

丛枝菌根真菌对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系生理及矿质元素吸收的影响

李敖, 郑旭, 聂瑞宁, 吴承勛, 唐佳莉, 姬新颖, 张俊佩^①

(中国林业科学研究院林业研究所 林木遗传育种全国重点实验室 国家林业和草原局林木培育重点实验室, 北京 100091)

摘要: 为评估丛枝菌根真菌 (AMF) 对核桃 (*Juglans regia* Linn.) 幼苗耐盐性的促进效果, 以核桃品种 '温 185' ('Wen 185') 的盆栽苗为材料, 分别接种摩西斗管囊霉 [*Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler] 和异形根孢囊霉 [*Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler], 测定了 0、100、200、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下根系的生长指标、抗氧化酶活性、渗透调节物质含量、内源激素含量及叶片和根系中矿质元素含量。结果表明: NaCl 胁迫下, 核桃幼苗的根系生长受到抑制, 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种 2 种 AMF 均显著 ($P < 0.05$) 提高了根系体积。随着 NaCl 浓度升高, 根系抗氧化酶活性及过氧化氢 (H₂O₂) 和丙二醛 (MDA) 含量整体上显著升高; 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种摩西斗管囊霉显著提高了根系超氧化物歧化酶 (SOD) 和抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性, 接种异形根孢囊霉显著提高了根系 APX 活性, 接种 2 种 AMF 均显著降低了根系 H₂O₂ 和 MDA 含量。在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种 2 种 AMF 均显著提高了根系可溶性糖含量。各浓度 NaCl 处理下, 接种 2 种 AMF 均显著提高了根系吲哚乙酸、脱落酸、赤霉素 3 和玉米素核苷含量。随着 NaCl 浓度升高, 叶片 P、K、Ca、Mg 含量整体呈上升趋势; 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种 2 种 AMF 均降低了叶片和根系中 P 含量, 整体显著提高了根系 K 和 Ca 含量, 接种异形根孢囊霉还显著提高了叶片和根系中 Mg 含量。在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种异形根孢囊霉显著提高了根系 Fe 含量和叶片 Zn 含量, 接种摩西斗管囊霉显著提高了根系 Fe 含量。随着 NaCl 浓度升高, 未接种幼苗叶片和根系中 Na 含量整体呈上升趋势, 而 K/Na 比、Ca/Na 比和 Mg/Na 比则相反; 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种 2 种 AMF 均显著降低了根系 Na 含量, 且接种摩西斗管囊霉还显著降低了叶片 Na 含量并显著提高了叶片和根系中 K/Na 比、Ca/Na 比和 Mg/Na 比。综上所述, 摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉对核桃幼苗的耐盐性提高具有明显促进作用, 且这 2 种 AMF 的作用机制可能存在差异。

关键词: 核桃; NaCl 胁迫; 丛枝菌根真菌; 根系生理; 矿质元素

中图分类号: Q948.12⁺2.3; Q948.113; S664.1 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2024)06-0022-12
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2024.06.03

Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on root physiology and mineral element uptake of *Juglans regia* seedlings under NaCl stress LI Ao, ZHENG Xu, NIE Ruining, WU Chengxu, TANG Jiali, JI Xinying, ZHANG Junpei^① (State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding, Key Laboratory of Tree Breeding and Cultivation of the State Forestry and Grassland Administration, Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2024, 33(6): 22-33

Abstract: To evaluate the promoting effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on salt tolerance of *Juglans regia* Linn. seedlings, the potted seedlings of *J. regia* 'Wen 185' were taken as materials, the

收稿日期: 2024-06-21

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFD2200402)

作者简介: 李敖 (2000—), 男, 河南新乡人, 硕士研究生, 主要从事经济林菌根共生抗逆生物学研究。

^①通信作者 E-mail: zhangjunpei@caf.ac.cn

引用格式: 李敖, 郑旭, 聂瑞宁, 等. 丛枝菌根真菌对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系生理及矿质元素吸收的影响 [J]. 植物资源与环境学报, 2024, 33(6): 22-33.

seedlings were inoculated with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler and *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler, and the growth indexes, antioxidant enzyme activities, osmotic adjustment substance contents, and endogenous hormone contents in roots, as well as mineral element contents in leaves and roots under 0, 100, 200, and 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatments were measured. The results show that under NaCl stress, the root growth of *J. regia* seedlings is inhibited, and inoculation with two AMFs both significantly ($P < 0.05$) increase the root volume under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment. With the increase of NaCl concentration, the antioxidant enzyme activities and contents of hydrogen peroxide (H₂O₂) and malondialdehyde (MDA) in roots increase significantly in general; under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment, inoculation with *F. mosseae* significantly increases the activities of superoxide dismutase (SOD) and ascorbate peroxidase (APX) in roots, inoculation with *R. irregularis* significantly increases the APX activity in roots, and inoculation with two AMFs both significantly decrease the contents of H₂O₂ and MDA in roots. Under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment, inoculation with two AMFs both significantly increase the soluble sugar content in roots. Under each concentration of NaCl treatment, inoculation with two AMFs both significantly increase the contents of indoleacetic acid, abscisic acid, gibberellin 3, and zeatin riboside in roots. With the increase of NaCl concentration, the contents of P, K, Ca, and Mg in leaves generally show a tendency to increase; under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment, inoculation with two AMFs both decrease the P contents in leaves and roots and significantly increase the contents of K and Ca in roots in general, and inoculation with *R. irregularis* also significantly increases the Mg contents in leaves and roots. Under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment, inoculation with *R. irregularis* significantly increases the Fe content in roots and Zn content in leaves, while inoculation with *F. mosseae* significantly increases the Fe content in roots. With the increase of NaCl concentration, the Na contents in leaves and roots of non-inoculation seedlings show a tendency to increase in general, while the ratios of K/Na, Ca/Na, and Mg/Na show the opposite trends; under 300 mmol · L⁻¹ NaCl treatment, inoculation with two AMFs both significantly decrease the Na content in roots, and inoculation with *F. mosseae* also significantly decreases the Na content in leaves and significantly increases the ratios of K/Na, Ca/Na, and Mg/Na in leaves and roots. In conclusion, both *F. mosseae* and *R. irregularis* have obvious promoting effects on enhancing salt tolerance of *J. regia* seedlings, and there may be differences in the action mechanisms between the two AMFs.

Key words: *Juglans regia* Linn.; NaCl stress; arbuscular mycorrhizal fungus; root physiology; mineral element

随着全球气候变化和不合理的农业实践,土壤盐碱化成为全球农林业生产面临的严峻挑战^[1]。盐胁迫不仅影响植物对水分和养分的吸收,还可能导致离子毒害,其中 Na⁺ 积累对植物细胞的损害尤为严重^[2]。此外,高盐环境下过量的活性氧(ROS)会引起植物细胞膜脂质过氧化,从而破坏细胞的完整性和功能,最终影响植物的生理状态^[3]。

核桃(*Juglans regia* Linn.)是一种营养价值高且经济价值显著的果树,‘温 185’(‘Wen 185’)为新疆地区广泛栽培的核桃优良品种之一,对该地区的农业经济具有重要贡献^[4]。然而,新疆地区较多土壤受到盐碱化影响,区内盐碱土面积占中国盐碱土总面积的 22.01%,区内受到盐碱化危害的耕地面积占总耕地面积的 30.12%^[5]。盐胁迫对核桃的生长和发育造成了严重危害^[6]。因此,提高核桃的耐盐性具有重要的经济和生态意义。

植物根系是感知盐胁迫信号的首要器官,作为与土壤盐分直接接触的部位,根系的健康状况很大程度上决定了植物的适应性和生存能力。在逆境环境下,植物根系的抗氧化系统对缓解盐胁迫引起的氧化损伤起到至关重要的作用^[7-8]。根系不仅是植物吸收水分和养分的主要途径,也是植物与土壤微生物相互作用、感知环境变化并发起适应性响应的直接场所^[9-10]。脂质过氧化水平、ROS 积累、抗氧化酶活性、渗透调节物质变化、内源激素调控、重要营养元素稳定性都是根系适应盐胁迫的关键因子。丛枝菌根真菌(AMF)能显著提升植物的抗逆性,尤其是对盐胁迫的耐性^[11-13]。

AMF 不仅能促进植物吸收水分和营养元素,降低毒害离子的积累,还能增强植物根系的抗氧化能力,减少盐胁迫引起的细胞损伤^[14]。摩西斗管囊霉 [*Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C.

