

# 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

宗建伟, 黄小迪, 靳永安, 杨雨华<sup>①</sup>

(河南牧业经济学院艺术学院, 河南 郑州 450046)

**摘要:** 以摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler) 为供试菌, 对 0 (CK)、80、160、240 和 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下未接种组和接种组文冠果 (*Xanthoceras sorbifolium* Bunge) 根系菌根侵染率、部分生长指标及叶片解剖结构、叶绿素荧光参数和叶绿素含量进行比较, 并进行主成分分析和综合得分比较。结果表明: 随着 NaCl 浓度升高, 接种组的菌根侵染率逐渐降低; 未接种组和接种组的单株干质量、地径、株高、实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数 ( $qP$ )、最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和叶绿素含量逐渐降低, 根冠比逐渐升高, 叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值、叶片组织结构紧密度和非光化学猝灭系数 ( $NPQ$ ) 总体上先升高后降低, 叶片组织结构疏松度总体上先略降低再升高后趋于稳定, 上表皮厚度和下表皮厚度则波动变化。相同浓度 NaCl 胁迫下接种组的生长指标、多数叶片解剖结构指标、叶绿素荧光参数和叶绿素含量总体上高于未接种组。除角质层厚度和上表皮厚度外, 摩西斗管囊霉和 NaCl 单一处理对所有检测指标的影响均在 0.05、0.01 或 0.001 水平具有统计学意义, 但二者交互作用仅对叶片厚度、角质层厚度和非光化学猝灭系数的影响在 0.01 或 0.001 水平具有统计学意义。前 3 个主成分的特征值均大于 1, 累计贡献率为 91.608%。相同浓度 NaCl 胁迫下接种组的综合得分高于未接种组。研究结果显示: 摩西斗管囊霉可有效缓解 NaCl 胁迫对文冠果的伤害, 提高其耐盐性。

**关键词:** 文冠果; 摩西斗管囊霉; NaCl 胁迫; 叶片解剖结构; 叶绿素荧光参数

中图分类号: Q945.78; Q944.56; S794.9 文献标志码: A 文章编号: 1674-7895(2023)02-0073-09  
DOI: 10.3969/j.issn.1674-7895.2023.02.09

**Effect of *Funneliformis mosseae* on growth and leaf anatomical structure and chlorophyll fluorescence parameters of *Xanthoceras sorbifolium* under NaCl stress** ZONG Jianwei, HUANG Xiaodi, JIN Yong'an, YANG Yuhua<sup>①</sup> (College of Arts, Henan University of Animal Husbandry and Economy, Zhengzhou 450046, China), *J. Plant Resour. & Environ.*, 2023, 32(2): 73-81

**Abstract:** Taking *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler as test fungus, mycorrhizal infection rate of roots, some growth indexes and leaf anatomical structure, chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content in *Xanthoceras sorbifolium* Bunge in uninoculated and inoculated groups under 0 (CK), 80, 160, 240, and 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl stress were compared, and the principal component analysis and comprehensive score comparison were conducted. The results show that with the increase of NaCl concentration, the mycorrhizal infection rate of inoculated group gradually decreases; dry mass per plant, ground diameter, height, actual photochemical efficiency ( $\Phi_{PSII}$ ), photochemical quenching coefficient ( $qP$ ), maximal photochemical efficiency ( $F_v/F_m$ ), and

收稿日期: 2022-07-19

基金项目: 河南省科技攻关计划项目(192102110172); 河南省高校重点项目(19A220002); 河南省教育科学“十三五”规划一般课题([2018]-JKGHYB-0321); 河南牧业经济学院博士科研启动资金(2018HNUAHEDF018; 2018HNUAHEDF019)

作者简介: 宗建伟(1978—), 男, 河南安阳人, 博士, 讲师, 主要从事园林植物逆境生理生态研究。

<sup>①</sup>通信作者 E-mail: yzdx2003@163.com

引用格式: 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.

chlorophyll content of uninoculated and inoculated groups gradually decrease, root/shoot ratio gradually increases, leaf thickness, cuticle thickness, palisade tissue thickness, spongy tissue thickness, ratio of palisade tissue thickness to spongy tissue thickness, leaf tissue structure tense ratio, and non-photochemical quenching coefficient (*NPQ*) firstly increase and then decrease in general, leaf tissue structure loose ratio firstly slightly decrease then increase and finally tend to be stable in general, while upper epidermis thickness and lower epidermis thickness fluctuate. Under the same concentration of NaCl stress, growth indexes, most leaf anatomical structure indexes, chlorophyll fluorescence parameters, and chlorophyll content of inoculated group are greater than those of uninoculated group in general. Except cuticle thickness and upper epidermis thickness, the effects of single treatments of *F. mosseae* and NaCl on all detection indexes are statistically significant at 0.05, 0.01, or 0.001 level, but the effects of their interaction are only statistically significant at 0.01 or 0.001 level on leaf thickness, cuticle thickness, and non-photochemical quenching coefficient. The eigenvalues of the first three principal components are all greater than 1, and their cumulative contribution rate is 91.608%. Under the same concentration of NaCl stress, the comprehensive score of inoculated group is greater than that of uninoculated group. It is suggested that *F. mosseae* can effectively alleviate the damage of *X. sorbifolium* caused by NaCl stress, and increase its salt tolerance.

**Key words:** *Xanthoceras sorbifolium* Bunge; *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler; NaCl stress; leaf anatomical structure; chlorophyll fluorescence parameter

土壤盐渍化是全球性环境问题,不仅影响农业生产,而且阻碍生态恢复和可持续发展。中国盐渍土总面积约  $3.69 \times 10^7$   $\text{hm}^2$ , 占全国可利用土地面积的 4.88%<sup>[1]</sup>。相关研究表明:盐渍土壤会降低植物的光合电子传递能力,抑制植物生长发育,并对植物的叶片解剖结构造成一定的影响<sup>[2-4]</sup>。

