

盐胁迫下内生真菌对国槐幼苗生长及生理的影响

侯姣姣¹, 孙 涛², 余仲东¹, 康永祥¹, 布芳芳¹, 甘明旭¹

(1. 西北农林科技大学 林学院, 陕西 杨凌 712100; 2. 陕西南宫山旅游发展有限公司, 陕西 岚皋 725400)

摘要: 以盆栽国槐 *Sophora japonica* 幼苗为试材, 进行 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠(NaCl)胁迫处理, 采用菌液定量灌根法, 通过测定国槐苗高增长量、根冠比、干质量, 丙二醛(MDA)质量摩尔浓度, 叶绿素、脯氨酸(Pro)质量分数, 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性等生理指标, 探讨 8 株优势内生真菌分别灌根对国槐幼苗生长及生理的影响。结果表明: 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 每种菌株处理下的国槐幼苗生物量与生理变化趋势基本一致。菌株 H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根处理的国槐幼苗抗盐能力提高, 其中, 菌株 H-3 的促进作用最明显, 幼苗高增长量、干质量、根冠比和鲜质量含水量显著高于对照(ck), 分别为对照的 148%, 117%, 121%和 104%, 生理指标丙二醛质量摩尔浓度和脯氨酸质量分数为对照的 88%和 151%, 差异分别达到显著水平($P<0.05$); H-5 处理的国槐幼苗抗盐能力降低, 幼苗高增长量、干质量和根冠比显著低于对照, 分别为对照的 69%, 83%和 78%, 生理指标脯氨酸质量分数和过氧化物酶活性为对照的 81%和 72%, 差异分别达到显著水平($P<0.05$); 其他菌株处理的国槐幼苗抗盐能力不明显。综合各项指标得出, H-1, H-3, H-4 和 H-6 为促生能力优势菌, 具有应用潜力。图 6 表 1 参 22

关键词: 植物学; 内生真菌; 国槐; 幼苗生长; 盐胁迫

中图分类号: S718. 81 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2017)02-0294-07

Effect of endophytic fungi on growth and physiology of saline stressed *Sophora japonica* seedlings

HOU Jiaojiao¹, SUN Tao², YU Zhongdong¹, KANG Yongxiang¹, BU Fangfang¹, GAN Mingxu¹

(1. College of Forestry, Northwest A & F University, Yangling 712100, Shaanxi, China; 2. Shaanxi Nangong Mountain Tourism Development Co., Ltd., Langao 725400, Shaanxi, China)

Abstract: To explore salt tolerance of *Sophora japonica* with functional endophytic fungi, eight strains of fungi (H-1 through H-8) were used to inoculate *S. japonica* seedlings along with 200 mmol·L⁻¹ NaCl stress added by root-irrigation. Seedling height, root/shoot ratio, dry weight, water content, chlorophyll content, proline content, malondialdehyde (MDA) content, superoxide dismutase (SOD) and peroxidase (POD) activities were detected. Results showed that with 200 mmol·L⁻¹ NaCl stress, the changes of seedling biomass were basically the same as the tendency of physiological index varied. The H-1, H-3, H-4, and H-6 strains improved salt resistance of *S. japonica* seedlings. Strain H-3 was significantly higher than the control ($P<0.05$) for seedling height (148%), dry weight (117%), root/shoot ratio (121%), and water content (104%). Compared to the control, MDA was 88% and Pro was 151%, the difference reached significant level ($P<0.05$). Strain H-5 had the opposite affect with seedling height (69%), dry weight (83%), and root/shoot ratio (78%), which were all significantly lower than the control ($P<0.05$); also proline was 81% and POD activity was 72% of the control, and the difference reached significant level ($P<0.05$). Over all, H-1, H-3, H-4, and H-6, the dominant strains among the tested endophytes, would have great potential for application. [Ch, 6 fig, 1 tab. 22 ref.]

