

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.02.040

赵乐, 苏睿, 何红花. 土壤盐胁迫对紫花苜蓿磷素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2024, 38(2): 414-422.

ZHAO Le, SU Rui, HE Honghua. Effects of soil salt stress on phosphorus utilization of alfalfa[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(2): 414-422.

土壤盐胁迫对紫花苜蓿磷素利用的影响

赵乐¹, 苏睿², 何红花^{1,3}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 平凉市环境工程评估中心, 甘肃 平凉 744000;

3. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要: [目的] 为了研究土壤磷肥和盐分及其交互作用对紫花苜蓿生长、磷营养和耐盐性的影响。

[方法] 通过向壤土中添加不同浓度梯度的磷肥(0, 40, 80, 160 mg/kg, 以 KH_2PO_4 的形式添加)和氯化钠

(0, 0.4, 0.8, 1.6 g/kg) 进行温室盆栽试验, 种植紫花苜蓿“甘农七号”。[结果] 紫花苜蓿地上部生物量和地

下部生物量均随着磷肥施加水平的提高而增加, 但随着盐分添加水平的提高而减少; 施磷时植物的磷吸收

量增加, 当磷水平为 160 mg/kg 时, 根、茎、叶的磷含量均达到最大。添加盐分抑制对磷的吸收, 当盐水平

为 1.6 g/kg 时, 根、茎、叶的磷含量与不加 NaCl 时相比显著减少; 与不加磷肥时相比, 酒石酸含量随着磷肥

水平升高而减少, 外源盐分添加显著增加紫花苜蓿根际酒石酸的含量; 大部分处理的根际 pH 与非根际 pH

相比均降低, 在盐胁迫的情况下土壤 pH 的降低提高土壤磷的有效性和植物对磷的吸收; 高剂量(160 mg/

kg) 的磷肥添加使紫花苜蓿的磷吸收效率、磷利用效率均显著降低。[结论] 土壤磷肥与盐分之间存在显著

的交互作用, 盐分增加加剧植物磷缺乏, 适当施用磷肥可提高紫花苜蓿的耐盐性, 并提高其在盐渍土壤中的

生产力。

关键词: 紫花苜蓿; 磷有效性; 盐分; 磷吸收效率; 根际酒石酸

中图分类号: S963.22⁺ 3.3

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)02-0414-09

Effects of Soil Salt Stress on Phosphorus Utilization of Alfalfa

ZHAO Le¹, SU Rui², HE Honghua^{1,3}

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. Pingliang Environment & Engineering Appraisal Center, Pingliang, Gansu 744000, China; 3. State Key Laboratory of

Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Institute of Soil and

Water Conservation, Chinese Academy of Sciences & Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] In order to explore the effects of soil phosphorus (P) fertilizer and salt and their

interaction on the plant growth, P nutrition and salt tolerance of alfalfa (*Medicago sativa*). [Methods]

Alfalfa "Gannon VII" was planted by adding phosphate fertilizer (0, 40, 80, 160 mg/kg, in the form of

KH_2PO_4) and NaCl (0, 0.4, 0.8, 1.6 g/kg) with different concentration gradients to the loess soil. [Results]

The aboveground and underground biomass of alfalfa increased with the increase of P application level, but

decreased with the increase of NaCl addition level. When P was added, P uptake by plants increased. When P

was added at 160 mg/kg, P concentrations in roots, stems, and leaves all reached the maximum. However,

the addition of salinity inhibited the absorption of P. When NaCl was added at 1.6 g/kg, P concentrations in

roots, stems, and leaves all significantly decreased, when compared with that without NaCl. The content of

tartrate in rhizosphere of alfalfa decreased with the increase of P compared with that without P, and the

addition of exogenous salt significantly increased the content of tartrate in rhizosphere. The rhizosphere soil

pH of most treatments was lower than that of non-rhizosphere pH, the decrease of soil pH under salt stress

收稿日期: 2023-10-26

修回日期: 2023-11-30

录用日期: 2023-12-27

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-03-07

资助项目: 陕西省自然科学基金计划一般项目(面上)(2019JM-411)

第一作者: 赵乐(1998—), 女, 在读硕士研究生, 主要从事植物生理生态研究。E-mail: 2021050728@nwfau.edu.cn

通信作者: 何红花(1983—), 女, 博士, 副研究员, 博士生导师, 主要从事磷肥高效利用的机理研究。E-mail: honghuahe@ms.iswc.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

might increase the availability of soil P and P uptake by plants. A high-dose (160 mg/kg) of P significantly reduced the P-uptake efficiency of P-utilization efficiency of alfalfa. [Conclusion] In summary, there was a significant interaction between soil P fertilization and salinity, and the increase in salinity exacerbated plant P deficiency. Appropriate application of P-fertilizers can improve the salt tolerance of alfalfa and enhance its productivity in saline soils.

Keywords: *Medicago sativa* L.; phosphorus availability; salinity; phosphorus-uptake efficiency; rhizosphere tartaric acid

Received: 2023-10-26

Revised: 2023-11-30

Accepted: 2023-12-27

Online(www.cnki.net): 2024-03-07

磷(P)是植物生长和生理活动中必不可少的重要营养元素,在植物体内一系列的生理生化过程中发挥作用^[1]。土壤供磷不足会引发植株生长迟缓、结实不良、严重减产等问题^[1]。随着农业生产中大量磷肥施入,同时土壤吸附固定大量的磷,被固定的这部分磷基本上不能够被作物吸收利用,这种情况一方面导致作物缺磷和生长受限;另一方面,在土壤中积累大量的无效态磷^[2],导致植物对磷的吸收效率和利用效率通常较低^[3]。

土壤盐碱化是影响世界农业发展的一个严重问题。据统计^[4],世界上约有 20% 的耕地和约 1/3 的灌溉地区正面临着盐碱化的威胁。纵观我国,盐碱化土壤的分布范围非常广泛。盐碱化土壤是重要的后备土壤资源,盐胁迫却是抑制植物生产力的主要非生物因子之一,特别是在我国干旱、半干旱以及部分海滨地区^[5]。有研究^[6]表明,盐胁迫导致植物根系外部水势低引起的渗透胁迫,以及钠离子(Na^+)或氯离子(Cl^-)的离子毒性,进而干扰磷元素的吸收和转运过程。与非盐土相比,轻度与中度盐渍土可吸收态磷的占比分别降低 36% 和 70%,速效磷含量分别下降 42% 和 67%^[7]。

紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)是一种广泛种植的豆科类牧草,一种中等耐盐胁迫的物种,与其他豆科植物相比,其敏感性较弱。自然界中同时存在的胁迫因素可能有多种,土壤缺磷和盐胁迫是 2 种常见的非生物胁迫因子^[1]。施用磷肥是提升紫花苜蓿磷利用效率和吸收效率的重要手段。农田中的磷利用效率只有 10%~15%,造成豆科植物普遍存在缺磷症^[8]。略微的盐含量增加紫花苜蓿的营养价值^[9],而盐胁迫通过损害幼苗发育,降低光合速率,进而影响养分吸收,尤其是磷分的吸收,抑制豆科植物生长^[1,10]。目前,已有研究^[11-12]发现,通过施磷可以提高植物的耐盐性。植物可以通过改变根质比、释放根系有机酸等活化土壤中不溶性的磷,优化磷利用效率,提升根系土壤磷利用效率,调节植物盐胁迫的危害。

因此,本研究通过设置不同浓度梯度的盐分和磷

水平,外源添加磷肥与氯化钠,种植紫花苜蓿开展盆栽试验,以期揭示紫花苜蓿对盐分水平和施磷水平变化的响应机制,为在盐碱地合理施用磷肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

本试验选取紫花苜蓿为供试植物,品种为“甘农七号”(Gannon VII)。供试土壤采自陕西关中平原中部杨凌地区多年撂荒地的表层**瘠土**。瘠土自然风干后过 2 mm 筛备用。其全磷含量(460.0 ± 20.0) mg/g,全钾含量(24.6 ± 2.2) mg/g,全氮含量(1.1 ± 0.1) mg/g,有机质含量(9.3 ± 0.3) mg/g,速效磷含量(7.2 ± 0.5) mg/g,电导率(131.0 ± 5.4) $\mu\text{S}/\text{cm}$,pH 为 8.4 ± 0.4 ,田间持水量为(23.0 ± 2.3)%。所有数值为 3 个重复的平均值 $\pm$ 标准误差。

1.2 研究方法

采用温室盆栽试验的方法,于 2019 年 3—7 月在西北农林科技大学南校区温室($34^{\circ}16'19''\text{N}$, $108^{\circ}04'20''\text{E}$)进行试验。采用双因素完全随机设计,盐分(以 NaCl 形式)设置 4 个梯度,分别为 0, 0.4, 0.8, 1.6 g/kg(表示为 0 NaCl, 0.4 NaCl, 0.8 NaCl, 1.6 NaCl);外源磷(以 KH_2PO_4 形式)设置 4 个梯度,分别为 0, 40, 80, 160 mg/kg(表示为 0P, 40P, 80P, 160P),共 16 个处理,每个处理 4 个重复。取 64 个花盆,盆内套塑料袋,每盆装**瘠土** 2 kg,以溶液的形式加入底肥,其中氮肥(以 NH_4NO_3 形式)添加量为 100 mg/kg,钾肥总量为 100 mg/kg(分别以 K_2SO_4 、KCl 形式各添加 50 mg/kg)。各处理水平外源磷(KH_2PO_4)和盐(NaCl)均以溶液的形式添加,然后加水至田间持水量的 60%,每 3 天加超纯水至恒重,培土 2 周。培土结束后,再次将盆内土壤过筛、混匀、装盆,播种前保持田间持水量为 60%。挑选颗粒饱满且无虫害的苜蓿种子,用 H_2O_2 (10%)对种子杀菌处理 5 min,去离子水多次冲洗,在装有湿润滤纸的培养皿中暗处发芽 12 h。次日播种时每盆 30 穴,每穴 1 粒。观察苜蓿生长状况,对出苗率不高的处理及时进行补种。子叶展开

后定苗,每盆留苗 20 株。用称重法每 3 天加纯净水至恒重。在种植 106 天后收获,测定相关指标。

1.3 植株指标测定

1.3.1 植物生长指标的测定 于刈割后立即将苜蓿植株进行茎、叶分离,把除用于提取根际有机酸的根系取出后用纯水冲洗干净,之后分别装入牛皮纸袋。将装入牛皮纸袋的植物茎、叶和根放置烘箱中,先在 105 ℃ 下杀青 30 min,然后 60 ℃ 下烘干样品至恒定重量。将茎、叶部分干重相加得到地上部生物量,将这部分根干重与提取有机酸的部分根干重相加得地下部生物量。根质比计算为地下部植物根干质量与植物总干质量的比。

1.3.2 根际有机酸提取与测定 取约 1.0 g 细根,轻抖土后将其转移到装有 20 mL 0.2×10^{-3} mol/L CaCl_2 的玻璃烧杯中。将根和根际土壤浸入溶液中约 20 min,期间沿同一方向轻轻搅拌,以尽可能多地除去根际附着的土壤而不破坏细胞完整性。用头部装有 0.22 μm 微孔滤膜的 10 mL 注射器过滤浸提液,并注入 1 mL 液相色谱进样瓶中,向其中加入 1 滴浓磷酸化提取液以防止微生物降解羧酸盐。将提取液放置在 -20 ℃ 的冰箱内保存直至使用高效液相色谱仪(HPLC)分析测定提取液中有机酸的组成和含量。将用于提取有机酸的细根拣出后烘干称重^[8]。

使用配备有 Waters 2998 检测器和 Waters Symmetry C18 反相色谱柱(Waters, Milford MA, USA)的 Waters E2695 HPLC 对提取的根际有机酸进行分析测定。测定过程中的标准工作溶液包括乙酸、酒石酸、丙二酸、琥珀酸、柠檬酸和苹果酸。检测波长为 210 nm,进样量为 10 μL ,每个样品的运行时间为 18 min^[11]。在所有样品中均检测到酒石酸盐,其含量以每单位根干重的毫摩尔酒石酸盐表示。

1.3.3 根、茎和叶中全磷含量的测定以及磷肥利用效率的计算 全磷含量测定:称取适量烘干样品,使用 $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ ($v : v = 4 : 1$) 混合酸高温消煮,采用钒钼黄比色法测定^[13]。

磷吸收效率 = (外源添加处理的植物磷累积量 - 0PNaCl 处理的植物磷累积量) / (外源添加处理施加的磷量 - 0P 处理之间施加的磷量)

磷利用效率 = 每盆植物总生物量 / 每盆植物的磷累积量

1.3.4 植株根、茎、叶钠和钾含量的测定 称取适量烘干磨细后的植物根、茎、叶部分样品,采用混酸 $\text{HNO}_3 : \text{HClO}_4$ ($v : v = 4 : 1$) 进行消煮,用火焰原子分光光度计(铂金埃尔默企业管理有限公司 PinAAcle 900H 型)测定^[13]。