研究发现,丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)可以有效改良土壤结构,扩大植物的根吸收面积,提高植物对水分和营养元素的吸收能力,促进植物生长,提高植物光合能力,增强植物抗逆性<sup>[5-10]</sup>。摩西斗管囊霉[*Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler],原名摩西球囊霉,是土壤中的一种常见 AMF<sup>[11]</sup>。该菌可减轻高温胁迫下杜鹃(*Rhododendron sismii* Planch.)叶片解剖结构的受损程度<sup>[12]</sup>,明显提高采煤沉陷区文冠果(*Xanthoceras sorbifolium* Bunge)的株高和地径<sup>[13]</sup>,促进盐胁迫下胡杨(*Populus euphratica* Oliv.)幼苗生长<sup>[14]</sup>,提升盐胁迫下番茄(*Solanum lycopersicum* Linn.)植株的光合碳同化能力和耐盐性<sup>[15]</sup>。

文冠果为无患子科(Sapindaceae)文冠果属(*Xanthoceras* Bunge)落叶灌木或小乔木,主要分布于中国的东北、华北和西北等地<sup>[16]</sup>。文冠果是一种中国特有的珍稀木本油料植物<sup>[17]</sup>,种仁含油率高达 59.86%,不饱和脂肪酸含量占总含油量的 82.22%~91.46%<sup>[18]</sup>。此外,文冠果根系发达,根萌蘖能力强<sup>[19]</sup>,并具有一定的耐盐能力<sup>[20-21]</sup>,是中国北方地

区防风固沙、治理荒漠和改良盐碱地的优良树种。

为了探明 AMF 对盐胁迫下文冠果的影响,以摩西斗管囊霉为供试菌,对不同浓度 NaCl 胁迫下未接种组和接种组文冠果根系菌根侵染率、部分生长指标及叶片解剖结构、叶绿素荧光参数和叶绿素含量进行比较,以期利用文冠果治理盐碱地提供实验依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

选取株高约 45 cm、地径约 3 mm 且健康的文冠果 1 年生实生苗进行实验。使用的花盆为内径 285 mm、高 385 mm 的塑料花盆,每盆装 6 kg 经 121 °C 高压湿热灭菌 2 h 的栽培基质[V(草炭土):V(椰砖):V(沙子)=2:2:1]。供试摩西斗管囊霉购于长江大学,用三叶草(*Trifolium repens* Linn.)进行扩繁并制成菌剂,每克菌剂含 20 个孢子。

### 1.2 方法

1.2.1 处理方法 于 2020 年 4 月中旬,将文冠果植株平均分成 2 组,一组为接种组,参照王颖颖等<sup>[12]</sup>的菌剂用量,每盆施入 20 g 菌剂,直接撒在根系正下方,并与根系接触;另一组为未接种组,施入等量失活菌剂。在顶部透光的大棚内进行栽培,定期进行浇水、除草、松土等管理。

于 2021 年 5 月中旬开始 NaCl 胁迫实验,共设置 5 个 NaCl 浓度水平,分别为 0(CK)、80、160、240 和

320 mmol · L<sup>-1</sup>。未接种组和接种组每个 NaCl 处理各 9 盆,每盆 1 株。实验期间,每天 18:00—19:00 采用称重法<sup>[22]</sup>补足蒸发的水分。为避免盐激反应,从设定浓度的 1/4 开始加入 NaCl 溶液进行胁迫处理,每 3 天递增 1 个浓度梯度,直至达到设定浓度。每次每盆加入 NaCl 溶液 300 mL,若有溶液渗出,将渗出液倒回盆内。待所有处理的土壤电导率达到设定浓度的土壤电导率后,开始计算胁迫时间。每个处理设 3 个重复,胁迫时间为 30 d。

1.2.2 菌根侵染率测定 实验结束后,每个处理随机选取 3 株植株的根系,采用台盼蓝染色法<sup>[23]</sup>进行染色;将根系剪成长度约 1 cm 的小段,采用石蜡切片法<sup>[24]</sup>制成封片,将封片置于 Leica DM6 B 光学显微镜(德国 Leica 公司)下观测;采用十字交叉法<sup>[25]</sup>计算菌根侵染率,计算公式为菌根侵染率=(侵染点数量/检测的总交叉点数量)×100%。

1.2.3 生长指标测定 实验结束后,每个处理随机选取 5 株植株,使用卷尺(精度 0.01 cm)测量株高(植株从地面到主茎顶端的长度),使用电子游标卡尺(精度 0.01 cm)测量地径(植株基部东西向和南北向直径的平均值),然后将每株的根、茎、叶分开,分别置于 105 °C 条件下杀青 15 min,再置于 85 °C 条件下烘干至恒质量,自然冷却后使用电子天平(精度 0.000 1 g)称量单株的根、茎、叶干质量,计算全株干质量(单株根、茎、叶干质量的总和)和根冠比(单株根干质量与单株地上部干质量的比值,其中,单株地上部干质量为单株茎和叶干质量之和)。

1.2.4 叶片解剖结构观测 实验结束后,每个处理随机选取 3 枚叶片(植株从上向下数第 3 或第 4 枚成熟的功能叶);避开主脉切取面积约 0.5 cm×0.5 cm 的叶片,用 FAA 固定液固定 24 h,并进行番红-固绿对染<sup>[26]</sup>;染色完毕后,置于 Leica DM6 B 光学显微镜下测量叶片厚度、角质层厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度和海绵组织厚度,计算栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值、叶片组织结构紧密度和叶片组织结构疏松度。其中,叶片组织结构紧密度=(栅栏组织厚度/叶片厚度)×100%;叶片组织结构疏松度=(海绵组织厚度/叶片厚度)×100%。所有指标均为 30 个视野观测数据的平均值。重复测定 3 次。

1.2.5 叶绿素荧光参数及叶绿素含量测定 实验结束后,每个处理随机选取 3 株植株,于晴朗日 9:00—11:00 选择植株从上向下数第 3 或第 4 枚成熟的功

能叶,暗适应 30 min 后,采用 Li-6800 便携式光合荧光测定仪(美国 LI-COR 公司)测定叶片的叶绿素荧光参数,包括最大光化学效率( $F_v/F_m$ )、实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )和非光化学猝灭系数( $NPQ$ )。测定时,荧光叶室面积 2 cm<sup>2</sup>,参比室 CO<sub>2</sub>浓度 400 μmol · mol<sup>-1</sup>,叶室温度 30 °C,空气相对湿度 60%,光照强度 1 000 μmol · m<sup>-2</sup> · s<sup>-1</sup><sup>[27]</sup>。重复测定 3 次。

