伸面积有限,对胁迫更为敏感^[38]。 $D > 5.0 \text{ mm}$ 径级内各处理组的总根长、总根表面积和总根体积随 NaCl 浓度的增加呈先升高后降低的趋势,其中,低浓度 NaCl 胁迫下的上述 3 个指标显著高于对照。说明不同径级根对 NaCl 胁迫的响应有较大差异,可能原因是台湾相思幼苗在低浓度 NaCl 胁迫下会主动调控不同径级根生长,将营养元素大部分供给粗根,吸收的盐分储存在距离较近的茎部,以保证根吸收更多的营养元素维持植物体正常生长^[39]。本研究结果显示:施磷后改变了不同径级的耐盐水平,其中,中浓度 NaCl 胁迫下施磷对高径级 ($D > 5.0 \text{ mm}$) 的根生长有明显促进作用,根变粗大,优于根整体水平,说明粗根对磷的添加更为敏感。

3.2 对幼苗根中营养元素含量的影响

根是植物吸收水分和营养元素的主要器官^[40]。本研究发现,NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷后台湾相思根中 Na 含量增加明显,其他 7 种元素含量总体下降。这可能是由于在 NaCl 胁迫下,大量 Na^+ 进入根细胞,改变了细胞中的电荷总量和离子浓度,影响了细胞的渗透性及离子平衡^[41],因此,维持细胞中离子稳态是植物适应盐胁迫的关键策略。本研究结果显示:低浓度 ($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) 和中浓度 ($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷后幼苗根中 Mg 含量明显低于对照。产生这种现象的原因可能是由于 NaCl 胁迫会破坏叶绿体和含 Mg 酶的结构,进而影响了根中 Mg 含量^[36-37],而施磷对修复叶绿体结构作用不大。还有研究结果表明:Ca 作为植物生长所必需的中量元素,在植物细胞壁形成、保护质膜以及维持细胞内稳态等过程中发挥着十分重要的作用^[42]。本

研究中,台湾相思幼苗根中 Ca 含量在 NaCl 单一胁迫下均明显低于对照,而 NaCl 胁迫下施磷后幼苗根中 Ca 含量高于对应的 NaCl 单一胁迫,说明施磷可以增加幼苗根中 Ca 含量,进而缓解 NaCl 胁迫。此外,本研究中高浓度($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)NaCl 胁迫导致植株全部死亡,而施磷后幼苗根对大部分营养元素的吸收与对照总体差异不大,说明高浓度 NaCl 胁迫下施磷对维持根细胞中的离子稳态有重要作用。

3.3 幼苗干物质积累和根形态相关指标与根中营养元素含量的相关性分析

NaCl 单一胁迫下台湾相思幼苗根中 P 含量与总根长、根尖数、根分枝数和根组织密度呈显著($P < 0.05$)或极显著($P < 0.01$)正相关,与平均根直径呈显著负相关;随 NaCl 浓度的增加,P 含量的变化趋势与上述 5 个根形态指标的变化趋势存在相似之处,说明 P 的补充为台湾相思幼苗根的生长提供了必要的物质保障,增强了根对逆境的适应能力。K 含量与根含水量呈显著正相关,NaCl 单一胁迫下 K 含量与对照无显著差异,这也解释了台湾相思幼苗根含水量没有显著变化的原因。NaCl 胁迫下施磷后,Mn 和 K 含量与根干质量、总干质量、总根长、总根表面积和总根体积均呈显著或极显著正相关,说明 Mn 和 K 是影响台湾相思幼苗根生长的重要元素,因此,在高盐低磷的沿海环境中,除了 P 外,Mn 和 K 也是促进防护林树种生长的重要元素。

4 结 论

NaCl 单一胁迫及低浓度($4 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)NaCl 胁迫下施磷均会明显抑制台湾相思幼苗干物质积累,改变根形态,根尖和根分枝数量减少、根变短小、平均根直径增加。其中,低径级($0.0 \text{ mm} < D \leq 0.5 \text{ mm}$)的根对 NaCl 单一胁迫较为敏感,且在施磷后受抑制更加明显;而高径级($D > 5.0 \text{ mm}$)的根对 NaCl 单一胁迫有一定抗性,在中浓度($6 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)NaCl 胁迫下施磷对根生长有明显促进作用,根变粗大。NaCl 单一胁迫及 NaCl 胁迫下施磷会使根中 Na 含量明显增加,其他 7 种元素含量总体下降。此外,高浓度($8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)NaCl 胁迫会导致幼苗死亡,施磷后幼苗对 NaCl 胁迫有一定的抵抗作用。综合考虑,建议在沿海种植台湾相思幼苗时,低盐土壤不施磷,中高盐土壤可添加磷[中盐土壤中以添加 $1.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 为宜,高