收稿日期: 2016-03-19; 修回日期: 2016-05-18

基金项目: 国家林业公益性行业科研专项(201404302); 西北农林科技大学重点科研专项(Z109021310)

作者简介: 侯姣姣, 从事古树名木保护相关研究。E-mail: 985755362@qq.com。通信作者: 康永祥, 教授, 博士, 从事树木学及古树名木保护技术等研究。E-mail: yxkang@nwsuaf.edu.cn

Key words: botany; endophytic fungi; *Sophora japonica*; seedling growth; salt stress

内生真菌是植物中广泛存在的一类真菌, 自 BACON 等^[1]发现了高羊茅 *Festuca arundinacea* 内生真菌与牛的中毒症状相关后, 人们便对内生真菌与宿主的共生关系展开了深入的研究, 特别是内生真菌能够提高共生植物抗逆能力这一现象受到研究者们的关注和重视。内生真菌与宿主在长期共处中可形成互利共生关系, 除直接或诱导植物抗病虫害外, 可通过影响宿主植物体内的物质代谢、产生生理活性的物质(如生长素、赤霉素以及其他活性物质), 进而改变植株的生理特性、提高植株的抗逆性和刺激植株生长^[2-4]。盐胁迫可使植物吸水困难而造成生理性干旱, 引起一系列生长及生理过程的紊乱^[5], 如植株生长受到抑制, 叶绿素降低, 丙二醛升高, 保护酶活性降低等, 植株细胞膜遭到严重破坏, 叶片黄化甚至死亡。尽管国槐 *Sophora japonica* 能忍受一定程度的盐胁迫, 但在盐胁迫下, 其生长必然受到抑制。因此, 本研究通过盆栽试验, 测定相同盐胁迫条件下不同内生真菌悬液灌根后, 国槐幼苗生长和生理指标的差异, 以此来探究不同内生真菌灌根对国槐苗适应盐胁迫的影响, 从而了解内生真菌对植物抗盐胁迫的作用, 为有效地利用内生真菌资源提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 内生真菌悬液的制备

菌株由本课题组病理实验室提供, 于 2014 年 8 月分离自周公庙古国槐(1 700 a)的健康叶片。将内生真菌(表 1)按照 H-1, H-2, H-3, H-4, H-5, H-6, H-7 和 H-8 的顺序统一编号后, 分别接种于马铃薯葡萄糖琼脂(PDA)平板培养基, 26 °C 恒温培养箱扩繁培养 7~10 d 后, 轻轻刮取菌丝、孢子, 无菌水润洗数次后, 通过 BTH-329PE 小型搅拌机搅拌打碎、震荡均匀, 并按浓度梯度稀释, 在显微镜下对菌丝片段计数, 用无菌水调节使菌丝片段悬液浓度为 5×10^3 菌落形成单位 $\cdot L^{-1}$, 制成菌剂。

1.2 供试国槐苗的培育

盆栽试验在陕西杨凌西北农林科技大学南校区日光玻璃温室中进行。国槐种子采自杨凌, 选取颗粒饱满均匀、具有光泽的国槐种子, 75 °C 热水浸泡, 自然冷却至室温后, 置于 27 °C 恒温培养箱培养 3 d, 进行催芽。

将采自杨凌的农耕土过 2 mm 筛后, $V(\text{农耕土}) : V(\text{腐殖质土}) = 1 : 1$, 121 °C 高压灭菌 2 h, 混合土有机质质量分数为 $80.12 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 全氮 $3.55 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效磷 $166.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 速效钾 $541.41 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。将催芽露白一致的国槐种子播种于盛有等体积混合土的塑料花盆中(花盆尺寸为直径 18 cm, 高 10 cm), 待幼苗生长 30 d 开始间苗, 保留壮苗 1 株 \cdot 盆⁻¹。

表 1 供试 8 株内生真菌

Table 1 8 strains of endophytic fungi for experiment

菌种编号	菌种	菌种编号	菌种
H-1	哈茨木霉 <i>Trichoderma</i> sp.	H-5	细链格孢霉 <i>Alternaria</i> sp.
H-2	离蠕孢霉 <i>Bipolaris</i> sp.	H-6	曲霉菌 <i>Aspergillus</i> sp.
H-3	丝核菌 <i>Rhizoctonia</i> sp.	H-7	拟盘多毛孢 <i>Pestalotiopsis</i> sp.
H-4	黑附球菌 <i>Epicoccum</i> sp.	H-8	镰刀菌 <i>Fusarium</i> sp.