Walker et A. Schüßler] 和异形根孢囊霉 [*Rhizophagus irregularis* (Blazk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler] 是目前研究较多的 2 个优势菌种,二者在增强植物抗逆性方面均展现出一定的潜力,可以缓解镉胁迫对构 [*Broussonetia papyrifera* (Linn.) L'Hér. ex Vent.] 和盐胁迫对缬草 (*Valeriana officinalis* Linn.) 生长的影响^[15-16]。目前,关于 AMF 提高核桃抗逆性已有一定研究,例如:低磷胁迫下 AMF 可以增强土壤和根系的磷酸酶活性,从而提高核桃幼苗的磷吸收能力^[17];AMF 可以促进核桃生长并提高其耐旱性^[18]。但是,针对 AMF 提升核桃耐盐性方面的研究相对较少,作者所在课题组研究了 AMF 对黑核桃 (*Juglans nigra* Linn.) 幼苗耐盐性的影响^[19],但关于 AMF 对核桃根系生理及营养元素吸收的影响尚未见系统研究报道。因此,本研究着重分析了在 NaCl 胁迫下接种 AMF 后核桃幼苗根系生理指标及矿质元素吸收能力的变化,以全面评估盐胁迫对核桃的影响及 AMF 对提高核桃耐盐性的潜在效应,为核桃在盐碱地区的可持续生产提供理论基础和科学依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试核桃品种‘温 185’种子采自新疆林业科学院佳木实验站种质资源库。挑选大小均匀、无病虫害的种子,用体积分数 10% NaClO 溶液浸泡 10 min,随后用蒸馏水冲洗并浸泡 7 d 催芽,每天换水。供试摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉购于广西农业科学院微生物研究所,采用白车轴草 (*Trifolium repens* Linn.) 作为宿主植物进行扩繁,3 个月后收集包含孢子、菌丝、根段及培养基质在内的所有培养物,以此作为菌剂。每克菌剂的平均活性孢子数为 20 个。

以 $V(\text{草炭土}) : V(\text{珍珠岩}) : V(\text{蛭石}) = 3 : 1 : 1$ 的混合营养土为栽培基质,在 121 °C 下高压灭菌 2 h, 24 h 后再次灭菌。所有花盆(上口径 18 cm、下底径 11 cm、高 25 cm)用体积分数 75% 乙醇溶液擦拭消毒。将种子播种于装有 850 g 灭菌基质的花盆中,每盆 1 粒,菌剂均匀铺在种子下方 1 cm 处,每盆 30 g,不接菌处理则添加等量灭活的 2 种 AMF 混合菌剂作为对照。扩繁和盆栽实验菌在中国林业科学研究院科研温室完成,温室内温度 18 °C ~ 32 °C,空气相对湿

度 60% ~ 75%,透光率 50% ~ 60%。

1.2 实验设计

实验设置 4 个 NaCl 浓度梯度(分别为 0、100、200、300 mmol · L⁻¹)和 3 个 AMF 处理(分别为未接菌、接种摩西斗管囊霉、接种异形根孢囊霉),共 12 个处理,每个处理 3 个重复,每个重复 3 盆。出苗 45 d 后进行盐胁迫处理,每盆浇灌 900 mL 相应浓度的 NaCl 溶液,分 3 次浇入,每 2 d 浇 1 次,每次 300 mL。在花盆下放置托盘,收集流出的溶液并倒回花盆,以确保各盆 NaCl 溶液总量一致。以 900 mL NaCl 溶液全部浇入为胁迫第 1 天,NaCl 胁迫 30 d 后,选取幼苗根系中下部一级侧根以及地上部分中上部复叶的第 2 和第 3 枚功能叶进行生理生化指标测定。

1.3 指标测定方法

1.3.1 AMF 侵染率测定 盐胁迫前为检验根系的侵染效果,取 10 个直径 1 mm 左右的一级侧根根段,先用质量体积分数 10% KOH 溶液浸泡至透明,再用体积分数 1% HCl 溶液进行酸化,随后,参照王进^[20]的方法,采用台盼蓝染色法染色,在光学显微镜下采用网格线相交法测定 AMF 侵染率。

1.3.2 根系生长指标测定 NaCl 胁迫结束后,将根系清洗干净,用卷尺(精度 0.1 cm)测量最长一级侧根从基部到根尖的长度,即最长侧根长,随后将单株所有根系放入量筒(精度 1 mL)内采用排水法测定根系体积。使用电子天平(精度 0.001 g)称量根系鲜质量,随后于 105 °C 杀青 20 min,于 80 °C 烘 48 h,称量根系干质量。根据公式“根系含水率 = (根系鲜质量 - 根系干质量) / 根系鲜质量”计算根系含水率。

1.3.3 根系生理生化指标测定 称取 0.1 g 一级侧根样品,研磨后转移至 10 mL 离心管中,加入 5 mL 预冷的 50 mmol · L⁻¹ 磷酸盐缓冲液(PBS, pH 7.8),于 4 °C、10 000 r · min⁻¹ 离心 10 min,上清液即为酶提取液,用于测定超氧化物歧化酶^[21]、过氧化物酶^[22] 和抗坏血酸过氧化物酶^[23] 的活性及可溶性蛋白质^[24] 含量。

称取 0.1 g 一级侧根样品,加入质量体积分数 10% 三氯乙酸溶液研磨并定容至 8 mL,于 4 °C、10 000 r · min⁻¹ 离心 10 min,上清液即提取液。取提取液 2 mL,加入质量体积分数 0.5% 硫代巴比妥酸 2 mL,对照管用蒸馏水代替提取液,置沸水浴 15 min,冷却后再次离心。吸取上清液,分别在波长 532、600、450 nm 下测定吸光值,计算丙二醛和可溶性糖

含量^[25]。采用 BC3595 过氧化氢(H₂O₂)含量检测试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)测定 H₂O₂ 含量,采用 BC0295 脯氨酸(Pro)含量检测试剂盒(北京索莱宝科技有限公司)测定 Pro 含量。

1.3.4 根系内源激素含量测定 分别采用 JM-01121P1 植物生长素(IAA)ELISA 科研试剂盒、JM-01051P1 植物脱落酸(ABA)ELISA 科研试剂盒、JM-01179P1 植物赤霉素 3(GA₃)ELISA 科研试剂盒和 JM-01037P1 植物玉米素核苷(ZR)ELISA 科研试剂盒测定 IAA、ABA、GA₃ 和 ZR 含量,以上试剂盒均购自江苏晶美生物科技有限公司。

1.3.5 叶片和根系中矿质元素含量测定 将叶片和根系于 80 ℃ 烘 2 d,研磨后过 100 目筛。称取 0.1 g 样品,加入 5 mL 浓硝酸和 1 mL HClO₄ 高温消解 290 min。冷却后加入体积分数 2% HNO₃ 溶液定容至 50 mL,用滤纸过滤 2 次后待测。使用 iCAP Pro XP 电感耦合等离子体发射光谱仪(美国 Thermo Fisher 公司)测定溶液中 P、K、Ca、Mg、Fe、Mn、Cu、Zn 和 Na 的含量,并计算 K/Na 比、Ca/Na 比和 Mg/Na 比。

1.4 数据分析

使用 SPSS 25.0 软件进行统计分析。采用双因素方差分析(two-way ANOVA)检验 NaCl 和 AMF

及二者交互作用对核桃幼苗的影响;采用单因素方差分析(one-way ANOVA)检验不同处理间的差异,采用 Duncan's 法进行事后比较($P < 0.05$)。