1.4 根际土壤与非根际土壤 pH 测定

根际土壤 pH 在提取有机酸溶液中使用便携式 pH 计(Mettler Toledo, 中国上海)测定。非根际土壤 pH 的测定:在植株收获后将试验土壤过 2 mm 筛后混匀,风干后得非根际土壤。按土 : 水为 1 : 5 的比例,称取 8 g 非根际土壤加入 40 mL 去 CO_2 水于离心管中,振荡静置 0.5 h 后,用便携式 pH 计测定。

1.5 统计方法

原始数据的整理运用 Excel 数据处理软件;用 SPSS 数据分析软件对 P 和 NaCl 进行单因素方差分析,对 $P \times \text{NaCl}$ 交互作用进行双因素方差分析, $p \leq 0.05$ 时定义为差异显著,对各处理采用 LSD 的方法进行多重比较;使用 Origin 绘图软件作图。

2 结果与分析

2.1 磷肥和盐分对生长的影响

磷肥和盐分的交互作用对紫花苜蓿地上部生物量没有显著影响(表 1、图 1a)。

表 1 磷(P)、盐(NaCl)及其交互作用($P \times \text{NaCl}$)下有关参数的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of phosphorus (P), salt (NaCl) and their interaction ($P \times \text{NaCl}$)

参数	P	NaCl	$P \times \text{NaCl}$
地上部生物量	<0.001	<0.001	0.059
地下部生物量	<0.001	<0.001	<0.001
根质比	<0.001	<0.001	0.003
根 P 含量	<0.001	0.060	0.404
茎 P 含量	<0.001	0.025	0.536
叶 P 含量	<0.001	0.500	0.955
P 吸收效率	0.001	<0.001	0.122
P 利用效率	<0.001	0.561	0.775
根 Na 含量	<0.001	<0.001	0.012
茎 Na 含量	0.059	<0.001	0.015
叶 Na 含量	0.176	<0.001	0.151
根 K/Na	0.004	<0.001	0.509
茎 K/Na	0.606	<0.001	0.575
叶 K/Na	0.771	<0.001	0.618

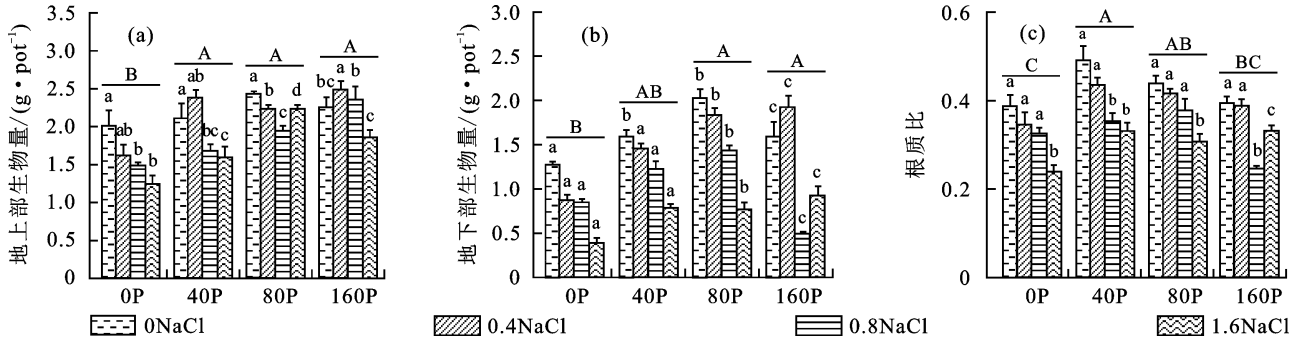
注:P 表示磷的单独作用;NaCl 表示盐分的单独作用; $P \times \text{NaCl}$ 表示交互作用; $p \leq 0.05$ 表示有显著差异。

在 40P 和 160P 条件下,添加 0.4NaCl 时地上部生物量达最大值,比 0NaCl 处理分别提高 12.6% 和 11.1%。而外源磷肥的添加使其地上部生物量显著增加($p < 0.001$),其中 160P 处理的地上部生物量增幅最大,与 0P 相比,地上部生物量增加 42.8%。盐分对紫花苜蓿地上部生物量有显著影响($p < 0.002$)。在大多数情况下,添加盐分使紫花苜蓿的地上部生物量减少;1.6NaCl 处理下紫花苜蓿地上部生物量减少幅度最大,与 0NaCl 相比,生物量减少 27.5%。磷肥

和盐分的交互作用对紫花苜蓿的地下部生物量具有显著影响($p < 0.001$),在 160P 条件下,添加 0.4NaCl 处理的地下部生物量比 0NaCl 处理高 20.6%(图 1b、表 1)。对于紫花苜蓿来说,地下部生物量均随着盐分添加量的增加而减少。对于根质比,磷肥和盐分的

交互作用对紫花苜蓿影响显著($p = 0.003$)(图 1c、表 1)。

总体而言,地上部生物量、地下部生物量及根质比在大部分情况下随着磷肥添加量的增加而增加或升高,随着盐分添加量的增加而减少或降低。



注:0P、40P、80P、160P 分别表示磷(以 KH_2PO_4 形式)的添加水平为 0、40、80、160 mg/kg, 0NaCl、0.4NaCl、0.8NaCl、1.6NaCl 分别表示 NaCl 的添加水平为 0、0.4、0.8、1.6 g/kg。图中不同大写字母表示不同磷肥处理之间的差异显著($p < 0.05$),不同小写字母代表相同磷肥处理下的不同盐分处理之间的差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 磷肥和盐分对地上部生物量、地下部生物量和根质比的影响

Fig. 1 Effects of shoot biomass, root biomass and root mass ratio under different phosphorus and salt

2.2 磷肥和盐分对磷吸收的影响

由图 2、表 1 可知,添加磷肥对紫花苜蓿根磷含量影响显著($p < 0.001$),在大部分情况下根磷含量随着磷肥添加量的增加而增加,在 40P、80P 和 160P 处理时与 0P 相比分别增加 57.9%, 111.8% 和 112.5%。添加盐分对根磷含量的影响不显著(图 2a)。磷肥和盐分交互作用对茎磷含量没有显著影响(图 2b)。紫花苜蓿的茎磷含量随着磷肥添加水平的增加而增加,

40P、80P 和 160P 与 0P 相比分别增加 80.6%, 128.4% 和 135.1%;在 40P 和 80P 时随着盐分添加水平的增加而显著减少,但是在 160P 时除 1.6NaCl 处理外随着盐分添加水平的增加而升高。

大多数情况下,添加磷肥使紫花苜蓿的叶磷含量显著增加($p < 0.001$)(图 2c),160P 与 0P 相比增加 15.1%。添加盐分则对紫花苜蓿的叶片磷含量影响不大。