1.3 菌悬液灌根

2015 年 4 月 24 日, 选择长势良好, 苗高基本一致的国槐苗, 并记录初始高度(mm)后, 浇灌 25 mL \cdot 盆⁻¹ 预先配制的菌株悬液, 处理设重复 10 个 \cdot 菌株⁻¹, 以浇灌等量的无菌水为对照(ck)。5 月 4 日进行第 2 次灌根处理。

1.4 盐胁迫处理

盐胁迫试验从 2015 年 5 月 8 日至 6 月 1 日共持续 24 d, 期间隔 3~4 d, 各个处理同时浇灌 200 mmol \cdot L⁻¹ 氯化钠溶液 100 mL。

1.5 各项生长指标的测定

6 月 2 日, 记录国槐苗高(mm), 并将幼苗自地径处剪断, 根部用蒸馏水洗净, 滤纸吸干表面水分,

称量地上部和根鲜质量(g), 然后分别在 105 °C 下杀青 1 h, 70 °C 烘干至恒量, 测定地上部干质量(g)和根干质量(g), 计算国槐鲜质量含水量(%)和根冠比。计算公式: 苗高增长量=处理后苗高-处理前苗高, 根冠比=根干质量/地上部干质量; 鲜质量含水量(%)= $[(W_f - W_d)/W_f] \times 100\%$, 其中 W_f 为鲜质量(g), W_d 为干质量(g)。

1.6 各项生理指标的测定

分别采集国槐幼苗相同部位的幼嫩叶片, 称取约 0.1 g, 液氮研磨后, 转移至 10 mL 离心管中, 体积分数为 95% 乙醇定容 10 mL, 离心 8 min ($4\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4 °C), 取上清液测定叶绿素质量分数^[6]。游离脯氨酸的测定采用磺基水杨酸提取法^[7]。

制备粗酶液: 称取鲜叶约 0.3 g, pH 7.8 的冷磷酸缓冲液研磨并冲洗, 转移至离心管中, 定容 8 mL, 离心 15 min ($10\ 000\ \text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 4 °C), 取上清液即为粗酶液, 4 °C 保存, 并进行生理指标测定^[7-9]: 超氧化物歧化酶(SOD)活性测定采用氮蓝四唑(NBT)光还原法; 过氧化物酶(POD)活性测定采用愈创木酚法; 丙二醛(MDA)质量摩尔浓度测定采用硫代巴比妥酸(TBA)法。

1.7 统计分析

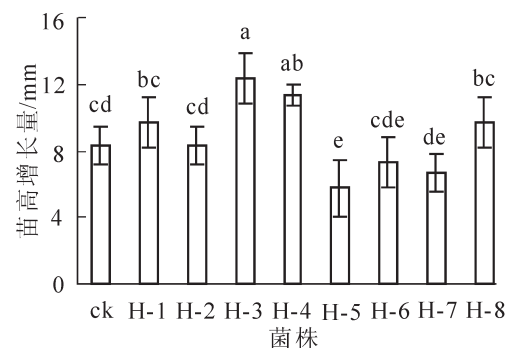
运用 Excel 2003 和 SPSS 22 软件进行数据处理和统计分析, Duncan 法进行多重比较, 判断差异显著性。

2 结果与分析

2.1 不同菌悬液灌根处理对国槐幼苗生长的影响

2.1.1 苗高增长量 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 8 株不同内生真菌悬液灌根处理对国槐苗高产生不同程度的影响(图 1)。菌株 H-3 和 H-4 处理的幼苗生长最快, 苗高增量分别为对照(ck)的 148% 和 136%, 显著高于对照($P < 0.05$), 表明菌株 H-3 和 H-4 灌根可减弱盐胁迫对国槐幼苗的影响; 菌株 H-5 和 H-7 灌根处理的苗高增量分别为对照的 69% 和 80%, 显著低于对照($P < 0.05$), 表明菌株 H-5 和 H-7 灌根减弱了国槐幼苗的抗盐生长; 其他菌株处理对国槐幼苗的抗盐生长作用不明显。