叶绿素荧光参数测定完毕后,采集检测叶片,采用乙醇提取法<sup>[28]</sup>测定叶绿素含量。重复测定 3 次。

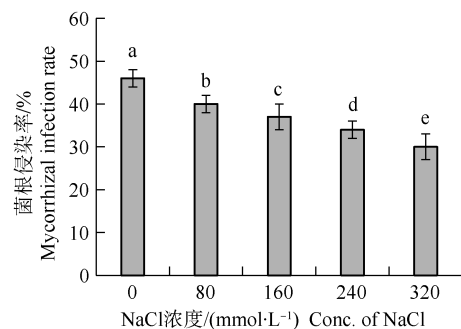
### 1.3 数据统计及分析

使用 SPSS 24.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA),并采用 Duncan's 新复极差法进行多重比较;就摩西斗管囊霉和 NaCl 单一处理及二者交互作用对各指标的影响进行双因素方差分析(two-way ANOVA);对各指标进行主成分分析,基于各处理组的主成分得分计算综合得分并排名。

## 2 结果和分析

### 2.1 不同浓度 NaCl 胁迫下文冠果根系菌根侵染率的差异

统计结果显示:在不同浓度 NaCl 胁迫下,未接种组的菌根侵染率均为 0%;接种组的菌根侵染率则随着 NaCl 浓度升高而逐渐降低,且在不同浓度 NaCl 胁迫间差异显著( $P<0.05$ )(图 1)。在 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下,接种组的菌根侵染率最低,较对照(0 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl)降低了 34.78%。



不同小写字母表示差异显著 ( $P<0.05$ ) Different lowercases indicate the significant ( $P<0.05$ ) difference.

图 1 不同浓度 NaCl 胁迫下接种组文冠果根系的菌根侵染率  
Fig. 1 Mycorrhizal infection rate of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge roots of inoculated group under different concentrations of NaCl stress

## 2.2 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果生长的影响

实验结果(表1)显示:随着 NaCl 浓度升高,未接种组和接种组的单株干质量、地径和株高均逐渐降低,而根冠比却逐渐升高,且多数指标在 80 ~ 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下与对照(0 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl)存在显著( $P < 0.05$ )差异。在相同浓度 NaCl 胁迫下,

接种组的上述 4 个生长指标均高于未接种组;其中,80 ~ 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下接种组的地径显著高于未接种组,其余指标在未接种组和接种组间的差异多不显著。接种组的单株干质量、根冠比、地径和株高较未接种组的增幅分别在 160、80、320 和 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大,增幅分别为 14.83%、23.08%、37.24%和 14.69%。

表1 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果生长的影响( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 1 Effect of *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler on growth of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under different concentrations of NaCl stress ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Conc. of NaCl	单株干质量/g Dry mass per plant		根冠比 Root/shoot ratio		地径/cm Ground diameter		株高/cm Height	
	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T
0 (CK)	35.17±1.21Aa	38.07±1.90Aa	1.05±0.15Ac	1.17±0.14Ac	5.50±0.36Aa	6.40±0.44Aa	78.50±1.77Ba	83.07±2.10Aa
80	32.33±1.36Ab	33.30±1.57Ab	1.17±0.08Bc	1.44±0.03Ab	4.67±0.21Bb	5.63±0.23Ab	73.33±2.31Aab	78.63±2.73Aa
160	26.97±0.83Bc	30.97±1.82Ab	1.52±0.09Ab	1.78±0.14Aa	4.63±0.31Bb	5.47±0.06Abc	69.97±2.91Abc	71.47±3.62Ab
240	25.40±1.08Acd	26.60±2.44Ac	1.55±0.06Bb	1.80±0.09Aa	3.90±0.26Bc	4.93±0.32Acd	66.73±3.18Ac	68.93±1.64Ab
320	24.23±0.85Ad	25.57±2.30Ac	1.76±0.12Aa	1.90±0.05Aa	3.33±0.23Bd	4.57±0.31Ad	49.90±4.29Ad	57.23±3.65Ac

<sup>1)</sup> T<sub>0</sub>: 未接种组 Uninoculated group; T: 接种组 Inoculated group. 同行中同一指标的不同大写字母表示在未接种组和接种组间差异显著( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same row of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference between uninoculated and inoculated groups; 同列中同一指标的不同小写字母表示在不同浓度 NaCl 胁迫间差异显著( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different concentrations of NaCl stress.

## 2.3 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片解剖结构的影响

实验结果(表2)表明:随着 NaCl 浓度升高,未接种组和接种组的叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值及叶片组织结构紧密度总体上先升高后降低,且均在 80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大。随着 NaCl 浓度升高,未接种组和接种组的叶片组织结构疏松度总体上先略降低再升高后趋于稳定,且在 80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最小。随着 NaCl 浓度升高,未接种组和接种组的叶片上表皮厚度和下表皮厚度均波动变化。除下表皮厚度和叶片组织结构疏松度外,其余叶片解剖结构指标在 80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下多显著( $P <$

0.05)高于其他浓度 NaCl 胁迫。在相同浓度 NaCl 胁迫下,接种组的叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值及叶片组织结构紧密度总体上高于未接种组,并且,仅叶片厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度及栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值在多数 NaCl 胁迫下显著高于未接种组。其中,接种组的叶片厚度、栅栏组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值及叶片组织结构紧密度较未接种组的增幅均在 240 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大,分别为 15.30%、27.43%、21.69%和 11.43%;接种组的叶片下表皮厚度较未接种组的增幅在 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大,达 51.27%。

表2 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片解剖结构的影响( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 2 Effect of *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler on leaf anatomical structure of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under different concentrations of NaCl stress ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Conc. of NaCl	叶片厚度/μm Leaf thickness		角质层厚度/μm Cuticle thickness		上表皮厚度/μm Upper epidermis thickness	
	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T
0 (CK)	99.52±2.88Ab	102.79±1.57Ab	1.95±0.17Ab	2.73±0.49Aa	11.19±0.53Ab	9.96±0.15Bb
80	118.14±3.91Ba	130.78±1.20Aa	2.33±0.13Aa	3.26±0.63Aa	12.28±0.45Aa	12.51±2.00Aa
160	85.30±1.77Bc	96.04±2.19Ac	1.87±0.14Abc	1.65±0.16Ab	8.68±0.05Ad	7.41±1.37Ac
240	73.84±1.75Bd	85.14±1.20Ad	1.66±0.22Abc	0.98±0.20Bb	9.09±0.31Acd	10.09±1.41Ab
320	71.27±2.10Bd	80.70±3.27Ae	1.62±0.18Ac	1.53±0.10Ab	9.37±0.17Ac	9.88±0.78Ab



