

新疆红沙泉矿区盐地碱蓬根系深色有隔内生真菌的分离及其耐盐效应

刘敏娜^{1,2}, 解琳琳^{1,2}, 毕银丽^{1,2,3*}

1 西安科技大学西部矿山生态环境修复研究院, 陕西 西安 710054

2 西安科技大学地质与环境学院, 陕西 西安 710054

3 中国矿业大学(北京) 煤炭精细勘探与智能开发全国重点实验室, 北京 100083

摘要: 新疆矿区面临严重的土壤盐渍化问题, 限制了植物生长, 解决盐渍化土壤对矿区生态修复十分重要。深色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)能提高植物抗逆性, 可在生态系统修复和促进植被恢复方面发挥重要作用。本文调查了新疆红沙泉盐碱矿区周边未开采区、排土场植被复垦区及未复垦扰动区的优势植物盐地碱蓬 *Suaeda salsa* 根系中的 DSE, 探究不同 NaCl 浓度下 DSE 微观形态和生理生化反应, 明晰植物根系共生 DSE 的耐盐性特征, 以期为该地区的生态修复提供理论参考。研究发现, 红沙泉矿区不同采样地的盐地碱蓬均能与 DSE 形成良好的共生关系, 从盐地碱蓬根系共分离出 23 株 DSE。经耐盐性初筛, 优选出 4 株菌株, 其中球毛壳 *Chaetomium globosum* 在 3 mol/L NaCl 胁迫下仍保持生长, 其生物量、还原型谷胱甘肽含量和产孢能力显著优于其他菌株; 其余 3 株链格孢 *Alternaria* spp. 在 2 mol/L NaCl 盐胁迫下呈现出明显的微观结构变化, 菌丝直径显著增加、隔间距缩短、表面皱缩, 结构差异化可能是其应对盐胁迫的响应策略, 此外, 3 株 DSE 还分别通过提升可溶性蛋白含量、增强超氧化物歧化酶(SOD)活性和过氧化氢酶(CAT)活性等生理机制, 缓解盐胁迫损伤。本研究结果可为新疆盐碱矿区耐盐微生物筛选及微生物复垦技术应用提供理论依据。

关键词: 深色有隔内生真菌; 盐地碱蓬; 盐胁迫; 生态修复; 抗氧化酶

[引用本文]

刘敏娜, 解琳琳, 毕银丽, 2026. 新疆红沙泉矿区盐地碱蓬根系深色有隔内生真菌的分离及其耐盐效应. 菌物学报, 45(2): 250139

Liu MN, Xie LL, Bi YL, 2026. Isolation and salt tolerance responses of dark septate endophytes in *Suaeda salsa* roots in Hongshaquan mining area, Xinjiang, northwest China. Mycosystema, 45(2): 250139

资助项目: 国家自然科学基金(52394195, 52404186)

This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52394195, 52404186).

*Corresponding author. E-mail: ylbi88@126.com

Received: 2025-05-08; Accepted: 2025-07-18

Isolation and salt tolerance responses of dark septate endophytes in *Suaeda salsa* roots in Hongshaquan mining area, Xinjiang, northwest China

LIU Minna^{1,2}, XIE Linlin^{1,2}, BI Yinli^{1,2,3*}

1 Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Area of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China

2 College of Geology and Environment, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, Shaanxi, China

3 State Key Laboratory for Fine Exploration and Intelligent Development of Coal Resources, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China