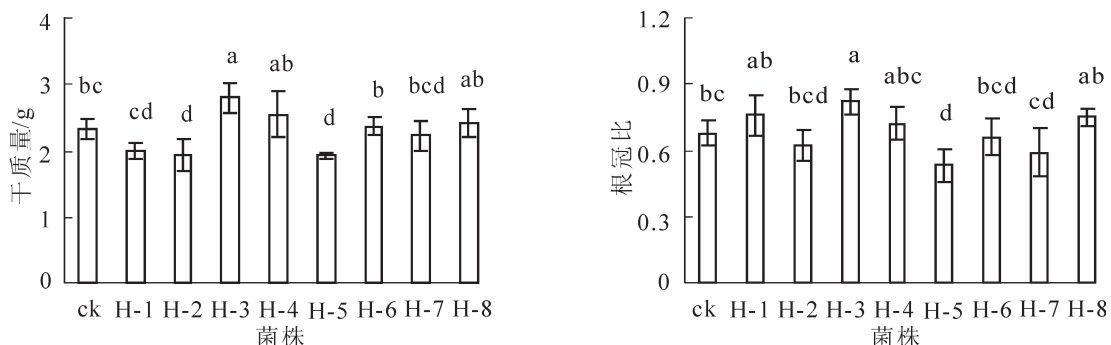
2.1.2 干质量和根冠比 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 内生真菌 H-3 灌根处理的幼苗干质量和根冠比均显著高于对照($P < 0.05$, 图 2), 分别为对照的 117% 和 121%, 表明 H-3 灌根促进了国槐幼苗干物质的积累, 同时将更多的能量分配于根部, 增大根冠比, 提高了国槐苗对盐胁迫的适应性; 而 H-5 处理的幼苗干重和根冠比均显著低于对照($P < 0.05$, 图 2), 分别为对照的 83% 和 78%, 表明 H-5 灌根抑制了幼苗生物量的积累, 同时降低根冠比, 减弱了国槐苗的抗盐性。



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 1 不同菌株灌根处理对国槐苗高增长量的影响

Figure 1 Effect of the different endophytic fungi on the growth rate of *Sophora japonica*



不同小写字母表示差异显著($P < 0.05$)。

图 2 不同菌株灌根处理对国槐幼苗干质量和根冠比的影响

Figure 2 Effect of the different endophytic fungi on the dry weight and root shoot ratio of *Sophora japonica*

2.1.3 鲜质量含水量 含水量的大小, 可说明植物的生理活动是否旺盛。200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 8 株内生真菌灌根处理对国槐地上部分鲜质量含水量的影响不明显, 但对地下部分鲜质量含水量的影响显著($P < 0.05$, 图 3)。H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根处理的幼苗地下部分鲜质量含水量均显著高于对照($P < 0.05$), 分别为对照的 111%, 104%, 104% 和 106%, 其他菌株处理与对照比较均无显著差异, 表明菌株 H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根可减少国槐幼苗水分的散失或增加根系对水分的吸收, 缓解了国槐在盐环境的生理干旱, 从而增强国槐的耐受性。

2.2 不同菌悬液灌根处理对国槐幼苗叶绿素质量分数的影响

叶绿素(Chl)是植物光合作用最主要的色素, 影响植物的光合速率, 且其质量分数与叶色呈正相关, 能大致反映出植物的营养状况^[10]。200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 8 株内生真菌灌根处理对国槐苗叶绿素质量分数的影响差异明显(图 4): 菌株 H-1, H-4 和 H-6 灌根处理的国槐叶绿素质量分数均显著高于对照($P < 0.05$), 分别为 3.86, 3.99 和 4.03 mg·g⁻¹; 而 H-5 和 H-7 灌根处理的叶绿素质量分数显著低于对照, 其他菌株处理与对照无明显差异($P < 0.05$)。8 株内生真菌灌根处理对国槐苗的叶绿素 a/b 比值的作用效果不明显。内生真菌可能通过提高或降低国槐幼苗的叶绿素质量分数, 来增强或降低国槐幼苗的光合作用。

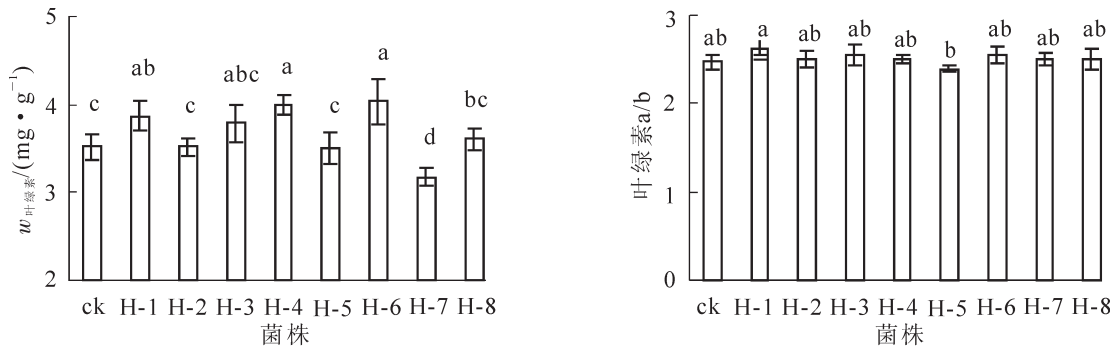


图 4 不同菌株灌根处理对国槐幼苗叶绿素质量分数和叶绿素 a/b 的影响

Figure 4 Effect of the different endophytic fungi on the Chl content and Chla/Chlb of *Sophora japonica*