盐土壤中以添加 $0.5 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1} \text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2$ 为宜],同时适量添加 Mn 和 K。通过地上、地下器官形态特征、干物质分配策略及离子稳态的协同变化,台湾相思能够在高盐低磷的恶劣环境下保持正常的生长和发育,体现了异质性环境下的形态可塑性和抗逆性机制,但恶劣环境对台湾相思的抗逆性机制尚未完全揭示,有待进一步研究。

参考文献:

- [1] AMUNDSON R, BERHE A A, HOPMAND J W, et al. Soil and human security in the 21st century [J]. *Science*, 2015, 348 (6235): 1261071.
- [2] 赵英,王丽,赵惠丽,等.滨海盐碱地改良研究现状及展望[J]. *中国农学通报*, 2022, 38(3): 67-74.
- [3] 王睿彤,孙景宽,陆兆华.土壤改良剂对黄河三角洲滨海盐碱土生化特性的影响[J]. *生态学报*, 2017, 37(2): 425-431.
- [4] ZHANG Z C, FENG S C, LUO J Q, et al. Evaluation of microbial assemblages in various saline-alkaline soils driven by soluble salt ion components[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69: 3390-3400.
- [5] SIAO W, COSKUN D, BALUŠKA F, et al. Root-apex proton fluxes at the centre of soil-stress acclimation[J]. *Trends in Plant Science*, 2020, 25(8): 794-804.
- [6] ZHANG Y Q, KAISER E, ZHANG Y T, et al. Short-term salt stress strongly affects dynamic photosynthesis, but not steady-state photosynthesis, in tomato (*Solanum lycopersicum*) [J]. *Environmental and Experimental Botany*, 2018, 149: 109-119.
- [7] LIANG S C, JIANG Y, LI M B, et al. Improving plant growth and alleviating photosynthetic inhibition from salt stress using AMF in alfalfa seedlings[J]. *Journal of Plant Interactions*, 2019, 14(1): 482-491.
- [8] IMRAN M, BOELT B, MÜHLING K-H. Zinc seed priming improves salt resistance in maize[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2018, 204(4): 390-399.
- [9] CHEN Q H, QI L Y, BI Q F, et al. Comparative effects of 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) and dicyandiamide (DCD) on ammonia-oxidizing bacteria and archaea in a vegetable soil [J]. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2015, 99(1): 477-487.
- [10] 乔航,莫小勤,罗艳华,等.不同林龄油茶人工林土壤酶化学计量及其影响因素[J]. *生态学报*, 2019, 39(6): 1887-1896.
- [11] 陈立华,张欢,姚宇阔,等.盐地碱蓬覆被对滨海滩涂土壤理化性质的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2021, 30(2): 19-27.
- [12] KAPOOR R, EVELIN H, DEVI T S, et al. Mitigation of salinity stress in plants by arbuscular mycorrhizal symbiosis: current understanding and new challenges[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: 470.
- [13] 习娟,杨修一,耿计彪,等.不同施磷量对盐渍化土壤玉米