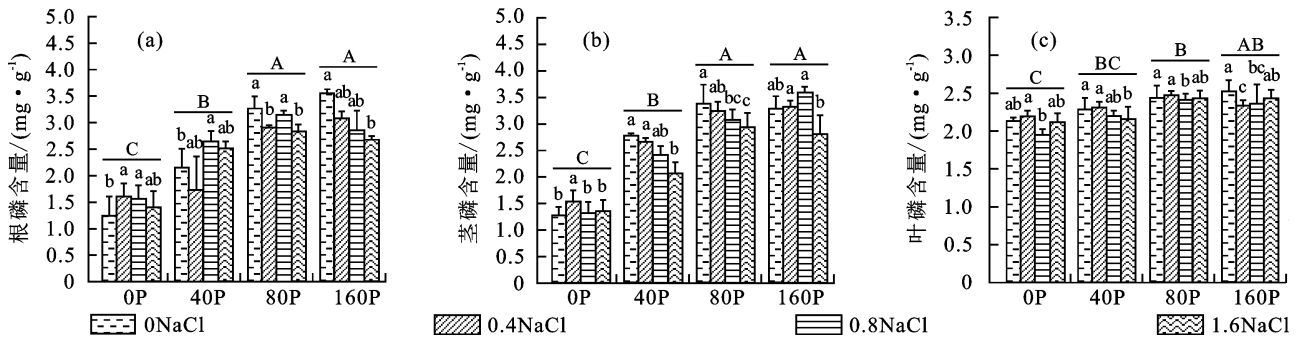


图 2 磷肥和盐分对根、茎和叶磷含量的影响

Fig. 2 Effects of phosphorus content in roots, stems and leaves under different phosphorus and salt

2.3 磷肥和盐分对磷吸收利用效率的影响

由图 3、表 1 可知,磷肥和盐分的单独作用对紫花苜蓿的磷吸收效率产生显著影响($p \leq 0.001$),但磷肥和盐分的交互作用对紫花苜蓿磷吸收效率的影响不显著。磷吸收效率随磷肥添加水平的升高而降低。在 80P 处理和 160P 处理时,与 40P 处理相比磷吸收效率分别下降 16.4% 和 25.4%;“甘农七号”表现出随着盐分的添加量增大而磷吸收效率降低,在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理时与 0NaCl 相比较,磷吸收

效率分别下降 5.2%, 47.8% 和 79.2%。从图 3 和表 1 还可看出,磷肥对其磷利用效率的影响显著($p < 0.001$),而盐分对磷利用效率的影响不显著;随着磷肥添加水平的增加,磷利用效率降低;与 0P 相比,40P、80P 和 160P 处理时磷利用效率分别下降 23.8%, 40.2% 和 40.4%。

2.4 磷肥和盐分对钠含量的影响

磷肥和盐分水平单独和交互作用均对紫花苜蓿的根钠含量有显著影响($p \leq 0.012$)(图 4a、表 1)。根

钠含量随磷添加量的增加而显著减少,随盐分添加量的增加而显著增加。磷水平对紫花苜蓿茎钠含量均没有显著影响(图 4b、表 1),但盐分水平则对其影响显著;茎钠含量随着盐分添加水平的增加显著增加,茎钠含量在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中与 0NaCl 相比分别升高 0.2、2.3、2.3 倍。磷肥和盐分的

交互作用对紫花苜蓿茎和叶片钠含量均没有显著影响。磷肥和盐分之间的交互作用对叶片钠含量均没有显著影响。添加盐分对叶钠含量有显著影响($p < 0.001$)(图 4c、表 1)。紫花苜蓿在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中与 0NaCl 相比分别升高 7.2%、89.5% 和 150.1%。

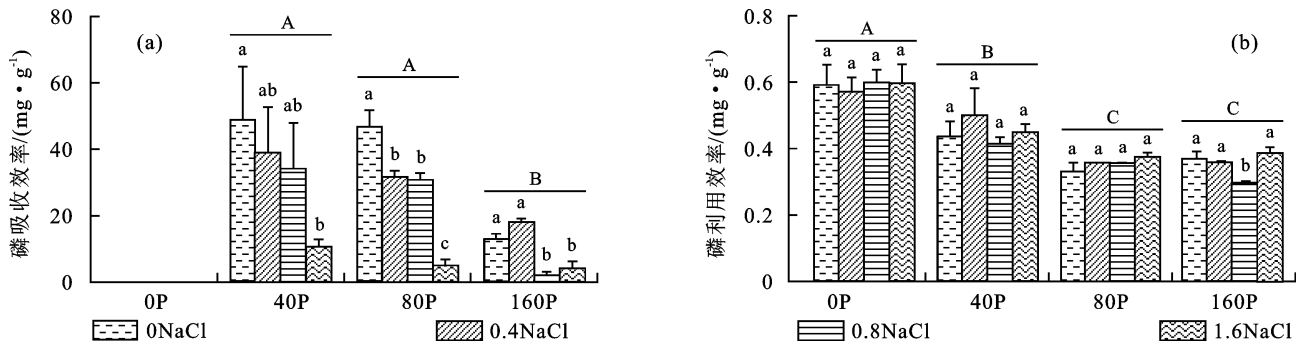


图 3 磷肥和盐分对磷吸收效率和利用效率的影响

Fig. 3 Effects of phosphorus absorption efficiency and utilization efficiency under different phosphorus and salt

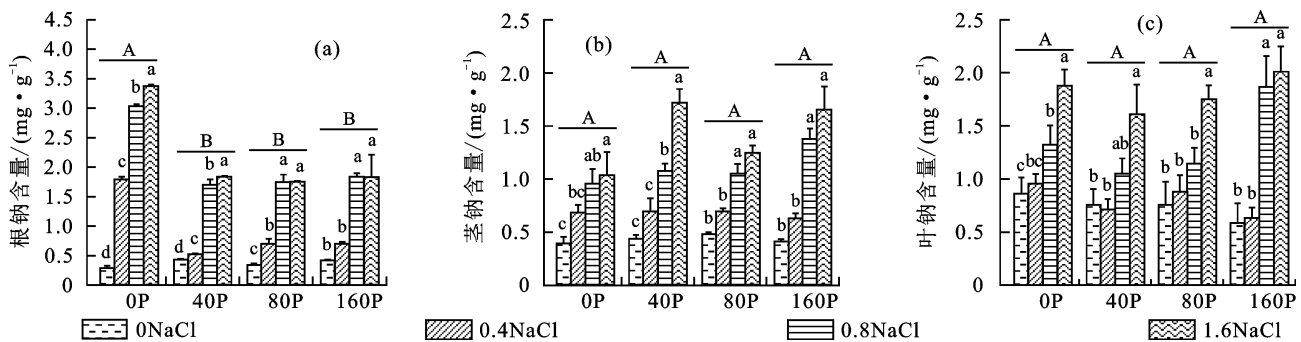


图 4 磷肥和盐分对根、茎和叶 Na 含量的影响

Fig. 4 Effects of sodium content in roots, stems and leaves under different phosphorus and salt