2.3 不同菌悬液灌根处理对国槐幼苗生理指标的影响

2.3.1 丙二醛质量摩尔浓度和脯氨酸质量分数 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, 菌株 H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根处理的国槐幼苗丙二醛(MDA)质量摩尔浓度显著低于对照($P < 0.05$, 图 5), 分别为对照的 88%, 88%, 86% 和 83%, 表明菌株 H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根后抑制了丙二醛的产生, 降低盐分对植物的伤害; 菌株 H-5 灌根处理的国槐幼苗丙二醛质量摩尔浓度显著高于对照, 国槐抵抗盐胁迫的能力最差, 受到的伤害最大。就脯氨酸(Pro)质量分数而言, H-1 和 H-3 处理的国槐质量分数分别为对照的 140% 和 151%, 显著高于对照, H-5 灌根处理的国槐脯氨酸质量分数为对照的 81%, 显著低于对照($P < 0.05$, 图 5)。

2.3.2 超氧化物歧化酶(SOD)和过氧化物酶(POD)活性 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, H-1 灌根处理的国槐叶片超氧化物歧化酶活性为对照的 134%, H-4 灌根处理的国槐叶片过氧化物酶活性为对照的 135%, 均显著高于对照; H-5 处理的国槐叶片过氧化物酶活性显著低于对照, 为对照的 72%, 可见菌株 H-1 和 H-4 灌根处理可显著提高植物的抗逆性, 有效抵御盐胁迫对国槐幼苗的伤害, H-5 灌根处理降低了国槐自身对盐胁迫的忍受能力, 而其他菌株灌根处理对国槐叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的影响不明显($P > 0.05$, 图 6)。

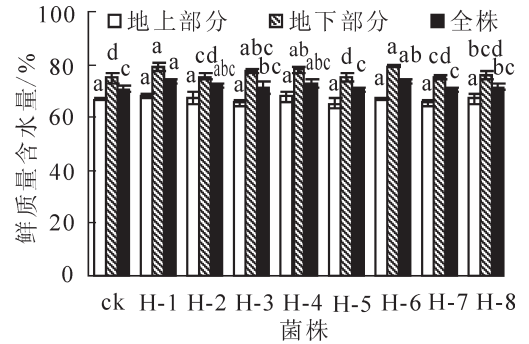
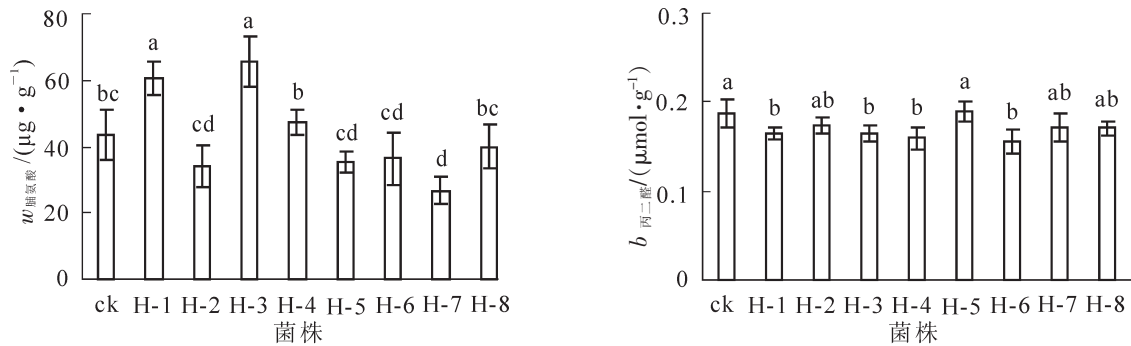