2 结果和分析

2.1 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系生长的影响

NaCl 胁迫前,对接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉的核桃幼苗根系进行侵染率测定,侵染率分别为 50.91% 和 41.82%。AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系生长的影响见表 1。结果显示:NaCl 和 AMF 及二者交互作用对最长侧根长无显著影响。随着 NaCl 浓度升高,未接菌幼苗的最长侧根长逐渐缩短,接种 2 种 AMF 幼苗的最长侧根长变化均不显著。根系体积和根系含水率受 NaCl 和 AMF 处理的影响在 0.05、0.01 或 0.001 水平具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高,根系体积和根系含水率整体呈下降趋势;在 0、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉均显著($P < 0.05$)提高了根系体积,在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下的增幅分别为 27.15% 和 25.83%,在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下的增幅分别为 81.82% 和 35.06%。根系干质量受 NaCl 处理的影响

表 1 丛枝菌根真菌(AMF)对不同浓度 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系生长的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 1 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on root growth of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	最长侧根长/cm Length of the longest lateral root	根系体积/cm ³ Root volume	根系干质量/g Root dry mass	根系含水率 Root water content
0	NI	27.00±2.16a	37.75±3.34b	15.50±1.33ab	0.65±0.03ab
	Fm	22.83±0.62b	48.00±2.16a	17.92±1.24a	0.67±0.09a
	Ri	25.28±1.33ab	47.50±3.77a	15.11±3.49ab	0.65±0.05ab
100	NI	24.00±1.00ab	31.33±1.89bcd	12.05±2.58bcd	0.59±0.01bcd
	Fm	23.83±1.32b	37.75±4.49b	14.76±1.38abc	0.64±0.01ab
	Ri	23.43±0.80b	39.33±7.36b	13.99±2.63abcd	0.62±0.02abc
200	NI	23.30±1.40b	24.33±3.30d	9.90±2.14cde	0.56±0.01cd
	Fm	24.00±1.00ab	34.00±2.83bc	10.77±2.67bcd	0.61±0.02abc
	Ri	23.33±2.05b	30.67±0.94bcd	12.31±2.81bcd	0.61±0.02abc
300	NI	22.67±1.09b	19.25±6.50e	7.40±1.61e	0.52±0.02d
	Fm	24.00±0.82ab	35.00±3.67b	14.06±1.46abcd	0.60±0.01abc
	Ri	22.00±1.00b	26.00±3.74cd	9.05±3.72de	0.60±0.01abc
F_{NaCl}		1.959	19.890 ***	7.500 **	5.612 **
F_{AMF}		1.356	13.998 ***	1.652	3.886 *
$F_{NaCl \times AMF}$		1.839	1.386	2.067	0.403

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根孢囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

在 0.01 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高,根系干质量整体呈降低趋势;在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著提高了根系干质量,增幅为 90.00%。

2.2 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系抗氧化能力的影响

AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系抗氧化酶活性的影响见表 2。结果显示:NaCl 对根系超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)、抗坏血酸过氧化物酶(APX)活性的影响均在 0.001 水平上具有统计学意义,AMF 对根系 SOD、APX 活性的影响分别在 0.01 或 0.05 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高,根系 SOD、POD、APX 活性整体呈上升趋势。在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根胞囊霉均显著($P < 0.05$)提高了根系 SOD 活性,增幅分别为 14.02% 和 13.55%;在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著提高了根系 SOD 活性,增幅为 8.49%。2 种 AMF 处理均提高了根系 POD 活性,但在各浓度 NaCl 处理下整体差异不显著,仅在 200 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种异形根胞囊霉显著提高了根系 POD 活性,增幅为 18.90%。不同接菌处理

根系 APX 活性在 0、100、200 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下没有显著差异,在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根胞囊霉均显著提高了根系 APX 活性,增幅分别为 44.03% 和 25.27%。

AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系过氧化氢(H₂O₂)和丙二醛(MDA)含量的影响见表 2。结果显示:AMF 和 NaCl 及二者交互作用对根系 H₂O₂ 和 MDA 含量的影响均在 0.001 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高,根系 H₂O₂ 和 MDA 含量整体上显著上升。与 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理相比,100、200、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下,未接菌幼苗根系 H₂O₂ 含量分别增加了 15.18%、27.17% 和 57.31%。接种 2 种 AMF 处理均显著降低了幼苗根系 H₂O₂ 含量,在 0、100、200、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下根系 H₂O₂ 含量在接种摩西斗管囊霉后分别降低了 12.60%、15.40%、25.62%、41.01%,在接种异形根胞囊霉后分别降低了 43.12%、36.40%、32.39%、38.84%,差异均显著。在 0 和 100 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种异形根胞囊霉幼苗根系 H₂O₂ 含量显著低于接种摩西斗管囊霉幼苗。与 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理相比,在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下未接菌幼苗根系 MDA

表 2 丛枝菌根真菌(AMF)对不同浓度 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系抗氧化能力的影响($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 2 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on root antioxidant resistance of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	酶活性/(U · g ⁻¹) Enzyme activity			H ₂ O ₂ 含量/(μmol · g ⁻¹) H ₂ O ₂ content	MDA 含量/(nmol · g ⁻¹) MDA content
		SOD	POD	APX		
0	NI	85.24±4.97e	63.33±7.73f	18.21±3.12d	44.53±0.75d	8.08±0.31e
	Fm	97.19±6.33d	78.33±4.25ef	18.96±2.25d	38.92±0.30e	6.45±0.32f
	Ri	96.79±1.30d	71.67±11.61f	18.63±2.37d	25.33±0.52g	5.74±0.38f
100	NI	118.10±3.24c	92.50±9.35de	20.46±2.30d	51.29±1.71c	8.11±0.56e
	Fm	128.27±7.00bc	107.92±5.98cd	22.88±3.18d	43.39±3.68ed	7.45±0.44e
	Ri	123.42±6.03c	111.67±13.59bcd	23.21±2.10d	32.62±0.26f	7.52±0.32e
200	NI	117.23±2.18c	113.60±8.89bc	31.25±2.09bc	56.63±1.40b	14.51±0.81b
	Fm	123.07±5.04c	127.50±6.12ab	35.07±2.96bc	42.12±0.47ed	10.41±0.23d
	Ri	118.44±4.82c	135.07±5.43a	30.08±1.91bc	38.29±0.34e	10.98±0.09cd
300	NI	136.54±4.18b	133.89±4.53a	28.21±1.39c	70.05±3.80a	17.03±0.71a
	Fm	148.13±5.01a	141.67±11.61a	40.63±1.87a	41.32±5.01ed	11.58±0.20c
	Ri	137.36±5.20b	137.50±8.90a	35.34±2.41b	42.84±1.35ed	13.57±0.55b
F_{NaCl}		80.809 ***	46.513 ***	42.948 ***	47.090 ***	344.177 ***
F_{AMF}		10.805 **	2.684	3.848 *	178.075 ***	96.098 ***
$F_{NaCl \times AMF}$		0.574	0.456	1.973	11.320 ***	12.787 ***

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根胞囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszki., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. SOD: 超氧化物歧化酶 Superoxide dismutase; POD: 过氧化物酶 Peroxidase; APX: 抗坏血酸过氧化物酶 Ascorbate peroxidase; H₂O₂: 过氧化氢 Hydrogen peroxide; MDA: 丙二醛 Malondialdehyde. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

含量增加了 110.77%, 差异显著。与未接菌相比, 接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉幼苗根系 MDA 含量在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下分别降低了 20.17% 和 28.96%, 在 200 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下分别降低了 28.26% 和 24.33%, 在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下分别降低了 32.00% 和 20.32%, 差异均显著。