续表2 Table 2 (Continued)

NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Conc. of NaCl	下表皮厚度/μm Lower epidermis thickness		栅栏组织厚度/μm Palisade tissue thickness		海绵组织厚度/μm Spongy tissue thickness	
	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T
0(CK)	10.61±0.44Aa	11.93±1.68Aa	37.78±1.66Ab	41.83±1.94Ab	38.10±1.99Ab	37.93±1.70Ab
80	9.55±0.86Bab	11.81±1.06Aab	52.24±1.24Aa	55.84±2.19Aa	43.61±1.36Aa	47.04±1.74Aa
160	7.74±1.75Ac	9.71±0.13Abc	31.29±1.00Bc	38.71±2.05Ab	35.38±1.16Ab	37.49±1.85Ab
240	8.00±0.19Bbc	10.19±1.18Aabc	26.18±1.55Bd	33.36±0.73Ac	31.71±1.00Ac	33.02±0.79Ac
320	6.30±0.29Bc	9.53±0.95Ac	26.16±2.18Bd	30.37±2.02Ac	30.73±2.03Ac	31.15±1.10Ac

NaCl 浓度/(mmol · L <sup>-1</sup> ) Conc. of NaCl	栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值 Ratio of palisade tissue thickness to spongy tissue thickness		叶片组织结构紧密度/% Leaf tissue structure tense ratio		叶片组织结构疏松度/% Leaf tissue structure loose ratio	
	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T
0(CK)	0.99±0.03Bb	1.10±0.03Aab	38.43±0.61Ab	40.67±1.27Aab	38.23±1.04Ab	36.67±1.28Aab
80	1.20±0.02Aa	1.19±0.09Aa	44.34±0.80Aa	42.66±1.29Aa	36.94±0.09Ab	35.50±1.64Aab
160	0.89±0.06Ac	1.04±0.10Ab	36.67±1.36Ab	40.02±2.88Aab	40.78±1.38Aa	39.00±1.86Aa
240	0.83±0.04Bc	1.01±0.03Ab	35.37±1.30Bb	39.33±0.32Ab	43.33±1.51Aa	38.75±1.12Bab
320	0.85±0.06Bc	0.97±0.04Ab	37.16±2.72Ab	37.67±1.63Ab	42.98±1.61Aa	39.39±1.58Ba

<sup>1)</sup> T<sub>0</sub>: 未接种组 Uninoculated group; T: 接种组 Inoculated group. 同行中同一指标的不同大写字母表示在未接种组和接种组间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same row of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference between uninoculated and inoculated groups; 同列中同一指标的不同小写字母表示在不同浓度 NaCl 胁迫间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different concentrations of NaCl stress.

### 2.4 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片叶绿素荧光参数和叶绿素含量的影响

实验结果(表 3)表明:随着 NaCl 浓度升高,未接种组和接种组的实际光化学效率 ( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数 ( $qP$ )、最大光化学效率 ( $F_v/F_m$ ) 和叶绿素含量逐渐降低,且在 80~320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下基本上显著 ( $P < 0.05$ ) 低于对照 (0 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl); 未接种组和接种组的非光化学猝灭系数 ( $NPQ$ ) 均先升高后降低,分别在 240 和 160 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下

最大,且该指标在 160~320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下显著高于对照。在相同浓度 NaCl 胁迫下,接种组的上述 4 个叶绿素荧光参数和叶绿素含量总体上均高于未接种组。其中,接种组的  $\Phi_{PSII}$  和叶绿素含量较未接种组的增幅在 0 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大,增幅分别为 18.75% 和 16.16%; 接种组的  $NPQ$ 、 $qP$  和  $F_v/F_m$  较未接种组的增幅分别在 80、240 和 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl 胁迫下最大,增幅分别为 19.30%、24.00% 和 2.63%。

表 3 不同浓度 NaCl 胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片叶绿素荧光参数和叶绿素含量的影响 ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

Table 3 Effect of *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler on chlorophyll fluorescence parameters and chlorophyll content in leaves of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under different concentrations of NaCl stress ( $\bar{X} \pm SD$ )<sup>1)</sup>

c	实际光化学效率 Actual photochemical efficiency		非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient		光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient		最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency		叶绿素含量/(mg · g <sup>-1</sup> ) Chlorophyll content	
	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T	T <sub>0</sub>	T
0(CK)	0.16±0.01Ba	0.19±0.01Aa	2.13±0.13Bd	2.48±0.10Ac	0.38±0.01Aa	0.41±0.02Aa	0.84±0.01Aa	0.85±0.01Aa	35.51±3.60Aa	41.25±1.35Aa
80	0.13±0.01Ab	0.15±0.01Ab	2.28±0.03Bcd	2.72±0.10Ab	0.35±0.01Ab	0.37±0.02Ab	0.80±0.01Ab	0.81±0.01Ab	34.37±2.22Aa	36.76±2.34Aa
160	0.12±0.01Abc	0.13±0.01Ac	2.63±0.25Ab	2.98±0.16Aa	0.31±0.02Ac	0.34±0.02Ab	0.79±0.00Abc	0.80±0.01Abc	26.66±3.71Ab	28.52±0.66Ab
240	0.11±0.02Acd	0.12±0.01Ac	3.08±0.24Aa	2.94±0.10Aa	0.25±0.01Bd	0.31±0.01Ac	0.78±0.01Acd	0.79±0.01Acd	24.80±2.21Ab	26.37±1.26Ab
320	0.10±0.01Ad	0.10±0.00Ad	2.53±0.10Bbc	2.81±0.11Aab	0.24±0.01Bd	0.29±0.01Ac	0.76±0.01Ad	0.78±0.01Ad	22.97±2.28Ab	26.19±3.02Ab

<sup>1)</sup> c: NaCl 浓度 Conc. of NaCl (mmol · L<sup>-1</sup>). T<sub>0</sub>: 未接种组 Uninoculated group; T: 接种组 Inoculated group. 同行中同一指标的不同大写字母表示在未接种组和接种组间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different uppercases in the same row of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference between uninoculated and inoculated groups; 同列中同一指标的不同小写字母表示在不同浓度 NaCl 胁迫间差异显著 ( $P < 0.05$ ) Different lowercases in the same column of the same index indicate the significant ( $P < 0.05$ ) difference among different concentrations of NaCl stress.