Abstract: The Xinjiang mining area faces a severe soil salinization problem that restricts plant growth. Addressing saline-alkali soil is crucial for ecological restoration in the mining area. Dark septate endophytes (DSE) can enhance plant stress resistance and are important for ecosystem restoration and promoting vegetation restoration. The DSE in the roots of the dominant plant *Suaeda salsa* in unmined areas, vegetation reclamation areas, and undisturbed area without reclamation around the Hongshaquan saline-alkali mining area in Xinjiang are investigated. DSE micromorphology and physiological and biochemical responses under varying NaCl concentrations, and the salt tolerance characteristics of plant root symbiotic DSE are explored, aiming at providing a theoretical basis for ecological restoration in this region. The study found that *S. salsa* from different sampling sites in the area could form a favorable symbiotic relationship with DSE, and 23 DSE strains were isolated from *S. salsa* roots. Following initial screening for salt tolerance, four strains were selected. Among these, *Chaetomium globosum* maintained growth under 3 mol/L NaCl stress, exhibiting significantly superior biomass, reduced glutathione content, and sporulation capacity compared to the other strains. The remaining three *Alternaria* spp. strains displayed distinct microstructural alterations under 2 mol/L NaCl salt stress, including a significant increase in mycelium diameter, shortened septum spacing, and a wrinkled surface. This structural differentiation may represent their adaptive response to salt stress. Furthermore, these three DSE strains mitigated salt stress damage through physiological mechanisms such as increasing soluble protein content and enhancing superoxide dismutase (SOD) and catalase (CAT) activities. The results provide a theoretical basis for screening salt-tolerant microorganisms and applying microbial reclamation technology in saline-alkali mining areas in Xinjiang.

Keywords: dark septate endophyte; *Suaeda salsa*; salt stress; ecological restoration; antioxidant enzyme

煤炭是我国的主体能源,我国国民经济与煤炭发展之间始终保持着相互依存关系(谢和平等 2019)。西部煤矿区气候干旱、生态弹性小,煤矿开采与脆弱生态叠加对西部矿区环境造成严重影响(毕银丽等 2022)。新疆地区作为西部典型干旱煤矿区,是重要的能源地区,但该地区土壤沙化和盐渍化是制约西部露天矿区植物生长的主要因素之一(高翔 2023)。土壤中过量的盐

分不仅能够破坏土壤结构,降低土壤生产力(Mahajan & Tuteja 2005; Manchanda & Garg 2008),而且能够引起植物渗透失衡,限制水分和营养物质的吸收(Sheng *et al.* 2010; Porcel *et al.* 2011)。因此,在进行矿区生态修复时,解决土壤盐渍化问题至关重要。

盐地碱蓬 *Suaeda salsa* 是一种真盐植物,广泛分布于海滨、盐渍土等高盐环境中,其耐盐能

力较强,可在含盐量为 2.5%–3%的土壤中正常生长(季洪亮等 2018)。其根系结构和生理机制使其在盐胁迫下表现出良好的离子调节和抗氧化能力,有助于其在高盐环境中生存(崔翠杰 2024)。前期对新疆红沙泉盐碱矿区植被调查发现,该植物广泛分布于矿区周边及矿区排土场,其作为优势植被进行盐碱矿区生态治理可能具有较大的推广潜力。盐地碱蓬对盐渍环境的适应性不仅源于其自身的生理特性,还可能与根际微生物的协同作用密切相关。

微生物修复技术因其环保、经济、高效等优点而受到广泛关注(Azubuikwe *et al.* 2016)。针对矿区生态修复,微生物复垦技术可以提高人工修复植被的成活率和抗逆能力,具有重要潜力(毕银丽等 2022)。深色有隔内生真菌(dark septate endophytes, DSE)泛指一类定殖于植物根表皮、皮层,甚至维管束组织细胞内和细胞间隙,能够形成深色有隔菌丝和微菌核特征结构的内生真菌(Ruotsalainen *et al.* 2022),目前在 114 科 320 属近 600 种植物根系组织中发现有 DSE 真菌定殖(刘茂军等 2009)。在分类学上,大多数 DSE 属于子囊菌门 Ascomycota 中的柔膜菌目 Helotiales 和格孢腔菌目 Pleosporales,少数属于担子菌门 Basidiomycota;从分布格局看,DSE 的生态分布主要受寄主种类、气候、海拔梯度及土壤逆境胁迫程度等因子影响(李忠风等 2025)。DSE 与寄主的共生互作对极端环境植被的生存至关重要(Li *et al.* 2023; 张从明等 2023; Netherway *et al.* 2024)。逆境中,DSE 细胞壁中的黑色素具有通过提高自身耐受性来抵御不利环境的功能(Berthelot *et al.* 2017);而且植物接种 DSE 能够显著提高盐胁迫下根系抗氧化酶活性,进而促进植株生长(Abdelaziz *et al.* 2017)。DSE 不仅能够通过增强植物对营养元素的吸收、保护植物免受生物和非生物胁迫,还能提高植物对逆境环境的适应性(Berthelot *et al.* 2019)。DSE 与其寄主形成的根-菌联结体可以调节植物-真菌共生结构和互作关系,在植物促生和抗逆性等方面均发挥积极作用(Prema *et al.* 2018; Bi & Xue 2023; 郭苗苗等 2024)。