2.3 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系渗透调节物质的影响

AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系渗透调节物质的影响见表 3。结果显示: AMF 和 NaCl 及二者交互作用对根系脯氨酸 (Pro)、可溶性蛋白质 (SP)、可溶性糖 (SS) 含量的影响在 0.05、0.01 或 0.001 水平具

有统计学意义。在 0 和 100 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种摩西斗管囊霉显著 ($P < 0.05$) 提高了根系 Pro 含量, 增幅分别为 37.94% 和 34.23%; 在 200 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下, 接种异形根孢囊霉幼苗根系 Pro 含量提高了 49.54%, 差异显著。与未接菌相比, 接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉幼苗根系 SP 含量在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下分别提高了 71.28% 和 106.38%, 在 100 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下分别提高了 90.77% 和 102.31%, 差异均显著。此外, 在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著提高了根系 SS 含量, 在 100、200、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉均显著提高了根系 SS 含量。

表 3 丛枝菌根真菌 (AMF) 对不同浓度 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系渗透调节物质的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 3 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on root osmotic adjustment substances of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/(mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	脯氨酸含量/(μg · g ⁻¹) Proline content	可溶性蛋白质含量/(mg · g ⁻¹) Soluble protein content	可溶性糖含量/(μmol · g ⁻¹) Soluble sugar content
0	NI	24.04 ± 5.16e	0.94 ± 0.17e	47.53 ± 0.93g
	Fm	33.16 ± 4.53cd	1.61 ± 0.14cd	66.39 ± 2.88ef
	Ri	23.86 ± 1.08e	1.94 ± 0.13c	52.77 ± 1.34g
100	NI	28.95 ± 3.46de	1.30 ± 0.11d	64.33 ± 3.29f
	Fm	38.86 ± 2.24bc	2.48 ± 0.28ab	90.43 ± 0.32d
	Ri	36.40 ± 1.63bcd	2.63 ± 0.11ab	72.88 ± 3.62e
200	NI	36.84 ± 1.34bcd	2.43 ± 0.20ab	88.06 ± 0.79d
	Fm	42.72 ± 2.15b	2.32 ± 0.02b	104.42 ± 6.01c
	Ri	55.09 ± 8.58a	2.45 ± 0.15ab	68.39 ± 4.56ef
300	NI	52.98 ± 3.49a	2.73 ± 0.08a	103.17 ± 3.51c
	Fm	59.30 ± 0.45a	2.68 ± 0.16ab	135.77 ± 7.04a
	Ri	55.92 ± 5.14a	2.48 ± 0.22ab	114.29 ± 2.53b
F_{NaCl}		61.219 ***	55.118 ***	301.645 ***
F_{AMF}		9.600 **	23.477 ***	103.895 ***
$F_{NaCl \times AMF}$		3.296 *	12.836 ***	8.733 ***

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根孢囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

2.4 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系内源激素的影响

AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系内源激素的影响见表 4。结果显示: 除 NaCl 对根系吲哚乙酸 (IAA) 含量影响不显著外, AMF 和 NaCl 及二者交互作用对 IAA、脱落酸 (ABA)、赤霉素 3 (GA_3)、玉米素核苷 (ZR) 含量的影响在 0.05、0.01 或 0.001 水平具有统计学意义。并且, 在各浓度 NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉均整体上显著 ($P < 0.05$)

提高了根系的 IAA、ABA、 GA_3 、ZR 含量。

2.5 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中矿质元素的影响

2.5.1 对大量元素含量的影响 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中 P、K、Ca、Mg 含量的影响见表 5。结果显示: NaCl 对根系 K、Ca、Mg 含量及叶片 Ca、Mg 含量的影响在 0.05 或 0.01 水平上具有统计学意义, AMF 仅对叶片 P 含量的影响在 0.05 水平上具有统计学意义, 二者交互作用对叶片 P、K 含量及根

表4 丛枝菌根真菌 (AMF) 对不同 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系内源激素的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 4 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on root endogenous hormones of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	吲哚乙酸含量/ (μg · L ⁻¹) Indoleacetic acid content	脱落酸含量/ (μg · L ⁻¹) Abscisic acid content	赤霉素 3 含量/ (pg · L ⁻¹) Gibberellic acid 3 content	玉米素核苷含量/ (μg · L ⁻¹) Zeatin riboside content
0	NI	334.14±5.65d	525.26±4.80d	92.69±1.90f	10.43±0.11d
	Fm	393.55±3.79ab	648.47±11.31ab	106.45±2.37bc	11.18±0.14c
	Ri	379.51±2.84c	639.80±12.32b	107.64±1.87bc	10.68±0.21d
100	NI	318.32±2.83e	510.05±6.29d	93.93±0.40ef	9.96±0.15e
	Fm	381.78±8.92c	621.56±7.34c	109.22±1.52ab	11.82±0.14a
	Ri	397.64±1.19a	659.63±12.15a	102.90±1.61d	10.97±0.15c
200	NI	310.96±2.78e	518.97±2.94d	95.87±1.04e	10.59±0.10d
	Fm	396.86±4.31a	619.55±6.08c	110.40±1.24a	11.11±0.18c
	Ri	379.47±6.94c	635.70±10.82bc	106.34±2.40c	10.97±0.10c
300	NI	315.88±4.66e	522.40±9.53d	94.59±0.74ef	10.64±0.08d
	Fm	378.60±3.53c	649.81±11.97ab	104.98±1.26cd	11.83±0.04a
	Ri	386.56±8.46bc	643.14±12.31ab	107.06±1.06bc	11.48±0.18b
F_{NaCl}		1.868	4.214 *	4.747 *	24.026 ***
F_{AMF}		177.981 ***	748.014 ***	603.839 ***	157.527 ***
$F_{NaCl \times AMF}$		3.650 *	12.697 ***	5.074 **	11.463 ***

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根胞囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

表5 丛枝菌根真菌 (AMF) 对不同 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中大量元素含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾Table 5 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on macroelement contents in leaves and roots of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	P 含量/(g · kg ⁻¹) P content		K 含量/(g · kg ⁻¹) K content		Ca 含量/(g · kg ⁻¹) Ca content		Mg 含量/(g · kg ⁻¹) Mg content	
		叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0	NI	1.39±0.15d	2.16±0.03bc	16.37±1.24cd	7.26±0.46bc	18.17±2.07b	5.73±0.86cd	3.52±0.24b	1.46±0.08de
	Fm	1.62±0.07bcd	2.19±0.34bc	17.02±0.50bcd	6.73±0.43bc	19.26±1.05b	5.42±0.75cd	3.78±0.16b	2.21±0.05b
	Ri	1.42±0.09cd	1.94±0.02c	14.78±1.70d	7.33±0.13bc	23.10±2.50b	5.72±1.34cd	3.83±0.40b	1.30±0.17c
100	NI	1.74±0.15abc	2.26±0.06bc	19.33±2.73bc	8.73±0.07ab	20.55±2.09b	4.68±1.27d	3.81±0.19b	2.13±0.28bc
	Fm	1.58±0.09bcd	2.33±0.05bc	18.75±0.24bc	7.23±0.05bc	19.92±1.85b	5.45±0.79cd	3.74±0.20b	1.48±0.32de
	Ri	1.78±0.15ab	2.41±0.03bc	17.44±0.57bcd	8.08±0.39abc	22.85±0.45b	5.27±0.84cd	4.18±0.24b	1.60±0.23cde
200	NI	1.84±0.13ab	2.73±0.20ab	19.46±1.79bc	7.96±0.49abc	20.86±1.35b	7.00±1.35bcd	4.10±0.24b	1.97±0.08bcd
	Fm	1.79±0.29ab	2.34±0.36bc	18.21±1.74bcd	9.66±1.94a	18.95±1.57b	7.58±1.79bc	3.70±0.27b	2.55±0.19b
	Ri	1.41±0.10cd	2.36±0.10bc	19.63±1.42bc	7.63±0.27bc	22.28±1.49b	6.85±1.10bcd	4.17±0.18b	2.02±0.18bcd
300	NI	2.04±0.15a	3.14±0.32a	20.64±1.25ab	6.06±0.24c	22.13±3.85b	5.71±0.67cd	3.99±0.44b	1.61±0.32cde
	Fm	1.51±0.15bcd	2.65±0.19ab	19.86±0.45bc	8.77±1.96ab	21.83±3.00b	8.72±1.78ab	3.52±0.17b	1.98±0.51bcd
	Ri	1.49±0.13bcd	2.71±0.66ab	23.28±2.56a	7.32±0.42bc	28.47±4.97a	10.20±0.73a	4.83±0.46a	3.28±0.25a
F_{NaCl}		1.991	0.979	2.718	5.253 **	4.197 *	4.409 *	7.333 **	5.103 **
F_{AMF}		3.428 *	0.622	0.803	0.704	2.404	1.568	2.821	2.509
$F_{NaCl \times AMF}$		4.653 **	4.530 **	5.722 **	1.968	1.414	4.336 **	1.296	13.844 ***