### 2.5 双因素方差分析

双因素方差分析结果(表 4)表明:从单一因子来

看,摩西斗管囊霉处理对文冠果的根冠比、地径、叶片厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、栅栏组织与叶片厚

度的比值、叶片组织结构疏松度、非光化学猝灭系数和光化学猝灭系数的影响在 0.001 水平具有统计学意义,对文冠果的海绵组织厚度、实际光化学效率和最大光化学效率的影响在 0.01 水平具有统计学意义,对文冠果的单株干质量、株高、叶片组织结构紧密度和叶绿素含量的影响在 0.05 水平具有统计学意义。NaCl 胁迫对文冠果供试所有指标的影响均在 0.001 水平具有统计学意义。从 2 个因子的交互作用看,对文冠果角质层厚度的影响在 0.001 水平具有统

计学意义,对文冠果的叶片厚度和非光化学猝灭系数的影响在 0.01 水平具有统计学意义。

## 2.6 主成分分析和综合得分评价

主成分分析结果(表 5)表明:前 3 个主成分的特征值均大于 1,累计贡献率达 91.608%。第 1 主成分中,地径、上表皮厚度、最大光化学效率、实际光化学效率、株高、下表皮厚度、光化学猝灭系数和单株干质量的特征向量绝对值相对较高,涵盖了文冠果生长和叶绿素荧光参数的大部分指标,说明第 1 主成分主要

表 4 NaCl 胁迫和摩西斗管囊霉处理下文冠果各指标的双因素方差分析

Table 4 Two-way ANOVA of each index of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under NaCl stress and *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler treatment

因子 <sup>1)</sup> Factor <sup>1)</sup>	各指标的 F 值 <sup>2)</sup> F value of each index <sup>2)</sup>								
	<i>m</i>	R1	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>D<sub>L</sub></i>	<i>D<sub>C</sub></i>	<i>D<sub>Ue</sub></i>	<i>D<sub>Le</sub></i>	<i>D<sub>Pt</sub></i>
A	12.22 *	32.17 ***	88.80 ***	15.16 *	121.81 ***	1.82	0.19	34.89 ***	70.43 ***
B	53.49 ***	51.32 ***	41.28 ***	74.12 ***	413.89 ***	25.43 ***	16.79 ***	11.32 ***	216.38 ***
A×B	0.98	0.68	0.42	0.97	3.62 **	8.27 ***	1.78	0.68	1.72

因子 <sup>1)</sup> Factor <sup>1)</sup>	各指标的 F 值 <sup>2)</sup> F value of each index <sup>2)</sup>								
	<i>D<sub>St</sub></i>	R2	<i>R<sub>T</sub></i>	<i>R<sub>L</sub></i>	$\Phi_{PSII}$	<i>NPQ</i>	<i>qP</i>	<i>F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub></i>	Chl
A	6.47 **	29.82 ***	8.68 *	27.56 ***	13.04 **	23.14 ***	48.09 ***	12.18 **	10.29 *
B	82.02 ***	26.86 ***	12.98 ***	12.71 ***	40.28 ***	20.80 ***	73.61 ***	55.19 ***	37.87 ***
A×B	1.29	2.68	2.37	1.98	1.16	3.74 **	1.49	0.31	0.55

<sup>1)</sup> A: 摩西斗管囊霉处理 *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler treatment; B: NaCl 胁迫 NaCl stress.

<sup>2)</sup> *m*: 单株干质量 Dry mass per plant; R1: 根冠比 Root/shoot ratio; *d*: 地径 Ground diameter; *h*: 株高 Height; *D<sub>L</sub>*: 叶片厚度 Leaf thickness; *D<sub>C</sub>*: 角质层厚度 Cuticle thickness; *D<sub>Ue</sub>*: 上表皮厚度 Upper epidermis thickness; *D<sub>Le</sub>*: 下表皮厚度 Lower epidermis thickness; *D<sub>Pt</sub>*: 栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness; *D<sub>St</sub>*: 海绵组织厚度 Spongy tissue thickness; R2: 栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值 Ratio of palisade tissue thickness to spongy tissue thickness; *R<sub>T</sub>*: 叶片组织结构紧密度 Leaf tissue structure tense ratio; *R<sub>L</sub>*: 叶片组织结构疏松度 Leaf tissue structure loose ratio;  $\Phi_{PSII}$ : 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency; *NPQ*: 非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient; *qP*: 光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient; *F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>*: 最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency; Chl: 叶绿素含量 Chlorophyll content. \*, \*\*, \*\*\*: 分别表示在 0.05、0.01 和 0.001 水平具有统计学意义 Representing the statistical significances at 0.05, 0.01, and 0.001 levels, respectively.

表 5 NaCl 胁迫和摩西斗管囊霉处理下文冠果各指标的主成分分析

Table 5 Principal component analysis on each index of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under NaCl stress and *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler treatment

主成分 Principal component	各指标的特征向量 <sup>1)</sup> Eigenvector of each index <sup>1)</sup>										
	<i>m</i>	R1	<i>d</i>	<i>h</i>	<i>D<sub>L</sub></i>	<i>D<sub>C</sub></i>	<i>D<sub>Ue</sub></i>	<i>D<sub>Le</sub></i>	<i>D<sub>Pt</sub></i>	<i>D<sub>St</sub></i>	R2
1	0.133	0.002	0.242	0.170	-0.059	-0.049	-0.205	0.164	-0.079	-0.080	-0.038
2	-0.069	0.110	-0.065	-0.066	0.182	0.084	0.183	0.030	0.209	0.177	0.207
3	0.074	-0.385	-0.183	-0.025	-0.013	0.123	0.223	-0.200	-0.028	0.029	-0.113

主成分 Principal component	各指标的特征向量 <sup>1)</sup> Eigenvector of each index <sup>1)</sup>							特征值 Eigenvalue	贡献率/% Contribution rate	累计贡献率/% Cumulative contribution rate
	<i>R<sub>T</sub></i>	<i>R<sub>L</sub></i>	$\Phi_{PSII}$	<i>NPQ</i>	<i>qP</i>	<i>F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub></i>	Chl			
1	-0.083	-0.041	0.182	0.113	0.156	0.185	0.087	12.969	72.048	72.048
2	0.238	-0.138	-0.112	0.068	-0.044	-0.133	-0.023	1.992	11.069	83.117
3	-0.100	0.143	0.043	-0.484	-0.022	0.075	0.087	1.528	8.491	91.608