- 磷素吸收及产量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2022(7): 58-63.
- [14] 刘金燕, 丁国昌, 兰宇翔, 等. 闽东南海岛台湾相思林春季景观质量评价研究: 以平潭岛为例[J]. 西北林学院学报, 2020, 35(5): 249-254.
- [15] 陈志为, 周艳芬, 樊月, 等. 台湾相思内生真菌的分离筛选及其对幼苗生长的影响[J]. 东北林业大学学报, 2019, 47(1): 61-64, 75.
- [16] HAN M G, SUN L J, GAN D Y, et al. Root functional traits are key determinants of the rhizosphere effect on soil organic matter decomposition across 14 temperate hardwood species [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2020, 151: 108019.
- [17] 叶刚, 杨静, 李晓慧, 等. NaCl胁迫下不同耐盐型结缕草根系 Ca^{2+} 和 H^{+} 流动及 Ca^{2+} 分布特征[J]. 植物资源与环境学报, 2022, 31(3): 75-84.
- [18] JIA S X, MCLAUGHLIN N B, GU J C, et al. Relationships between root respiration rate and root morphology, chemistry and anatomy in *Larix gmelinii* and *Fraxinus mandshurica* [J]. Tree physiology, 2013, 33: 579-589.
- [19] 黄勇, 郭猛, 张红瑞, 等. 盐胁迫对石竹种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2020, 29(12): 105-111.
- [20] 李俊伟, 刘景辉, 王俊英, 等. 盐与碱胁迫对燕麦离子平衡和有机酸含量的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(10): 1700-1710.
- [21] 陈慧英, 汤坤贤, 宋晖, 等. 3种海岛植被修复典型植物耐盐能力研究[J]. 应用海洋学报, 2017, 36(3): 379-384.
- [22] 代林利, 陈义堂, 伍丽华, 等. 不同林分密度杉木林养分积累与垂直空间分配[J]. 应用生态学报, 2022, 33(2): 311-320.
- [23] 苏祖荣. 木麻黄抗盐能力及降盐技术试验研究[J]. 防护林科技, 1999(1): 17-19.
- [24] 谢钰容, 周志春, 金国庆, 等. 马尾松不同种源P素吸收动力学特征[J]. 林业科学研究, 2003, 16(5): 548-553.
- [25] 袁锋, 罗倩, 夏心慧, 等. 盐磷胁迫对木麻黄和台湾相思种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 587-595.
- [26] ANTONINO D I, ANTONIO M, GABRIELLA S S, et al. Fine root growth of *Quercus pubescens* seedlings after drought stress and fire disturbance[J]. Environmental and Experimental Botany, 2011, 74(2): 272-279.
- [27] YAN K, SHAO H B, SHAO C Y, et al. Physiological adaptive mechanisms of plants grown in saline soil and implications for sustainable saline agriculture in coastal zone[J]. Acta Physiologiae Plantarum, 2013, 35: 2867-2878.
- [28] 华建峰, 杜丽娟, 王菁丰, 等. 混合盐胁迫对江苏省沿海常用绿化树种生长的影响及耐盐性评价[J]. 植物资源与环境学报, 2015, 24(3): 41-49.
- [29] 列志旸, 薛立. 盐胁迫对树木生长影响研究综述[J]. 世界林业研究, 2017, 30(3): 30-34.
- [30] 王庆惠, 韩伟, 侯银莹, 等. 不同耐盐品种棉花根系主要指标对盐分胁迫的响应[J]. 应用生态学报, 2018, 29(3): 865-873.
- [31] GUAN B, GAO N, CHEN M, et al. Seedling adaptive characteristics of *Phragmites australis* to nutrient heterogeneity under salt stress using a split-root approach[J]. Aquatic Sciences, 2021, 83: 56.
- [32] 张嵩, 顾万荣, 王泳超, 等. DCPA对盐胁迫下玉米苗期根系生长、渗透调节及膜透性的影响[J]. 生态学杂志, 2015, 34(9): 2474-2481.
- [33] FAKHECH A, JEMO M, MANAUT N, et al. Impact of mycorrhization on phosphorus utilization efficiency of *Acacia gummifera* and *Retama monosperma* under salt stress[J]. Forests, 2021, 12: 611.
- [34] 赵斌, 徐张俊, 吴向崇, 等. 3种热带植物幼苗的耐盐性[J]. 森林与环境学报, 2020, 40(5): 519-525.
- [35] 周洪华, 李卫红. 胡杨木质部水分传导对盐胁迫的响应与适应[J]. 植物生态学报, 2015, 39(1): 81-91.
- [36] 陈增焰, 陈灿, 袁锋, 等. 施盐和磷对台湾相思幼苗光合作用及养分特征的影响[J]. 广西植物, 2023, 43(4): 596-605.
- [37] 王东明, 贾媛, 崔继哲. 盐胁迫对植物的影响及植物盐适应性研究进展[J]. 中国农学通报, 2009, 25(4): 124-128.
- [38] 罗达, 史彦江, 宋锋惠, 等. 盐胁迫对平欧杂种榛幼苗生长、光合荧光特性及根系构型的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(10): 3376-3384.
- [39] 杨宏伟, 刘文瑜, 沈宝云, 等. NaCl胁迫对藜麦种子萌发和幼苗生理特性的影响[J]. 草业学报, 2017, 26(8): 146-153.
- [40] GRIFFITHS M, ROY S, GUO H C, et al. A multiple ion-uptake phenotyping platform reveals shared mechanisms affecting nutrient uptake by roots[J]. Plant Physiology, 2021, 185: 781-795.
- [41] 孙景波, 孙广玉, 刘晓东, 等. 盐胁迫对桑树幼苗生长、叶片水分状况和离子分布的影响[J]. 应用生态学报, 2009, 20(3): 543-548.
- [42] 殷秀霞, 陈芹芹, 刘海双, 等. 钙信号在植物响应盐胁迫中的作用研究进展[J]. 分子植物育种, 2023, 21(3): 850-857.

(责任编辑: 郭严冬)