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根胞囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

系 P、Ca、Mg 含量的影响在 0.01 或 0.001 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高,未接菌幼苗叶片

P 含量呈上升趋势,在 200 和 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种 2 种 AMF 幼苗叶片 P 含量均整体上显著

($P < 0.05$) 低于未接菌幼苗; 根系 P 含量变化趋势与叶片相似, 但与 $0 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理相比, 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种 2 种 AMF 幼苗根系 P 含量均显著升高, 而叶片 P 含量则无显著差异。随着 NaCl 浓度升高, 叶片 K 含量呈上升趋势, 根系 K 含量呈先升高后降低的趋势; 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉幼苗叶片 K 含量显著低于未接菌和接种异形根孢囊霉幼苗, 而根系 K 含量则相反。随着 NaCl 浓度升高, 未接菌幼苗叶片 Ca 和 Mg 含量基本呈上升趋势; 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种异形根孢囊霉显著提高了幼苗叶片 Ca 含量及叶片和根系 Mg 含量, 接种 2 种 AMF 显著提高了根系 Ca 含量。

2.5.2 对微量元素含量的影响 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中 Fe、Mn、Cu、Zn 含量的影响见表 6。结果显示: NaCl 对叶片 Fe、Cu、Zn 含量及根系 Fe、Mn、Cu 含量的影响在 0.05、0.01 或 0.001 水平上具有统计学意义, AMF 仅对根系 Cu、Zn 含量的影

响在 0.05 水平上具有统计学意义, 二者交互作用对叶片 Fe、Zn 含量及根系 Fe、Cu 含量的影响在 0.05 或 0.01 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高, 未接菌幼苗叶片 Fe 含量呈上升趋势, 根系 Fe 含量呈先升后降的趋势; 接种异形根孢囊霉整体上显著提高了叶片 Fe 含量, 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种 2 种 AMF 均显著提高了根系中 Fe 含量。接种 2 种 AMF 幼苗叶片和根系中 Mn 含量及叶片 Cu 含量与未接菌幼苗相比整体差异均不显著, 在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下, 接种 2 种 AMF 显著降低了根系 Cu 含量。随着 NaCl 浓度升高, 叶片 Zn 含量波动变化, 根系 Zn 含量呈下降趋势; 在 $100 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著降低了叶片 Zn 含量; 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种异形根孢囊霉显著提高了叶片 Zn 含量; 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著降低了根系 Zn 含量, 但在 $200 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著提高了根系 Zn 含量。

表 6 丛枝菌根真菌 (AMF) 对不同 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中微量元素含量的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾
Table 6 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on microelement contents in leaves and roots of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	Fe 含量/(g · kg ⁻¹) Fe content		Mn 含量/(g · kg ⁻¹) Mn content		Cu 含量/(mg · kg ⁻¹) Cu content		Zn 含量/(mg · kg ⁻¹) Zn content	
		叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0	NI	0.58±0.11b	0.16±0.02bc	0.29±0.03b	0.05±0.01b	6.30±0.46e	5.54±0.64de	61.69±6.35bc	75.83±33.01ab
	Fm	0.65±0.03b	0.21±0.01ab	0.40±0.02ab	0.07±0.02ab	7.84±1.25abcde	5.88±0.86cde	57.53±2.15bc	40.58±3.97c
	Ri	0.98±0.13a	0.23±0.09ab	0.29±0.05b	0.04±0.01b	10.60±1.84a	5.25±0.29de	64.99±4.02bc	45.78±9.38bc
100	NI	0.65±0.11b	0.28±0.01a	0.41±0.04ab	0.08±0.00a	7.22±0.53bcde	10.03±1.35a	75.20±11.05b	46.15±14.48bc
	Fm	0.54±0.01b	0.09±0.01c	0.40±0.04ab	0.07±0.00ab	7.07±0.85cde	5.64±0.24de	39.10±9.24c	44.70±15.37bc
	Ri	1.03±0.05a	0.23±0.03ab	0.37±0.03ab	0.04±0.00b	8.04±1.66abcde	5.58±1.23de	84.72±11.60b	46.71±21.06bc
200	NI	0.66±0.08b	0.29±0.06a	0.44±0.12ab	0.08±0.01a	7.11±0.34cde	6.35±0.30bcde	55.42±12.14bc	41.32±12.54c
	Fm	0.71±0.13b	0.31±0.06a	0.42±0.04ab	0.06±0.02ab	6.76±0.93de	8.40±1.02ab	73.73±4.88b	87.60±10.33a
	Ri	1.20±0.18a	0.24±0.02ab	0.39±0.06ab	0.05±0.00b	9.65±2.51abcd	4.18±0.07e	66.79±3.96bc	48.07±8.30bc
300	NI	0.96±0.18a	0.14±0.02bc	0.48±0.16a	0.07±0.02ab	8.83±0.40abcde	6.81±0.26bcd	68.08±12.33bc	33.24±1.41c
	Fm	0.69±0.06b	0.28±0.06a	0.40±0.04ab	0.06±0.01ab	10.39±1.92ab	7.87±2.12bc	61.77±26.05bc	37.86±6.33c
	Ri	1.11±0.14a	0.28±0.07a	0.39±0.01ab	0.06±0.00ab	10.19±1.76abc	5.66±0.44de	124.50±25.49a	34.20±5.20c
F_{NaCl}		19.824 ***	7.715 **	0.691	4.206 *	4.221 *	7.034 **	8.761 ***	2.125
F_{AMF}		0.127	1.493	0.226	1.270	2.254	3.774 *	0.608	4.442 *
$F_{\text{NaCl} \times \text{AMF}}$		4.159 **	2.553 *	1.908	2.475	1.653	6.063 **	4.543 **	2.240

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; Ri: 接种异形根孢囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszcz., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schüßler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{\text{NaCl} \times \text{AMF}}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

2.5.3 对 Na 含量及 K/Na 比、Ca/Na 比、Mg/Na 比的影响 AMF 对 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中 Na 含量及 K/Na 比、Ca/Na 比、Mg/Na 比的影响见表 7。结果显示: NaCl 和 AMF 及二者交互作用对叶片

和根系中 Na 含量及 K/Na 比、Ca/Na 比、Mg/Na 比的影响整体在 0.05、0.01 或 0.01 水平上具有统计学意义。随着 NaCl 浓度升高, 叶片和根系中 Na 含量整体呈上升趋势; 在 $300 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaCl 处理下接种摩

西斗管囊霉显著降低了叶片 Na 含量,在 100、200、300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉显著降低了根系 Na 含量;在 100 和 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种异形根孢囊霉显著降低了根系 Na 含量。随着 NaCl 浓度升高,未接菌幼苗叶片和根系中 K/Na 比呈下降趋势;与未接菌相比,接种摩西斗管囊霉幼苗叶片 K/Na 比在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下显著