2.5 磷肥和盐分对 K/Na 的影响

磷肥和盐分的单独作用对紫花苜蓿的根 K/Na 均有显著影响($p \leq 0.004$)(图 5a、表 1)。

与 0P 相比,40P、80P 和 160P 处理的根 K/Na 分别上升 200%,20%和 60%。根 K/Na 在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中与 0NaCl 相比分别下降 41.5%,48.1%和 74.6%。而盐分的单独作用则对于紫花苜蓿茎 K/Na 影响显著($p < 0.001$)(图 5b、表 1)。

与 0NaCl 相比,紫花苜蓿在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中茎 K/Na 分别下降 31.1%,57.8%和 68.8%。叶 K/Na 受到盐分的显著影响($p < 0.001$)(图 5c、表 1)。

添加盐分导致叶 K/Na 显著下降,在 0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中与 0NaCl 相比分别降低 5.9%,43.9%和 60.1%,但添加磷肥对紫花苜蓿叶片 K/Na 没有显著影响。

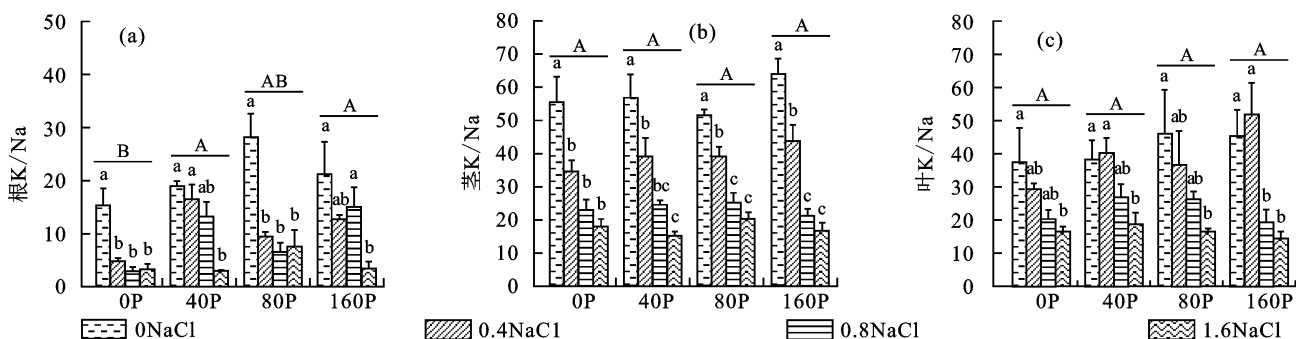


图 5 磷肥和盐分对根、茎和叶 K/Na 的影响

Fig. 5 Effects of potassium-sodium ratio of roots, stems and leaves under different phosphorus and salt

2.6 磷肥和盐分对根际和非根际土壤性质的影响

2.6.1 磷肥和盐分对根际和非根际土壤 pH 的影响

磷肥和盐分及二者交互作用对非根际土壤的 pH 均有显著影响($p<0.001$),但各处理之间根际土壤的 pH 没有显著差异,磷肥和盐分添加对根际土壤 pH 影响不显著,但交互作用对其影响显著($p=0.029$) (表 2)。非根际土壤 pH 在 6.68~8.39 变化,根际土壤 pH 在 6.02~7.76 变化(表 3)。

表 2 非根际与根际土壤性质有关参数的双因素方差分析

Table 2 Two-way ANOVA of parameters related to non-rhizosphere and rhizosphere soil properties

参数	P	NaCl	P×NaCl
非根际土壤 pH	<0.001	<0.001	<0.001
根际土壤 pH	0.843	0.162	0.029
酒石酸	<0.001	<0.001	0.148

表 3 非根际与根际土壤 pH

Table 3 pH of non-rhizosphere and rhizosphere soils

紫花苜蓿	处理	0P	40P	80P	160P
非根际土壤 pH	0NaCl	8.20±0.19c	8.03±0.01b	8.25±0.03a	7.42±0.15d
	0.4NaCl	7.48±0.04c	7.88±0.13b	8.39±0.08a	7.47±0.05c
	0.8NaCl	7.44±0.09d	7.95±0.06a	7.51±0.32f	7.02±0.21f
	1.6NaCl	7.48±0.15b	8.08±0.06a	7.11±0.04d	6.68±0.04f
根际土壤 pH	0NaCl	7.57±0.02d	7.47±0.15f	7.48±0.15c	7.56±0.14e
	0.4NaCl	7.58±0.18c	7.53±0.09c	7.47±0.12de	7.36±0.06e
	0.8NaCl	7.76±0.03b	6.87±0.52e	7.00±0.65c	7.54±0.16de
	1.6NaCl	6.02±0.87bc	7.58±0.05b	7.49±0.06c	7.22±0.26c

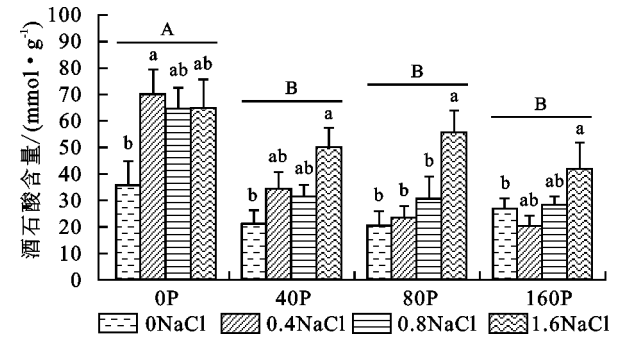


图 6 磷肥和盐分对根际酒石酸含量的影响

Fig. 6 Effects of content of rhizosphere tartaric under different phosphorus and salt

3 讨论

植物生长情况是指示植物养分和盐胁迫重要指标。本结果表明,当土壤中添加磷肥时,紫花苜蓿地上部生物量、地下部生物量、根质比及植物磷含量在大多数情况下均显著增加或升高,但是当土壤中添加盐分时减少或降低,表明在土壤中增施磷肥显著促进苜蓿的生长;低浓度的盐分对生长的抑制作用不显著,而高浓度盐分则显著抑制生长。施磷肥可以改善包括紫花苜蓿在内的大多数植物的生长状况并提高