<sup>1)</sup> *m*: 单株干质量 Dry mass per plant; R1: 根冠比 Root/shoot ratio; *d*: 地径 Ground diameter; *h*: 株高 Height; *D<sub>L</sub>*: 叶片厚度 Leaf thickness; *D<sub>C</sub>*: 角质层厚度 Cuticle thickness; *D<sub>Ue</sub>*: 上表皮厚度 Upper epidermis thickness; *D<sub>Le</sub>*: 下表皮厚度 Lower epidermis thickness; *D<sub>Pt</sub>*: 栅栏组织厚度 Palisade tissue thickness; *D<sub>St</sub>*: 海绵组织厚度 Spongy tissue thickness; R2: 栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值 Ratio of palisade tissue thickness to spongy tissue thickness; *R<sub>T</sub>*: 叶片组织结构紧密度 Leaf tissue structure tense ratio; *R<sub>L</sub>*: 叶片组织结构疏松度 Leaf tissue structure loose ratio;  $\Phi_{PSII}$ : 实际光化学效率 Actual photochemical efficiency; *NPQ*: 非光化学猝灭系数 Non-photochemical quenching coefficient; *qP*: 光化学猝灭系数 Photochemical quenching coefficient; *F<sub>v</sub>/F<sub>m</sub>*: 最大光化学效率 Maximal photochemical efficiency; Chl: 叶绿素含量 Chlorophyll content.

反映文冠果的生长和光能利用能力。第2主成分中,叶片组织结构紧密度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度与海绵组织厚度的比值、上表皮厚度、叶片厚度、海绵组织厚度、叶片组织结构疏松度和最大光化学效率的特征向量绝对值相对较高,涵盖了文冠果叶片解剖结构的大部分指标,说明第2主成分主要反映文冠果的叶片解剖结构特征。第3主成分中,非光化学猝灭系数和根冠比的特征向量绝对值明显高于其他指标。

由各处理的综合得分(表6)可见,相同浓度NaCl胁迫下,接种组的综合得分均高于未接种组。

表6 NaCl胁迫和摩西斗管囊霉处理下文冠果的综合得分及排名  
Table 6 Comprehensive scores and their rankings of *Xanthoceras sorbifolium* Bunge under NaCl stress and *Funneliformis mosseae* (T. H. Nicolson et Gerd.) C. Walker et A. Schüßler treatment

处理 <sup>1)</sup> Treatment <sup>1)</sup>	主成分得分 Score of principal component			综合得分 Comprehensive score	排名 Ranking
	1	2	3		
T0-T <sub>0</sub>	0.882	-0.643	1.604	70.065	2
T1-T <sub>0</sub>	-0.700	1.616	1.061	-23.576	7
T2-T <sub>0</sub>	-0.172	-0.822	0.295	-19.004	6
T3-T <sub>0</sub>	-0.565	-1.019	-0.208	-53.714	9
T4-T <sub>0</sub>	-1.683	-0.671	0.603	-123.508	10
T0-T	1.934	-0.288	0.415	139.681	1
T1-T	0.201	1.930	-0.124	34.738	3
T2-T	0.662	-0.018	-1.507	34.686	4
T3-T	0.017	-0.024	-1.242	-9.572	5
T4-T	-0.576	-0.062	-0.897	-49.798	8

<sup>1)</sup> T0: 0 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl; T1: 80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl; T2: 160 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl; T3: 240 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl; T4: 320 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl. T<sub>0</sub>: 未接种组 Uninoculated group; T: 接种组 Inoculated group.

### 3 讨论和结论

#### 3.1 NaCl胁迫对文冠果根系菌根侵染率的影响

曾婧祎等<sup>[29]</sup>发现,菌根侵染率随着盐胁迫浓度升高而降低,说明较高浓度盐胁迫会抑制丛枝菌根真菌孢子的萌发和菌丝的延伸,导致丛枝菌根真菌的侵染能力受限,进而降低丛枝菌根真菌对植物根系的侵染率。本研究中,接种组文冠果根系的菌根侵染率随着NaCl浓度升高而逐渐降低,说明高浓度的NaCl胁迫会减弱摩西斗管囊霉对文冠果根系的侵染能力。

#### 3.2 NaCl胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果生长的影响

相关研究结果表明:盐浓度过高会对植物形成生理性干旱危害,造成次生盐害,直接阻碍植物根系生

长<sup>[30]</sup>,甚至造成植株死亡<sup>[31]</sup>。丛枝菌根真菌能够促进宿主植物对N、P等营养元素的吸收,降低植物体内的Na<sup>+</sup>含量,提高植物叶片的光合作用能力,进而促进植物生根和生长发育<sup>[32]</sup>。本研究结果显示:摩西斗管囊霉可在一定程度上缓解NaCl胁迫对文冠果生长的抑制作用,但具体作用机制有待进一步深入研究。总体来看,摩西斗管囊霉可以增强文冠果的耐盐性,促进文冠果在盐胁迫环境中的生长。

#### 3.3 NaCl胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片解剖结构的影响

叶片是植物感应生境变化最敏感的器官之一,其解剖结构会根据环境变化进行相应的调整<sup>[33]</sup>。植物的栅栏组织能够高效运输水分,防止体内水分通过蒸腾作用过度损耗,细胞内大量的叶绿体还能够提高植物的光合作用水平<sup>[34]</sup>;并且,栅栏组织越发达,耐盐性越强<sup>[35]</sup>。总体来看,随着NaCl浓度升高,文冠果的叶片厚度、角质层厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值以及叶片组织结构紧密度均先升高后降低,且在80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl胁迫下最高。说明在低于80 mmol · L<sup>-1</sup> NaCl胁迫下,文冠果通过改变叶片内在结构,特别是提高栅栏组织厚度的方式来补偿NaCl胁迫对其叶片光合机构造成的损伤;但是,这种调节能力有限,当NaCl浓度超过80 mmol · L<sup>-1</sup>时,由NaCl胁迫造成的水分亏缺可能会阻碍其叶片的水分代谢,使细胞的生长和分裂受阻,限制叶片的生长发育<sup>[36-37]</sup>。在相同浓度NaCl胁迫下,接种组文冠果的叶片厚度、上表皮厚度、下表皮厚度、栅栏组织厚度、海绵组织厚度、栅栏组织厚度与海绵组织厚度的比值及叶片组织结构紧密度总体上高于未接种组,说明摩西斗管囊霉可通过改变文冠果的叶片结构来减少植株的水分散失,从而增强其耐盐性。