升高,根系 K/Na 比在 0 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下显著降低,而接种异形根孢囊霉幼苗叶片和根系中 K/Na 比与未接菌幼苗相比差异均不显著。随着 NaCl 浓度升高,未接菌幼苗叶片和根系中 Ca/Na 比和 Mg/Na 比均呈下降趋势;在 300 mmol · L⁻¹ NaCl 处理下接种摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉均显著提高了根系 Ca/Na 比和 Mg/Na 比。

表 7 丛枝菌根真菌 (AMF) 对不同 NaCl 胁迫下核桃幼苗叶片和根系中 Na 含量及 K/Na 比、Ca/Na 比、Mg/Na 比的影响 ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

Table 7 Effects of arbuscular mycorrhizal fungi (AMF) on Na content and ratios of K/Na, Ca/Na, and Mg/Na in leaves and roots of *Juglans regia* Linn. seedlings under different concentrations of NaCl stress ($\bar{X} \pm SD$)¹⁾

NaCl 浓度/ (mmol · L ⁻¹) NaCl concentration	AMF 处理 AMF treatment	Na 含量/(g · kg ⁻¹) Na content		K/Na 比 K/Na ratio		Ca/Na 比 Ca/Na ratio		Mg/Na 比 Mg/Na ratio	
		叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root	叶片 Leaf	根系 Root
0	NI	0.70±0.15d	1.12±0.06f	24.56±5.12ab	6.50±0.43a	27.79±8.11ab	5.11±0.60a	5.30±1.21ab	1.31±0.07a
	Fm	0.58±0.09d	2.55±0.57e	30.06±4.78a	2.73±0.41bcd	34.35±7.61a	2.17±0.23bcd	6.73±1.40a	0.90±0.17bc
	Ri	1.12±0.32bcd	1.30±0.13f	14.61±4.78cde	5.68±0.44a	21.85±4.62bc	4.36±0.69a	3.59±0.58cd	1.00±0.04b
100	NI	1.33±0.35bc	3.26±0.14cd	15.80±4.95cde	2.68±0.13bcd	17.44±7.43bcd	1.42±0.33cd	3.15±1.09cd	0.65±0.06de
	Fm	0.97±0.05cd	2.25±0.21e	19.40±0.95bc	3.24±0.27bc	20.71±2.89bcd	2.41±0.20bc	3.87±0.37bc	0.65±0.08de
	Ri	1.15±0.26bcd	2.40±0.50e	15.98±3.64cde	3.59±1.06b	20.92±4.72bcd	2.38±0.90bc	3.85±0.99bc	0.68±0.06cde
200	NI	1.37±0.18bc	3.88±0.14bc	14.43±2.02cde	2.05±0.09cde	15.61±2.96cd	1.81±0.35bcd	3.04±0.39cd	0.51±0.02ef
	Fm	1.67±0.23b	2.88±0.45de	11.20±2.26de	3.54±1.19b	11.48±1.32cd	2.79±1.06b	2.25±0.31cd	0.91±0.20bc
	Ri	1.46±0.24bc	4.11±0.13b	13.97±3.14cde	1.86±0.12de	15.58±2.03cd	1.66±0.22bcd	2.91±0.35cd	0.49±0.03ef
300	NI	2.27±0.48a	5.43±0.09a	9.55±2.26e	1.12±0.05e	10.38±3.45d	1.05±0.11d	1.84±0.46d	0.30±0.06f
	Fm	1.13±0.06bcd	3.79±0.37bc	17.66±1.21bcd	2.39±0.80bcde	19.28±1.82cd	2.33±0.52bc	3.12±0.14cd	0.54±0.20e
	Ri	2.54±0.39a	3.84±0.25bc	9.24±0.85e	1.91±0.02de	11.31±1.87cd	2.67±0.33bc	1.93±0.26d	0.86±0.10bcd
F_{NaCl}		5.418 **	11.565 ***	5.076 **	12.280 ***	1.908	6.552 **	4.108 *	5.426 **
F_{AMF}		4.713 *	8.933 **	4.874 *	10.301 **	2.098	7.801 **	2.976	4.273 *
$F_{NaCl \times AMF}$		13.213 ***	52.269 ***	7.595 ***	18.941 ***	6.568 ***	11.045 ***	9.799 ***	19.329 ***

¹⁾ NI: 未接菌 Non-inoculation; Fm: 接种摩西斗管囊霉 Inoculation with *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schübler; Ri: 接种异形根孢囊霉 Inoculation with *Rhizophagus irregularis* (Blaszk., Wubet, Renker et Buscot) C. Walker et A. Schübler. 同列中不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($P < 0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($P < 0.05$) between different treatments. F_{NaCl} , F_{AMF} , $F_{NaCl \times AMF}$: 分别表示 NaCl、AMF 和二者交互作用的 F 值 Representing the F values for NaCl, AMF, and their interaction, respectively. *: $P < 0.05$; **: $P < 0.01$; ***: $P < 0.001$.

3 讨 论

根系是植物吸收水分和营养的主要途径,根系健康直接影响到植物的整体生理状态。本研究中,核桃幼苗根系体积、含水量及干质量普遍受到 NaCl 胁迫的负面影响,这可能是由于盐分干扰了水分吸收,增加了植物根系细胞内的渗透压,并对细胞的代谢活动产生毒性作用^[26]。AMF 可以通过扩展的菌丝网络提高植物根系体积,从而提升植物对水分和营养的吸收能力^[17]。根系形态塑性是植物对环境适应的重要方式之一,在高盐土壤中,植物的总根长可能受到影响,但最长侧根的生长得以维持,以保证水分和营养的吸收^[27]。本研究中,接种 AMF 的核桃幼苗最长侧根长与未接菌幼苗相比差异不显著,这可能是因为

AMF 的共生导致植物对养分和水分的分配策略发生变化,优先支持总根生长或根系分枝等,而不是仅支持侧根伸长生长^[28-29]。

AMF 的共生作用不仅局限于改善根系特性,还包括提高植物的总体生理和生长状况。盐分在土壤中的积累首先导致土壤渗透压增加,这是盐胁迫最初且最直接的影响。高渗透压使得植物根系更难从土壤中吸收水分,导致植物细胞失水和萎缩,从而引发生理干旱^[30]。有研究表明盐胁迫下接种 AMF 可显著提高棉花 (*Gossypium hirsutum* Linn.) 根中可溶性蛋白质 (SP) 和可溶性糖 (SS) 的含量^[14]。本研究结果显示 AMF 促进了 NaCl 胁迫下核桃幼苗根系中脯氨酸 (Pro)、SS、SP 的积累。这些物质的积累是植物适应盐胁迫环境的重要原因,能够帮助植物维持细胞内渗透平衡并稳定膜结构,从而减轻盐分对植物细胞的

直接伤害^[31]。

由于渗透胁迫和离子毒害,植物体内会产生过量的活性氧(ROS)。当植物体内 ROS 产生和清除失衡时,过量的 ROS 会导致脂质过氧化及蛋白质和 DNA 损伤,加剧细胞功能失调^[32]。过氧化氢(H_2O_2)和丙二醛(MDA)含量作为反映氧化应激程度的关键指标,主要用于评估盐胁迫对植物细胞造成的氧化损伤程度。本研究中,NaCl 胁迫下核桃幼苗根系中 H_2O_2 和 MDA 含量显著上升,接种 AMF 的幼苗根系中 H_2O_2 和 MDA 含量较低,表明 NaCl 胁迫下接种 AMF 的核桃幼苗根系受到的膜损伤程度较轻。为了中和过多的 ROS,植物已经进化出一套复杂的抗氧化酶系统,包括超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和抗坏血酸过氧化物酶(APX)等。这些酶能有效地将 ROS 转化为较为稳定且对细胞损伤较小的分子,从而保护植物免受氧化应激的伤害^[33]。有研究表明,盐胁迫下植物体内 H_2O_2 和 MDA 的含量普遍上升,抗氧化酶活性也会随之改变^[31,34]。本研究中,随着 NaCl 浓度升高,核桃幼苗根系 SOD、POD、APX 活性呈上升趋势,而接种 AMF 不同程度地提高了核桃幼苗根系的抗氧化酶活性,从而减轻盐胁迫引起的氧化损伤,这可能是接种 AMF 的幼苗根系 H_2O_2 和 MDA 含量较低的原因。AMF 能够增强抗氧化酶系统的活性,降低氧化应激程度,减少细胞膜损伤,有助于植物抵御盐胁迫^[11]。