2.6.2 磷肥和盐分对根际有机酸分泌的影响 对有机酸的分析测定发现,仅在少数样品中检测到乙酸、丙二酸、苹果酸、琥珀酸和柠檬酸,所以未对其结果进行分析。对在所有样品中均检测到的酒石酸进行分析。紫花苜蓿根际酒石酸含量受到土壤磷肥添加水平的显著影响($p<0.001$)(表 3、图 6)。

紫花苜蓿酒石酸的含量为 20.4~70.3 mmol/g, 40P、80P 和 160P 处理中的含量与 0P 相比分别减少 42.1%,44.3% 和 46.8%。此外,紫花苜蓿的酒石酸受到盐分的显著影响($p<0.001$);0.4NaCl、0.8NaCl 和 1.6NaCl 处理中的酒石酸含量与 0NaCl 相比分别升高 38.2%,46.3% 和 111.7%。磷肥和盐分的交互作用对紫花苜蓿没有显著影响。

产量^[10],盐分则通过降低光合效率,限制豆科植物的生产力,降低许多植物的生物量及植物磷含量^[14]。蒋乔峰等^[15]的研究指出,在盐害情况下,磷水平对沟叶结缕草生物量的影响不显著;相同磷肥水平下盐胁迫处理和不添加 NaCl 处理相比生物量显著减少。在盐胁迫条件下,施加磷肥明显促进玉米的生长^[16]。BERTRAND 等^[5]的研究表明,盐胁迫时,植物向地上部转移更多的干物质,根受到的抑制作用比地上部更明显,本研究结果与此相同。植物组织对于土壤增加磷的正响应在缺磷的土壤中通常很明显^[8,17],然而,由于本研究使用的土壤已施肥多年,其速效磷含量较高,可能限制植物组织对于土壤增加磷的正响应。有研究^[18]表明,随着盐分的增加,玉米的磷吸收量减少。盐胁迫对植株中磷素的影响表现出一定的规律性,植株中的磷含量随着盐分的升高而降低,而且在不同盐分水平之间存在一定的差异性,0.8NaCl 时,植物磷含量与无盐相比降低幅度低于其他处理。这之前 LOUPASSAKI 等^[19]所研究得出的盐胁迫情况下施加磷肥对橄榄的影响与盐水平有关的结论相一致。

磷肥利用效率是衡量磷肥施用是否合理的重要

指标之一,韩伟等^[20]对新疆机采棉的磷肥利用效率的研究表明,机采棉的磷肥利用效率随着磷肥施加量的变化规律与小麦、玉米和甜瓜的变化规律一致,均随着磷肥施加量的增加而降低。磷肥施用量越多,吸收利用效率越低。本研究表明,紫花苜蓿的磷肥吸收和利用效率均随着磷肥添加量的增加而降低,当磷肥添加量为 160 mg/kg 时磷肥吸收和利用效率均最低,表明磷吸收效率会随着盐分添加水平的增加而下降。这是因为随着盐分的增加,离子强度效应降低盐分下的磷酸盐活性,因此土壤中磷的有效性降低^[1]。盐分降低足够磷供应量下的磷吸收效率,这可能是由于其对磷转运蛋白的负面影响^[21]。有研究^[22]显示,氮、磷和钾配施的盐田棉花中,中高盐棉田的棉花养分农学利用效率显著高于低盐棉田。本研究中,紫花苜蓿的磷肥利用效率在 NaCl 1.6 g/kg 时显著高于对照,主要原因可能是在植株生物量和磷吸收量都减少的情况下,生物量的减少幅度低于磷吸收的减小幅度。

盐胁迫下植物获取更多的钠,但植物钠的含量可能因磷肥的施加而减少^[23]。MOHAMED 等^[24]也发现,高磷(52.5 kg/hm²)显著降低大豆茎钠含量。本研究中,紫花苜蓿根、茎和叶钠含量随磷肥添加量增加而减少,根钠含量高于茎和叶钠含量,表明土壤磷和盐分对植物磷含量的影响取决于植物组织器官,磷的施加使得植株各部分生物量显著增加,而盐分的添加梯度没有变化,对于整个植株来说对钠有稀释作用。钾参与植物的各种代谢过程,由于钠离子和钾离子都是一价阳离子,它们之间存在竞争吸收,导致钠与钾的拮抗作用,直接影响作物对钾的吸收,盐胁迫通常降低植物的钾,导致 K/Na 降低^[22]。本研究中,提高盐分显著降低紫花苜蓿的根钾含量。植物维持自身细胞的离子平衡对生长至关重要;盐胁迫造成钠的积累和钾的外流,因此植物保持高的 K/Na 对维持正常生长极其重要。在植物中,特别是在叶片中,保持较高的 K/Na 是耐盐植物的重要标志^[22]。有研究^[25]指出,在盐胁迫作用下,湖南稷子根、茎、叶等不同部位的 K/Na 显著降低。胡妮等^[26]的研究表明,在盐胁迫作用下,苋菜根和地上部 K/Na 均显著升高;陆安桥等^[25]的研究还指出,在湖南稷子叶和茎中的 K/Na 高于根系 K/Na;夏阳等^[27]研究表明,盐胁迫下水稻茎叶的 K/Na 大于根系 K/Na,说明小麦离子运输由根系向茎叶进行的过程中对钾、钠的选择性高于根系吸收的选择性。本研究结果与陆安桥等^[25]和夏阳等^[27]的研究结果一致,紫花苜蓿叶和茎中的 K/Na 也是高于根系 K/Na,这说明植物在遭受盐胁迫时可能通过离子分配使叶片及茎中的 K/Na 高于

根部的 K/Na,以此来应对盐胁迫。在本项研究中,盐分增加时,紫花苜蓿根、茎和叶中的 K/Na 均显著降低,盐分对根的胁迫作用大于茎和叶。

据报道^[28],盐分水平与土壤 pH 之间存在相关性。WANG 等^[28]的研究表明,降低非根际土壤的 pH 对植物是有益的,因为钙质土壤中 pH 的降低提高土壤磷的有效性和植物对磷的吸收。从植物根部释放的 H⁺ 会导致根际 pH 降低^[11]。与非豆科植物相比,豆科植物具有更高的根际酸化能力的原因不仅在于 H⁺ 的释放,有机酸的释放可以改变根际的 pH,促进植物养分吸收^[17]。同时,植物可以通过渗透调节产生有机酸等渗透剂将盐分的影响降到最低^[1]。植物释放的有机酸与土壤中的磷结合后,通过酸化根际土壤,提高土壤速效磷的含量和磷的吸收等^[11]。目前的研究显示,在大多数情况下,植物根际 pH 与非根际土壤 pH 在大多数处理中酸化根际土壤,降低盐胁迫。