#### 3.4 NaCl胁迫下摩西斗管囊霉对文冠果叶片叶绿素荧光参数和叶绿素含量的影响

叶绿素荧光参数是研究植物光合作用与环境关系的内在探针,可衡量植物在不同胁迫环境下的耐受能力和光合机构受损程度<sup>[3,38-40]</sup>。随着NaCl浓度升高,文冠果叶片的实际光化学效率( $\Phi_{PSII}$ )、光化学猝灭系数( $qP$ )和最大光化学效率( $F_v/F_m$ )均逐渐降低,这可能是因为NaCl胁迫降低了文冠果叶片的光能利用率,抑制了PS II反应中心的光合电子传递效率<sup>[41]</sup>。然而,随着NaCl浓度升高,未接种组和接种



组的非光化学猝灭系数 ( $NPQ$ ) 均先升高后降低, 分别在 240 和 160  $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$   $\text{NaCl}$  胁迫下最大, 说明在一定浓度  $\text{NaCl}$  胁迫下文冠果叶片可能通过提高 PS II 反应中心非辐射热能耗散的方式来保护叶片光合机构不受损害, 但当  $\text{NaCl}$  胁迫程度继续增加后, 叶片的光合机构遭到严重损害。比较发现, 接种组的  $\Phi_{\text{PSII}}$ 、 $NPQ$ 、 $qP$  和  $F_v/F_m$  及叶绿素含量总体上高于相同浓度  $\text{NaCl}$  胁迫下的未接种组, 说明摩西斗管囊霉可提高叶绿素含量, 缓解文冠果 PS II 反应中心受到的损伤程度, 促进光合电子传递, 提高叶片的光合作用效率, 促进植株生长, 增强其耐盐性<sup>[42-43]</sup>。

叶绿素含量是反映植物光合特性的重要指标之一, 影响植物对光能的吸收、传递和转换<sup>[44]</sup>。本研究中, 接种组文冠果叶片的叶绿素含量均高于相同浓度  $\text{NaCl}$  胁迫下的未接种组, 这可能是因为摩西斗管囊霉能够通过增强植物对 P 和 Mg 的吸收、降低体内  $\text{Na}^+$  含量、刺激叶绿素合成等方式来提高叶片的光合能力<sup>[45-46]</sup>。因此, 摩西斗管囊霉可缓解  $\text{NaCl}$  胁迫对文冠果叶绿素合成的阻碍作用。

### 3.5 不同处理文冠果耐盐性的综合评价

主成分分析可以消除各指标信息重叠的干扰, 从而得到对供试植物抗逆性的有效、准确评价<sup>[47]</sup>。本研究主成分分析结果显示: 供试生长指标、叶绿素荧光参数和叶片解剖结构指标均可作为文冠果耐盐性评价的综合指标。由综合得分结果可见, 在相同浓度  $\text{NaCl}$  胁迫下, 接种组的综合得分均高于未接种组。说明接种摩西斗管囊霉可有效提升文冠果幼苗的耐盐性。

### 3.6 结论

综上所述, 摩西斗管囊霉可有效缓解  $\text{NaCl}$  胁迫对文冠果幼苗生长的抑制作用, 改变叶片解剖结构, 提高叶片光合能力, 从而有效缓解  $\text{NaCl}$  胁迫对文冠果幼苗造成的伤害, 提高植株的耐盐性。

#### 参考文献:

[1] 王佳丽, 黄贤金, 钟大洋, 等. 盐碱地可持续利用研究综述[J]. 地理学报, 2011, 66(5): 673-684.

[2] LIANG W, MA X, WAN P, et al. Plant salt-tolerance mechanism: a review [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2018, 495(1): 286-291.

[3] 郭卫珍, 张亚利, 奉树成.  $\text{NaCl}$  胁迫对 2 个山茶品种盐害及叶绿素荧光特性的影响[J]. 江苏农业学报, 2021, 37(3): 562-569.

[4] 潘莉虹, 燕丽萍, 吴德军, 等. 白蜡属树种耐盐生理变化与解剖

结构研究进展[J]. 江苏林业科技, 2021, 48(1): 49-52.

[5] PARNISKE M. Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses[J]. Nature Reviews Microbiology, 2008, 6(10): 763-775.

[6] 悦飞雪, 李继伟, 王艳芳, 等. 生物炭和 AM 真菌提高矿区土壤养分有效性的机理[J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(8): 1325-1334.

[7] 马 坤, 王彦淇, 杨建军, 等. 不同干旱胁迫条件下丛枝菌根真菌对木棉叶绿素荧光参数的影响[J]. 植物资源与环境学报, 2017, 26(3): 35-43.

[8] 马仕林, 曹鹏翔, 张金池, 等. 盐胁迫下 AMF 对榉树幼苗生长和光合特性的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(1): 122-130.

[9] 崔令军, 刘瑜霞, 林 健, 等. 丛枝菌根真菌对盐胁迫下桢楠光合生理的影响[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(1): 101-106.

[10] 刘宇乐, 姜宛彤, 苏文欣, 等. 丛枝菌根真菌调控植物耐盐碱机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2022, 50(19): 9-17.

[11] 王丹丹, 魏 蓉, 张 薇, 等. 土壤水分含量和接种摩西斗管囊霉 (*Funneliformis mosseae*) 对伯乐树幼苗生长的影响[J]. 广西植物, 2019, 39(7): 976-985.

[12] 王颖颖, 赵 冰, 李 莹. 丛枝菌根真菌对杜鹃花耐热性的影响[J]. 浙江农林大学学报, 2019, 36(4): 733-740.

[13] 胡晶晶, 毕银丽, 龚云丽, 等. 接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2018, 32(5): 341-345, 351.

[14] 再努尔·吐尔逊, 高文礼, 陈晓楠, 等. 菌根对盐胁迫下胡杨幼苗生长和叶绿素荧光特性的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2022, 50(4): 58-65.

[15] 曹 磊, 李逸雯, 凌康杰, 等. 盐渍化胁迫下接种不同丛枝菌根真菌对番茄耐盐性的影响[J]. 福建农业学报, 2022, 37(2): 188-196.