图 3 不同菌株处理对国槐幼苗鲜质量含水量的影响

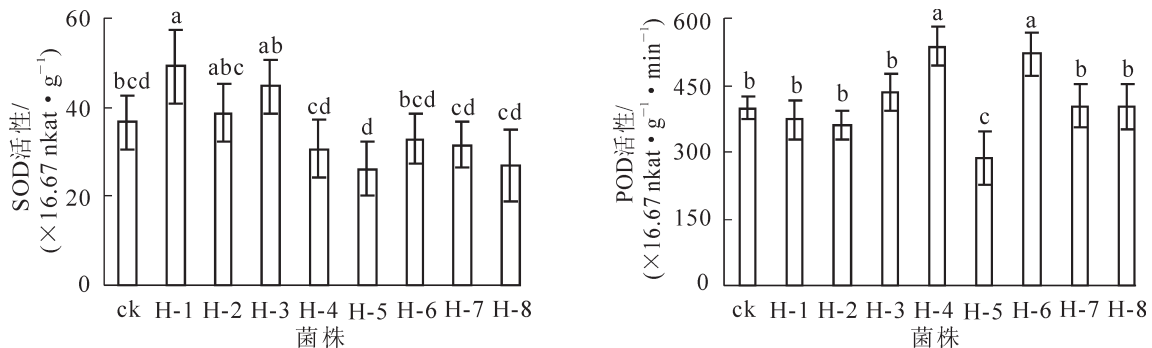
Figure 3 Effect of the different endophytic fungi on the water content of fresh weight of *Sophora japonica*



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图5 不同菌株处理对国槐叶片脯氨酸、丙二醛的影响

Figure 5 Effect of the different endophytic fungi on Pro and MDA content of *Sophora japonica* leaf



不同小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$)。

图6 不同菌株灌根处理对国槐叶片超氧化物歧化酶和过氧化物酶活性的影响

Figure 6 Effect of the different endophytic fungi on SOD and POD activities of *Sophora japonica* leaf

3 结论与讨论

200 mmol·L⁻¹氯化钠胁迫下, 8株内生真菌灌根处理对国槐幼苗生长表现出促进、抑制或无明显作用。菌株H-3的促进作用最明显, 幼苗高增长量、干质量、根冠比和鲜质量含水量显著高于对照, 表明H-3灌根处理可增加国槐苗高、干物质积累, H-4的促进作用次之; 菌株H-5则抑制其生长, 国槐幼苗生长势减弱, 吸收水分的能力差, 地上部分的生物量积累受到抑制, 其他菌株作用不明显。叶绿素质量分数的大小直接影响植物的光合强弱^[10], 菌株H-1, H-4和H-6处理的国槐叶绿素质量分数均显著高于对照, 而H-5和H-7处理的叶绿素质量分数显著低于对照, 内生真菌可能通过提高或降低国槐幼苗的叶绿素质量分数, 来增强或降低国槐幼苗的光合作用。

随着研究的深入, 在植物抗逆(抗盐)中, 活性氧代谢的作用非常重要, 受到越来越多人的关注, 当遇到逆境时, 植物体内的代谢会受到影响, 有利于自由基的产生, 而当自由基积累到一定程度时, 便会损伤植物的细胞膜^[11]。丙二醛是植物逆境时积累的有害物质, 含量越高, 说明细胞膜受到的伤害越大^[12]。超氧化物歧化酶、过氧化物酶等能有效地清除自由基, 是酶促防御系统的重要组成部分, 因此, 在盐胁迫条件下, 植物体内超氧化物歧化酶等活性的增加可以提高植物的抗盐能力。脯氨酸的积累作为植物耐盐性评价生理指标具有不确定性。有研究表明植物体内游离脯氨酸的含量与植物的抗逆性成正相关性^[13], 也有报道认为, 脯氨酸的积累与耐盐程度无相关性^[14], 更有报道认为脯氨酸的积累是胁迫对植物伤害的结果^[15]。本研究试验结果表明: 200 mmol·L⁻¹氯化钠胁迫下, 8株内生真菌灌根处理对国槐幼苗的生长和生理作用表现为正效应、负效应和无显著效应; 菌株H-1, H-3, H-4和H-6灌根处理的国槐幼苗丙二醛质量分数显著低于对照, 其中H-6处理的国槐叶片丙二醛质量分数最低, 表明H-6在盐胁迫过程中较大程度抑制了丙二醛的产生, 降低盐分对国槐的伤害, 提高了国槐幼苗的抗性; H-1处理的国槐叶片超氧化物歧化酶活性和H-4处理的国槐叶片过氧化物酶活性显著高于对照, H-1和H-3处理的国槐幼苗的脯氨酸质量分数显著高于对照, 从而缓解了盐胁迫对国槐苗的伤害; 而菌株H-5灌根处理的国