有机酸的释放被认为是植物在受到缺磷胁迫的一种应对机制^[8]。有研究^[8-11]显示,在缺磷胁迫情况下,植物根系有机酸分泌明显增加。有机酸分泌也因为豆科植物种类不同而不同,菜豆以分泌柠檬酸为主,大豆则分泌柠檬酸和苹果酸^[29]。尽管释放更多的羧酸盐并不一定意味着根际酸性更强,但是释放羧酸盐是提高土壤中有机磷和无机磷解吸或增溶作用的一种策略,即分泌有机酸对提高土壤磷有效性有重要的积极作用^[11]。本研究结果表明,酒石酸盐是所有处理中苜蓿根系分泌的主要羧酸盐,根际酒石酸含量受土壤磷肥水平和盐分水平的显著影响。在较低的磷肥添加水平下,酒石酸盐含量更高,这与之前的研究^[11-17]结果相似。本研究发现,盐胁迫且无磷的条件下,酒石酸的含量随着盐分的添加而减少,说明盐分降低根系有机酸的浓度;而盐胁迫且有磷的条件下,酒石酸的含量随着盐分的添加而增加,表明盐胁迫和磷供应在控制有机酸代谢方面存在交互作用。在逆境环境下,植物不仅分泌有机酸,还积累有机酸,调节代谢活动和根际环境,这种反应被认为是植物自身适应环境的一种方式。胡妮等^[26]对不同品种苋菜在受到盐胁迫后根系分泌有机酸的变化研究得出,在 0.3% NaCl 胁迫条件下,多种有机酸存在于 2 个苋菜品种的根际土壤溶液、根部以及地上部,与未施加盐分处理相比,土壤溶液中的苹果酸和草酸含量显著增加,苋菜根中的乙酸和地上部的草酸含量显著增加。ABBAS 等^[30]观察到一些有机酸(包括酒石酸)的数量随着不同合欢树种盐分的增加而增加。本研究发现,在盐分含量增加时,紫花苜蓿根际酒石酸含量在

80P和160P有所增加,但是在40P处理中的酒石酸含量并不是全部随着盐分的增加而增加。所以,本研究结果不支持酒石酸盐的释放是一种耐盐机制。

本研究表明,磷肥的添加对紫花苜蓿的生长有促进作用,盐胁迫影响紫花苜蓿的生长,但是高磷条件可以一定程度地缓解盐胁迫,促进紫花苜蓿地上部、根部的生长。在磷肥施加量不足的情况下,植物通过自身调节来应对低磷胁迫,例如,分泌有机酸来增溶土壤中的磷,本研究有机酸含量随着盐胁迫程度的增加而增加,但是这对于酒石酸的释放是紫花苜蓿的一种耐盐机制的支持不足,需要进一步研究。在较低的磷肥添加量下,紫花苜蓿根际分泌的更多数量的羧酸盐。盐胁迫处理下,植株各部分受到盐分水平的影响,钠含量显著升高,但是施加磷肥可以在一定程度上减少植株对钠的吸收。盐分对紫花苜蓿根、茎、叶钾含量的影响显著,1.6NaCl的盐胁迫使植株钾含量显著低于对照。在盐胁迫的作用下K/Na显著降低,对根的胁迫作用高于茎和叶,而磷肥的添加使K/Na升高,表明施磷肥对盐胁迫有一定程度的缓解作用。

4 结论

(1)土壤磷肥与盐分对植物生长、磷素营养和耐盐性影响的交互作用是复杂的。总体而言,盐分的增加对植物生长和吸收磷产生负面影响,并加剧磷缺乏对植物生长的限制作用。

(2)在盐渍化土壤中,适量施用磷肥可以提高作物的耐盐性,提高作物生产力。紫花苜蓿根际释放酒石酸盐,但不支持酒石酸盐的释放是一种耐盐机制,根系有机酸的释放与盐和磷之间的关系还需要进一步探讨。

(3)根际是植株生长过程中非常重要的区域,所以在未来的研究中可以考虑通过对根际微生物生态系统的调节实现增产增效,从而对盐碱地进行开发利用。

参考文献:

- [1] SU R, ZHANG Z K, CHANG C, et al. Interactive effects of phosphorus fertilization and salinity on plant growth, phosphorus and sodium status, and tartrate exudation by roots of two alfalfa cultivars[J]. *Annals of Botany*, 2022, 129(1): 53-64.
- [2] XIA H Y, WANG Z G, ZHAO J H, et al. Contribution of interspecific interactions and phosphorus application to sustainable and productive intercropping systems[J]. *Field Crops Research*, 2013, 154: 53-64.
- [3] ZRIBI O T, HESSINI K, TRABELSI N, et al. *Aeluropus litoralis* maintains adequate gas exchange, pigment composition and phenolic contents under combined effects of salinity and phosphorus deficiency[J]. *Australian Journal of Botany*, 2017, 65(5): 453-462.
- [4] TANG H L, NIU L, WEI J, et al. Phosphorus limitation improved salt tolerance in maize through tissue mass density increase, osmolytes accumulation, and Na^+ uptake inhibition[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2019, 10: e856.
- [5] BERTRAND A, DHONT C, BIPFUBUSA M, et al. Improving salt stress responses of the symbiosis in alfalfa using salt-tolerant cultivar and rhizobial strain[J]. *Applied Soil Ecology*, 2015, 87: 108-117.
- [6] CUEVAS J, DALIAKOPOULOS I N, DEL MORAL F, et al. A review of soil-improving cropping systems for soil salinization[J]. *Agronomy*, 2019, 9(6): e295.
- [7] 侯贺贺,王春堂,王晓迪,等.黄河三角洲盐碱地生物措施改良效果研究[J]. *中国农村水利水电*, 2014(7): 1-6.
- [7] HOU H H, WANG C T, WANG X D, et al. A study of improvement effects by biological measures in the Yellow River Delta saline-alkali soil[J]. *China Rural Water and Hydropower*, 2014(7): 1-6.
- [8] ZHANG Z K, SU R, CHANG C, et al. Effects of oxytetracycline on plant growth, phosphorus uptake, and carboxylates in the rhizosphere of alfalfa[J]. *Plant and Soil*, 2021, 461(1): 501-515.
- [9] FERREIRA J, CORNACCHIONE M, LIU X, et al. Nutrient composition, forage parameters, and antioxidant capacity of alfalfa (*Medicago sativa* L.) in response to saline irrigation water[J]. *Agriculture*, 2015, 5(3): 577-597.
- [10] HE H H, PENG Q, WANG X, et al. Growth, morphological and physiological responses of alfalfa (*Medicago sativa*) to phosphorus supply in two alkaline soils[J]. *Plant and Soil*, 2017, 416(1): 565-584.
- [11] HE H H, WU M M, GUO L, et al. Release of tartrate as a major carboxylate by alfalfa (*Medicago sativa* L.) under phosphorus deficiency and the effect of soil nitrogen supply[J]. *Plant and Soil*, 2020, 449(1): 169-178.
- [12] SADJI-AIT KACI H, CHAKER-HADDADJ A, AID F. Enhancing of symbiotic efficiency and salinity tolerance of chickpea by phosphorus supply[J]. *Acta Agriculturae Scandinavica*, 2018, 68(6): 534-540.
- [13] 鲍士旦.土壤农化分析[M].3版.北京:中国农业出版社,2000.
- [13] BAO S D. Soil agrochemical analysis[M]. 3rd Edition. Beijing: China Agriculture Press, 2000.
- [14] 李丹竹,曾宁波,张志飞,等.渍水胁迫对不同磷水平下紫花苜蓿根系生长的影响[J]. *草地学报*, 2020, 28(6): 1563-1571.
- [14] LI D Z, ZENG N B, ZHANG Z F, et al. Effects of waterlogging stress on the root growth of alfalfa under different phosphorus level[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2020, 28(6): 1563-1571.