盐胁迫下,植物通过调控内源激素水平来维持其代谢活动和生理功能的稳定,这是植物适应和抵御逆境的关键机制之一^[12,35]。吲哚乙酸(IAA)、赤霉素 3(GA_3)、玉米素核苷(ZR)是生长促进型激素。研究表明,AMF 可以通过增加 IAA、 GA_3 和 ZR 含量来促进细胞伸长、分裂和分化,增强根系发育,从而提高植物对盐胁迫的耐受性^[34-35]。本研究中,在各浓度 NaCl 处理下接种 2 种 AMF 均显著提高了核桃幼苗根系 IAA、 GA_3 、ZR 含量的结果也印证了这一点。脱落酸(ABA)作为植物响应逆境的关键信号分子,其含量的增加有助于调节气孔关闭,减少水分蒸发,增强植物对胁迫的适应性^[28,36]。本研究中,在各浓度 NaCl 处理下接种 2 种 AMF 均显著提高了核桃幼苗根系 ABA 含量,这也是接种 AMF 的核桃幼苗耐盐性得到提高的一种表现。

盐胁迫会影响植物的水分吸收能力,扰乱细胞内离子平衡,从而影响植物对营养元素的吸收,进而影

响植物的生理和代谢过程^[37]。K 不仅参与调节细胞内外的水平平衡,还能通过提高 K/Na 比来减轻盐胁迫对植物的负面影响^[30]。本研究中,接种摩西斗管囊霉显著降低了 100、200、300 $mmol \cdot L^{-1}$ NaCl 处理下核桃幼苗根系 Na 含量及 300 $mmol \cdot L^{-1}$ NaCl 处理下核桃幼苗叶片 Na 含量。此外,随着 NaCl 浓度升高,未接菌核桃幼苗叶片 K 含量持续升高,而 K/Na 比显著下降,接种摩西斗管囊霉核桃幼苗叶片 K/Na 比整体上高于未接菌幼苗,表明接种 AMF 可以缓解细胞水分失衡,提高植株耐盐性^[38]。P 是能量转移和营养物质代谢过程中不可或缺的元素,有助于植物在盐胁迫条件下维持正常的生长速率和代谢活动,但其在土壤中常以难溶性形式存在,使得植物无法直接吸收^[11,29]。有研究表明,AMF 通过菌丝网络能够扩大植物对土壤 P 的吸收范围,从而增加植物可吸收 P 的量和利用效率^[39]。本研究中,接种 AMF 对核桃幼苗叶片和根系中 P 含量没有显著影响,可能是由于 AMF 在 P 充足条件下对 P 吸收的促进作用不明显,其效应主要体现在 P 营养限制环境中^[17]。Ca 和 Mg 也在植物适应盐胁迫过程中发挥重要作用,Ca 能够稳定细胞壁和膜结构,而 Mg 是光合作用中心的组成部分,对保持叶绿体结构和功能至关重要^[40]。本研究中,不同浓度 NaCl 处理下,未接菌核桃幼苗叶片和根系中 Ca 和 Mg 含量无显著差异,在 300 $mmol \cdot L^{-1}$ NaCl 处理下接种异形根孢囊霉显著提高了叶片和根系中 Ca 和 Mg 含量,表明异形根孢囊霉可通过提高 Ca、Mg 含量来提高植物耐盐性;此外,叶片 Ca 和 Mg 含量高于根系,这可能是幼苗将营养元素向上运输,增强地上与地下部分的渗透势差,从而维持正常生理功能^[41]。随着 NaCl 浓度升高,未接菌核桃幼苗叶片和根系中 Ca/Na 比和 Mg/Na 比明显降低,这可能是由于盐胁迫下植物对 Na 的大量吸收,抑制了其 Ca 和 Mg 的吸收,造成植株体内营养失衡,从而影响植物的正常生理过程^[42]。

微量元素在植物组织和器官中的含量较低,但对植物的生长和发育起着至关重要的作用。Fe、Mn、Cu、Zn 等作为多种酶的活性中心或助催化剂,参与光合作用、呼吸作用以及植物对胁迫响应的信号转导过程^[43]。本研究中,根中微量元素含量较低,变化趋势不太稳定,且没有显著变化。盐分和微量元素之间的关系复杂,盐度可能增加、减少甚至不影响植物组织中微量元素的含量^[44]。Balliu 等^[45]的研究表明在番

茄(*Solanum lycopersicum* Linn.)幼苗中接种 AMF 可以显著提高其在盐胁迫条件下对 Mn 和 Fe 的吸收。Hashem 等^[46]对黄瓜(*Cucumis sativus* Linn.)的研究表明接种 AMF 的植株中 Fe、Mn、Cu、Zn 含量显著升高。本研究中,不同浓度 NaCl 处理下接种异形根孢囊霉不同程度地提高了核桃幼苗叶片中的 Fe、Cu、Zn 含量,表明异形根孢囊霉可通过提高这些关键营养元素的吸收,帮助植物更好地应对盐胁迫。

4 结 论

NaCl 胁迫下,AMF 可以通过多种保护机制缓解核桃幼苗受到的胁迫伤害,包括增强抗氧化酶活性、调节渗透物质和激素水平,以及提高矿质元素吸收效率来改善植物的生长和生理状态,因此,接种 AMF 是一种有效的生物调节策略,有助于提高核桃幼苗在盐胁迫环境下的生长。但是,摩西斗管囊霉和异形根孢囊霉的作用机制可能存在差异,具体情况还需进一步深入研究。

参考文献:

- [1] 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): 295.
- [2] JI X Y, TANG J L, ZHANG J P. Effects of salt stress on the morphology, growth and physiological parameters of *Juglans microcarpa* L. seedlings[J]. *Plants*, 2022, 11(18): 2381.
- [3] MUKHOPADHYAY R, SARKAR B, JAT H S, et al. Soil salinity under climate change: challenges for sustainable agriculture and food security [J]. *Journal of Environmental Management*, 2021, 280: 111736.
- [4] 王宝庆. 新疆早实核桃主要性状及分子基础研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2021: 1-3.
- [5] 王慧楠, 唐琦勇, 顾美英, 等. 新疆盐碱地区盐爪爪内生菌群落组成与分布格局研究[J]. *干旱地区农业研究*, 2023, 41(4): 257-266.
- [6] 艾尔买克·才卡斯木, 钟海霞, 张 雯, 等. EM 菌对 NaCl 胁迫下核桃幼苗生长、光合特性及抗氧化系统的影响[J]. *新疆农业科学*, 2018, 55(10): 1803-1809.
- [7] 赵 琪, 戴绍军. 蛋白质组学研究揭示的植物根盐胁迫响应机制[J]. *生态学报*, 2012, 32(1): 274-283.
- [8] 沈婉琪, 朱 炜, 曾春发, 等. 外源氰化物对毛桃幼苗根系生理及代谢的影响[J]. *果树学报*, 2022, 39(5): 752-763.
- [9] 宋佳承, 焦润安, 王 天, 等. 不同水分条件下间作牧草对油橄榄幼苗根系生理及根系形态的影响[J]. *草业科学*, 2020, 37(6): 1140-1149.
- [10] LIU R C, GAO W Q, SRIVASTAVA A K, et al. Differential effects of exogenous glomalin-related soil proteins on plant growth of trifoliate orange through regulating auxin changes[J]. *Frontiers in Plant Science*, 2021, 12: 745402.
- [11] HAN S, CHENG Y, WU G Q, et al. Enhancing salt tolerance in poplar seedlings through arbuscular mycorrhizal fungi symbiosis [J]. *Plants*, 2024, 13(2): 233.
- [12] 陈晓楠, 伊力努尔·艾力, 高文礼, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对疏叶骆驼刺幼苗生长和生理的影响[J]. *草业科学*, 2022, 39(9): 1763-1772.
- [13] 王 策, 谢宏鑫, 刘润进, 等. 丛枝菌根真菌调控根系构型与矿质元素平衡提高西瓜植株耐盐性的研究[J]. *菌物学报*, 2021, 40(10): 2800-2810.
- [14] ZHANG D J, TONG C L, WANG Q S, et al. Mycorrhizas affect physiological performance, antioxidant system, photosynthesis, endogenous hormones, and water content in cotton under salt stress [J]. *Plants*, 2024, 13(6): 805.
- [15] LIANG J W, WANG Z H, REN Y, et al. The alleviation mechanisms of cadmium toxicity in *Broussonetia papyrifera* by arbuscular mycorrhizal symbiosis varied with different levels of cadmium stress [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2023, 459: 132076.
- [16] AMANIFAR S, TOGHRANEGAR Z. The efficiency of arbuscular mycorrhiza for improving tolerance of *Valeriana officinalis* L. and enhancing valerianic acid accumulation under salinity stress [J]. *Industrial Crops and Products*, 2020, 147: 112234.
- [17] 曹明昇, 张 菲, 黄光明, 等. 丛枝菌根真菌对低磷胁迫下核桃幼苗根系磷吸收的影响及机制[J]. *林业科学*, 2023, 59(12): 117-124.
- [18] ZOU Y N, QIN Q Y, MA W Y, et al. Metabolomics reveals arbuscular mycorrhizal fungi-mediated tolerance of walnut to soil drought[J]. *BMC Plant Biology*, 2023, 23(1): 118.
- [19] LI A, WU C X, ZHENG X, et al. Physiological and biochemical responses of arbuscular mycorrhizal fungi in symbiosis with *Juglans nigra* L. seedlings to alleviate salt stress[J]. *Rhizosphere*, 2024, 31: 100928.
- [20] 王 进. 丛枝菌根真菌对核桃幼苗接种效应研究[D]. 荆州: 长江大学, 2015: 11-12.
- [21] VAN ROSSUM M W P C, ALBERDA M, VAN DER PLAS L H W. Role of oxidative damage in tulip bulb scale micropropagation [J]. *Plant Science*, 1997, 130(2): 207-216.
- [22] LUNDQUIST I, JOSEFSSON J O. Sensitive method for determination of peroxidase activity in tissue by means of coupled oxidation reaction[J]. *Analytical Biochemistry*, 1971, 41(2): 567-577.
- [23] NAKANO Y, ASADA K. Hydrogen peroxide is scavenged by ascorbate-specific peroxidase in spinach chloroplasts[J]. *Plant and Cell Physiology*, 1981, 22(5): 867-880.
- [24] BRADFORD M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle

- of protein-dye binding [J]. *Analytical Biochemistry*, 1976, 72: 248-254.
- [25] 屈 燕. 冻融及盐碱胁迫下添加青蒿素和黄腐酸钾对青稞幼苗的生理影响[D]. 长春: 吉林大学, 2022: 18-19.
- [26] 宗建伟, 黄小迪, 靳永安, 等. NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果生长及叶片解剖结构和叶绿素荧光参数的影响[J]. *植物资源与环境学报*, 2023, 32(2): 73-81.
- [27] 苏 丽, 董波涛, 孙 佳, 等. 地下水位对黄河三角洲柽柳根系生长的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(10): 3794-3804.
- [28] LIU C Y, HAO Y, WU X L, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi improve drought tolerance of tea plants via modulating root architecture and hormones [J]. *Plant Growth Regulation*, 2024, 102: 13-22.
- [29] SHAO Y D, HU X C, WU Q S, et al. Mycorrhizas promote P acquisition of tea plants through changes in root morphology and P transporter gene expression [J]. *South African Journal of Botany*, 2021, 137: 455-462.
- [30] JI X Y, TANG J L, ZHENG X, et al. The regulating mechanism of salt tolerance of black walnut seedlings was revealed by the physiological and biochemical integration analysis [J]. *Plant Physiology and Biochemistry*, 2024, 210: 108548.
- [31] 唐佳莉, 姬新颖, 郑 旭, 等. 盐胁迫下东部黑核桃生理生化与营养器官结构的动态响应[J]. *果树学报*, 2024, 41(2): 294-313.
- [32] SHAHVALI R, SHIRAN B, RAVASH R, et al. Effect of symbiosis with arbuscular mycorrhizal fungi on salt stress tolerance in GF677 (peach × almond) rootstock [J]. *Scientia Horticulturae*, 2020, 272: 109535.
- [33] SHARMA P, JHA A B, DUBEY R S, et al. Reactive oxygen species, oxidative damage, and antioxidative defense mechanism in plants under stressful conditions [J]. *Journal of Botany*, 2012, 2012: 217037.
- [34] 姬新颖, 唐佳莉, 李 敖, 等. 盐胁迫下不同基因型核桃实生幼苗生长及生理响应[J]. *林业科学*, 2024, 60(2): 65-77.
- [35] 崔令军, 刘瑜霞, 林 健, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对楨楠根系生长和激素的影响[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2020, 44(4): 119-124.
- [36] 张 敏, 蔡瑞国, 李慧芝, 等. 盐胁迫环境下不同抗盐性小麦品种幼苗长势和内源激素的变化[J]. *生态学报*, 2008, 28(1): 310-320.
- [37] 屈璐璐, 郭秀芳, 贾振宇, 等. 丛枝菌根真菌提高植物非生物逆境胁迫适应性研究进展[J]. *草学*, 2024(1): 4-9.
- [38] 孙玉芳, 宋福强, 常 伟, 等. 盐碱胁迫下 AM 真菌对沙枣苗木生长和生理的影响[J]. *林业科学*, 2016, 52(6): 18-27.
- [39] ZUCCARO A. Plant phosphate status drives host microbial preferences: a trade-off between fungi and bacteria [J]. *The EMBO Journal*, 2019, 39: e104144.
- [40] DICHALA O, THERIOS I, PAPADOPOULOS A, et al. Effects of varying concentrations of different salts on mineral composition of leaves and roots of three pomegranate (*Punica granatum* L.) cultivars [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 275: 109718.
- [41] TANG X Q, YANG X Y, LI H Y, et al. Maintenance of K⁺/Na⁺ balance in the roots of *Nitraria sibirica* Pall. in response to NaCl stress [J]. *Forests*, 2018, 9(10): 601.
- [42] 姬新颖, 唐佳莉, 李 敖, 等. NaCl 胁迫对魁核桃幼苗生理生化指标及矿质元素分布的影响[J]. *植物生理学报*, 2024, 60(6): 1016-1026.
- [43] 韩金吉, 沈小奥, 杨 帆, 等. 丛枝菌根真菌(AMF)介导植物矿质元素吸收机制的研究进展[J]. *草地学报*, 2023, 31(6): 1609-1621.
- [44] KARIMI R, EBRAHIMI M, AMERIAN M. Abscisic acid mitigates NaCl toxicity in grapevine by influencing phytochemical compounds and mineral nutrients in leaves [J]. *Scientia Horticulturae*, 2021, 288: 110336.
- [45] BALLIU A, SALLAKU G, REWALD B. AMF inoculation enhances growth and improves the nutrient uptake rates of transplanted, salt-stressed tomato seedlings [J]. *Sustainability*, 2015, 7(12): 15967-15981.
- [46] HASHEM A, AKGARAWI A A, RADHAKRISHNAN R, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi regulate the oxidative system, hormones and ionic equilibrium to trigger salt stress tolerance in *Cucumis sativus* L. [J]. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 2018, 25(6): 1102-1114.

(责任编辑: 吴芯夷)