[16] 杨春俪, 许雪蓉, 张振军, 等. 文冠果芽茶与叶茶主要营养成分分析及抗氧化活性评价[J]. 食品工业科技, 2022, 43(15): 366-373.

[17] 常燕虹, 武 威, 刘建朝, 等. 干旱胁迫对文冠果树苗某些生理特征的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(1): 170-174, 203.

[18] 刘金凤, 张倩茹, 尹 蓉, 等. 文冠果油成分及加工工艺的研究进展[J]. 农产品加工, 2018(8): 69-71.

[19] ZHOU Q Y, LIU G S. The embryology of *Xanthoceras* and its phylogenetic implications [J]. Plant Systematics and Evolution, 2012, 298: 457-468.

[20] 宗建伟, 温莹莹, 杨雨华. 盐碱胁迫对文冠果叶片解剖结构的影响[J]. 东北林业大学学报, 2021, 49(9): 45-50.

[21] 张芸香, 王 林, 田 吉, 等. 盐碱胁迫对文冠果幼苗水力学特征和碳素分配的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 299-304.

[22] 刘佳宁, 李春友, 贾长荣, 等. 大果榆苗期对不同水分胁迫的生长与生理响应[J]. 西北林学院学报, 2018, 33(4): 24-



- 29, 205.
- [23] PHILLIPS J M, HAYMAN D S. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection [J]. *Transactions of the British Mycological Society*, 1970, 55(1): 158-161.
- [24] 周 仪. 植物形态解剖实验[M]. 修订版. 北京: 北京师范大学出版社, 1993: 37-68.
- [25] GIOVANNETTI M, MOSSE B. An evaluation of techniques for measuring vesicular arbuscular mycorrhizal infection in roots [J]. *New Phytologist*, 1980, 84: 489-500.
- [26] 邱彦芬, 亚华金, 杨 浩, 等. 橡胶树无性系光合特性及叶片解剖结构比较[J]. *热带农业科技*, 2021, 44(4): 1-5.
- [27] 文 静, 胡红玲, 陈 洪, 等. 巨桉幼树对镉胁迫的光合生理响应[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2022, 50(3): 30-39.
- [28] 邹 琦. 植物生理学试验指导[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 111-113.
- [29] 曾婧祎, 朱凌骏, 马仕林, 等. 盐胁迫和接种丛枝菌根真菌对榉树根系的影响[J]. *东北林业大学学报*, 2022, 50(9): 11-17.
- [30] 何凌仙子, 贾志清, 刘 涛, 等. 植物适应逆境胁迫研究进展[J]. *世界林业研究*, 2018, 31(2): 13-18.
- [31] PARIDA A K, DAS A B. Salt tolerance and salinity effects on plants: a review [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2005, 60: 324-349.
- [32] 金 樑, 陈国良, 赵 银, 等. 丛枝菌根对盐胁迫的响应及其与宿主植物的互作[J]. *生态环境*, 2007, 16(1): 228-233.
- [33] 岑湘涛, 沈 伟, 牛俊乐, 等. 基于植物叶片解剖结构的抗逆性评价研究进展[J]. *北方园艺*, 2021(18): 140-147.
- [34] 李学孚, 倪智敏, 吴月燕, 等. 盐胁迫对‘鄞红’葡萄光合特性及叶片细胞结构的影响[J]. *生态学报*, 2015, 35(13): 4436-4444.
- [35] 郭素娟, 武燕奇. 板栗叶片解剖结构特征及其与抗旱性的关系[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2018, 46(9): 51-59.
- [36] 张 德, 王双成, 张仲兴, 等. 盐胁迫对2种抗性苹果砧木叶片生理及解剖结构的影响[J]. *果树学报*, 2021, 38(8): 1275-1284.
- [37] 罗 达, 吴正保, 史彦江, 等. 盐胁迫对3种平欧杂种榛幼苗叶片解剖结构及离子吸收、运输与分配的影响[J]. *生态学报*, 2022, 42(5): 1876-1888.
- [38] ZHANG Y J, GAO H, LI Y H, et al. Effect of water stress on photosynthesis, chlorophyll fluorescence parameters and water use efficiency of common reed in the Hexi Corridor [J]. *Russian Journal of Plant Physiology*, 2019, 66: 556-563.
- [39] 赵珍妮, 童再康, 赖 江. 4种高山杜鹃容器苗对持续干旱胁迫和复水的生理响应研究[J]. *江苏林业科技*, 2021, 48(5): 13-19.
- [40] 唐 玲, 李倩中, 荣立苹, 等. 盐胁迫对鸡爪槭幼苗生长及其叶绿素荧光参数的影响[J]. *西北植物学报*, 2015, 35(10): 2050-2055.
- [41] 赵秀婷, 王延双, 段 劼, 等. 盐胁迫对红花玉兰嫁接苗生长和光合特性的影响[J]. *林业科学*, 2021, 57(4): 43-53.
- [42] 黄 志, 许炜萍, 郁昉斌, 等. 接种AMF对弱光环境及盐胁迫下甜瓜光合特性的影响[J]. *西北植物学报*, 2018, 38(2): 307-315.
- [43] 宰学明, 郝姗姗, 邵志广, 等. 摩西球囊霉对NaCl胁迫下竹柳苗叶绿素含量和荧光参数的影响[J]. *江苏农业科学*, 2013, 41(8): 175-178.
- [44] 贾婷婷, 常 伟, 范晓旭, 等. 盐胁迫下AM真菌对沙枣苗木光合与叶绿素荧光特性的影响[J]. *生态学报*, 2018, 38(4): 1337-1347.
- [45] ZAI X M, FAN J J, HAO Z P, et al. Effect of co-inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi and phosphate solubilizing fungi on nutrient uptake and photosynthesis of beach palm under salt stress environment [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11: 5761.
- [46] NAVARRO J M, PÉREZ-TORNERO O, MORTE A. Alleviation of salt stress in citrus seedlings inoculated with arbuscular mycorrhizal fungi depends on the rootstock salt tolerance [J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171: 76-85.
- [47] 王志恒, 徐中伟, 周吴艳, 等. 藜麦种子萌发阶段响应干旱和盐胁迫变化的综合评价[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2020, 28(7): 1033-1042.

(责任编辑: 佟金凤)