- [15] 蒋乔峰,陈静波,宗俊勤,等.盐胁迫下磷素对沟叶结缕草生长及 Na^+ 和 K^+ 含量的影响[J].草业学报,2013,22(3):162-168.
JIANG Q F, CHEN J B, ZONG J Q, et al. Effect of phosphorus on Na^+ and K^+ concentrations and the growth of *Zoysia matrella* under salt stress[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2013, 22(3):162-168.
- [16] 冯固,李晓林,张福锁,等.施磷和接种 AM 真菌对玉米耐盐性的影响[J].植物资源与环境学报,2000,9(2):22-26.
FENG G, LI X L, ZHANG F S, et al. Effect of phosphorus and arbuscular mycorrhizal fungus on response of maize plant to saline environment[J]. Journal of Plant Resources and Environment, 2000, 9(2):22-26.
- [17] HE H H, ZHANG Z K, SU R, et al. Amending aeolian sandy soil in the Mu Us Sandy Land of China with Pisha sandstone and increasing phosphorus supply were more effective than increasing water supply for improving plant growth and phosphorus and nitrogen nutrition of lucerne (*Medicago sativa*) [J]. Crop and Pasture Science, 2020, 71(8):e785.
- [18] 李佳霓,田秀平.盐胁迫玉米吸磷量与土壤无机磷变化相关性研究[J].土壤通报,2014,45(4):984-989.
LI J N, TIAN X P. The studies of relationship between the amount of phosphorus and inorganic phosphate in different maize varieties under salt stress[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2014, 45(4):984-989.
- [19] LOUPASSAKI M H, CHARTZOULAKIS K S, DIGALAKI N B, et al. Effects of salt stress on concentration of nitrogen, phosphorus, potassium, calcium, magnesium, and sodium in leaves, shoots, and roots of six olive cultivars[J]. Journal of Plant Nutrition, 2002, 25(11):2457-2482.
- [20] 韩伟,叶祖鹏,冯琳,等.施磷对机采棉养分吸收与磷利用效率的影响[J].中国农业科技导报,2018,20(8):91-99.
HAN W, YE Z P, FENG L, et al. Influence of phosphorus fertilization on nutrient uptake and phosphorus use efficiency of cotton under mechanical harvest cropping model [J]. Journal of Agricultural Science and Technology, 2018, 20(8):91-99.
- [21] TALBI Z O, BARHOUMI Z, KOUAS S, et al. Insights into the physiological responses of the facultative halophyte *Aeluropus litoralis* to the combined effects of salinity and phosphorus availability [J]. Journal of Plant Physiology, 2015, 189:1-10.
- [22] 辛承松,董合忠,罗振,等.黄河三角洲盐渍土棉花施用氮、磷、钾肥的效应研究[J].作物学报,2010,36(10):1698-1706.
XIN C S, DONG H Z, LUO Z, et al. Effects of N, P, and K fertilizer application on cotton grown in saline soil in Yellow River Delta [J]. Acta Agronomica Sinica, 2010, 36(10):1698-1706.
- [23] ARAB Y M, SHAHSAVANI S, AKHYANI A, et al. Pomegranate growth affected by arbuscular mycorrhizae, phosphorus fertilizer, and irrigation water salinity [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2018, 49(4):478-488.
- [24] MOHAMED H I, EL-SAYED A A, RADY M M, et al. Coupling effects of phosphorus fertilization source and rate on growth and ion accumulation of common bean under salinity stress [J]. PeerJ, 2021, 9:ee11463.
- [25] 陆安桥,张峰举,王学琴,等.盐胁迫对苗期湖南稷子 K^+ 、 Na^+ 含量与分布的影响[J].浙江农业学报,2021,33(3):396-403.
LU A Q, ZHANG F J, WANG X Q, et al. Effects of NaCl and Na_2SO_4 stress on content and distribution of K^+ and Na^+ of *Echinochloa frumentacea* seedlings [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2021, 33(3):396-403.
- [26] 胡妮,陈柯罕,李取生,等.盐胁迫下苋菜品种有机酸变化对 Cd 累积和耐盐性的影响[J].农业环境科学学报,2016,35(5):858-864.
HU N, CHEN K H, LI Q S, et al. Effects of salinity-induced organic acid variation on Cd accumulation and salinity tolerance of edible amaranth [J]. Journal of Agro-Environment Science, 2016, 35(5):858-864.
- [27] 夏阳,林杉,陶洪斌,等.不同基因型小麦对 NaCl 胁迫的反应[J].植物营养与肥料学报,2000,6(4):417-423.
XIA Y, LIN S, TAO H B, et al. Research on genotype difference of growth and mineral nutrition balance of wheat under NaCl stress [J]. Plant Nutrition and Fertilization Science, 2000, 6(4):417-423.
- [28] WANG X X, LIU S L, ZHANG S M, et al. Localized ammonium and phosphorus fertilization can improve cotton lint yield by decreasing rhizosphere soil pH and salinity [J]. Field Crops Research, 2018, 217:75-81.
- [29] 许仙菊,张永春.植物耐低磷胁迫的根系适应性机制研究进展[J].江苏农业学报,2018,34(6):1425-1429.
XU X J, ZHANG Y C. Research progress on the root adaptation mechanism of plants under low phosphorus stress [J]. Jiangsu Journal of Agricultural Sciences, 2018, 34(6):1425-1429.
- [30] ABBAS G, SAQIB M, AKHTAR J, et al. Relationship between rhizosphere acidification and phytoremediation in two acacia species [J]. Journal of Soils and Sediments, 2016, 16(4):1392-1399.