槐幼苗丙二醛显著高于对照, 脯氨酸质量分数、过氧化物酶活性显著低于对照, 说明本处理下国槐抵抗盐胁迫的能力最差, H-5 可能是国槐的“机会病原菌”, 间接或直接降低了国槐自身对盐胁迫的忍受能力。另外, 本研究结果认为: 脯氨酸质量分数的变化与植物的抗逆性成正相关性, 与贺道耀等^[13]的观点一致。

部分植物根际微生物可以促进植物生长和养分吸收, 提高宿主植物抗逆性, 如 AM 真菌可显著提高植物耐盐性^[16], 玉米 *Zea mays* 接种丁香假单胞菌 *Pseudomonas syringae* 后, 可忍受对一定浓度的盐胁迫^[17], 深色有隔内生真菌 D575 对盐胁迫具有较强的耐受性^[18]。本研究中, 200 mmol·L⁻¹ 氯化钠胁迫下, H-1, H-3, H-4 和 H-6 灌根处理的国槐幼苗抗盐能力提高, 且每种菌株处理下的国槐生物量与生理变化趋势基本一致, 具有应用潜力。值得一提的是, 内生真菌侵染对宿主植物的作用具有不确定性, 例如一些内生真菌在一种植物中表现致病, 而在另一宿主中可表现互惠共生, 甚至在不同条件下同一种植物中, 也可表现出不同的作用关系^[19-21], 这与内生真菌和宿主的遗传物质、植物营养供应、温度、土壤湿度和水分条件等均有关系, 其作用机制尚需深入研究^[22]。

4 参考文献

- [1] BACON C W, PORTER J K, ROBBINS J D, *et al.* *Epichloe typhina* from toxic tall fescue grasses [J]. *Appl Environ Microbiol*, 1977, **34**(5): 576 – 581.
- [2] 文先. 内生真菌 *Epichloë bromicola* 菌种分离鉴定及其发酵物对拟南芥幼苗生长的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2015.
WEN Xian. *Isolation and Identification of Epichloë bromicola and the Effects of Its Fermentation Broth on the Growth of Arabidopsis thaliana Seedlings* [D]. Hohhot: Inner Mongolia University, 2015.
- [3] SIRRENBORG A, GÖBEL C, GROND S, *et al.* Piriformospora indica affects plant growth by auxin production [J]. *Physiol Plant*, 2007, **131**(4): 581 – 589.
- [4] 韩荣, 李夏, 任安芝, 等. 干旱胁迫下内生真菌感染对羽茅的生理生态影响[J]. *生态学报*, 2011, **31**(8): 2115 – 2123.
HAN Rong, LI Xia, REN Anzhi, *et al.* Physiological ecological effect of endophyte infection on *Achnatherum sibiricum* under drought stress [J]. *Acta Ecol Sin*, 2011, **31**(8): 2115 – 2123.
- [5] 刘艳丽, 许海霞, 刘桂珍, 等. 小麦耐盐性研究进展[J]. *中国农学通报*, 2008, **24**(11): 202 – 207.
LIU Yanli, XU Haixia, LIU Guizhen, *et al.* Review on salt tolerance of wheat [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24**(11): 202 – 207.
- [6] 王元军. 黑豆芽苗菜叶绿素的提取方法[J]. *食品研究与开发*, 2010, **31**(2): 27 – 29.
WANG Yuanjun. Research on extraction methods of chlorophyll from black bean sprout [J]. *Food Res Dev*, 2010, **31**(2): 27 – 29.
- [7] 郝再彬, 苍晶, 徐仲. 植物生理实验[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004.
- [8] HODGES D, FORNEY C, PRANGE R J, *et al.* Improving the thiobarbituric acid-reactive-substances assay for estimating lipid peroxidation in plant tissues containing anthocyanin and other interfering compounds [J]. *Planta*, 1999, **207**(4): 604 – 611.
- [9] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [10] 张友胜, 张苏峻, 李镇魁. 植物叶绿素特征及其在森林生态学研究中的应用[J]. *安徽农业科学*, 2008, **36**(3): 1014 – 1017.
ZHANG Yousheng, ZHANG Sujun, LI Zhenkui. Characteristics of plant chlorophyll and the prospects for its use in forest ecological study [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2008, **36**(3): 1014 – 1017.
- [11] McCORD J M, FRIDOVICH I. Superoxide dismutase: an enzymic function for erythrocyte hemocuprein (hemocuprein) [J]. *J Biol Chem*, 1969, **244**(22): 6049 – 6055.
- [12] 王爱国, 邵从本, 罗广华. 丙二醛作为植物脂质过氧化指标的探讨[J]. *植物生理学通讯*, 1986(2): 55 – 57.
WANG Aiguo, SHAO Congben, LUO Guanghua. Inquiry into malondialdehyde as index of peroxidation of plant lipids [J]. *Plant Physiol Commun*, 1986(2): 55 – 57.
- [13] 贺道耀, 余叔文. 水稻高脯氨酸愈伤组织变异体的选择及其耐盐性[J]. *植物生理学报*, 1995, **21**(1): 65 – 72.

- HE Daoyao, YU Shuwen. *In vitro* selection of a high-proline-producing variant from rice callus and studies on its salt tolerance [J]. *Acta Phytophysiol Sin*, 1995, **21**(1): 65 – 72.
- [14] MOFTAH A E, MICHEL B E. The effect of sodium chloride on solute potential and proline accumulation in soybean leaves [J]. *Plant Physiol*, 1987, **83**(2): 238 – 240.
- [15] GARCIA A B, ENGLER J, IYER S, *et al.* Effects of osmoprotectants upon NaCl stress in rice [J]. *Plant Physiol*, 1997, **115**(1): 159 – 169.
- [16] 张峰峰, 赵玉洁, 谢凤行, 等. AM 真菌提高植物耐盐性研究进展与展望[J]. 天津农业科学, 2008, **14**(6): 66 – 70.
- ZHANG Fengfeng, ZHAO Yujie, XIE Fengxing, *et al.* Development and expectation on plant salt tolerance enhanced by arbuscular mycorrhizal fungi [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2008, **14**(6): 66 – 70.
- [17] BARASSI C A, AYRAULT G, CREUS C M, *et al.* Seed inoculation with *Azospirillum mitigates* NaCl effects on lettuce [J]. *Sci Hortic*, 2006, **109**(1): 8 – 14.
- [18] 邓勋, 宋小双, 尹大川, 等. 盐胁迫下深色有隔内生真菌 D575 对樟子松生长及耐盐性的影响[J]. 森林工程, 2015, **31**(6): 5 – 10.
- DENG Xun, SONG Xiaoshuang, YIN Dachuan, *et al.* Growth and physiological responses of *Pinus sylvestris* var. *mougolicato* salt tolerance under inoculation of dark septate endophyte D575 [J]. *For Eng*, 2015, **31**(6): 5 – 10.
- [19] CHEPLICK G P, CLAY K, MARKS S. Interactions between infection by endophytic fungi and nutrient limitation in the grass *Lolium perenne* and *Festuca arundinacea* [J]. *New Phytol*, 1989, **111**(1): 89 – 97.
- [20] 梁宇, 高玉葆. 内生真菌对植物生长发育及抗逆性的影响[J]. 植物学通报, 2000, **17**(1): 52 – 59.
- LIANG Yu, GAO Yubao. Effects of endophyte infection on growth, development and stress resistance of plants [J]. *Chin Bull Bot*, 2000, **17**(1): 52 – 59.
- [21] 袁志林, 章初龙, 林福呈. 植物与内生真菌互作的生理与分子机制研究进展[J]. 生态学报, 2008, **28**(9): 4430 – 4439.
- YUAN Zhilin, ZHANG Chulong, LIN Fucheng. Recent advances on physiological and molecular basis of fungal endophyte-plant interactions [J]. *Acta Ecol Sin*, 2008, **28**(9): 4430 – 4439.
- [22] 姚领爱, 胡之璧, 王莉莉, 等. 植物内生菌与宿主关系研究进展[J]. 生态环境学报, 2010, **19**(7): 1750 – 1754.
- YAO Lingai, HU Zhibi, WANG Lili, *et al.* Research development of the relationship between plant endophyte and host [J]. *Ecol Environ*, 2010, **19**(7): 1750 – 1754.