DSE 在体外培养条件下对胁迫条件表现出高耐受性(Zhan *et al.* 2015; Berthelot *et al.* 2016)。邓勋等(2015)发现低中浓度盐胁迫($C_{NaCl} \leq 0.4$ mol/L)下 DSE 真菌对碳和磷相对利用率抑制程度较低,生长速率受影响较小,而高盐浓度($C_{NaCl} \geq 0.5$ mol/L)下菌株生长受到明显抑制,代谢缓慢。其耐盐机制涉及渗透调节、抗氧化防御及离子稳态调控(Jin *et al.* 2025),还有研究揭示了 DSE 在盐胁迫下通过黑色素积累、基因组可塑性(如染色体融合和裂变)以及膜脂质调控等途径增强耐盐性(Li *et al.* 2024),相较于其他真菌,DSE 具有可纯培养的优势(Wang *et al.* 2022),针对西部典型干旱矿区土壤盐碱化问题,我们推测 DSE 在该地区具有作为生物修复材料的巨大潜力。然而,目前西部干旱煤矿区的 DSE 菌种资源尚待挖掘,盐生环境 DSE 耐盐性作用机制尚不明晰。因此,发掘新疆本土的功能 DSE 真菌,研究其耐盐效应及其机制,可为功能微生物复垦技术在新疆盐碱矿区生态修复的应用提供新的思路。

本研究以新疆盐碱矿区盐生植物共生有益微生物-DSE 为研究对象,通过设置不同 NaCl 盐浓度胁迫进行耐盐 DSE 菌种的初筛和复筛,探究不同耐盐 DSE 的生长特性及耐盐响应特征,基于 DSE 微观结构、产孢情况、抗氧化剂和抗氧化酶活性等对比分析,筛选出耐盐性最优的 DSE 菌株;以期为后续研究、矿区生态修复提供优质的菌种资源和技术基础。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为国能新疆红沙泉一号露天煤矿区,地处古尔班通古特沙漠北端,行政区划属昌吉州奇台县管辖,范围地理极值坐标为 90°15'21"E–90°25'15"E、44°24'29"N–44°31'15"N。区内地势东南高、西北低,地貌形态为残丘状的剥蚀平原。区域属大陆干旱荒漠气候,年平均降水量 106 mm,年温差和昼夜温差较大。区内常年多风,多以西北风为主。该区域存在不同程度的土壤盐渍化问题,土壤以风沙土、棕钙土为主,

另外有少量栗钙土以及碱土, 土壤贫瘠(岳辉等 2022)。

1.2 样品采集及测定

依据上述研究区现状, 从中确立矿区周边未开采区、排土场植被复垦区及未复垦扰动区 3 个区域。矿区周边未开采区是以矿区为中心, 矿区边界至距离矿区 3 000 m 的范围; 植被复垦区和未复垦扰动区位于排土场。自 2023 年 5 月从各区每个采样点选取 1 m × 1 m 的正方形样方进行植被种类、盖度等的调查, 结果显示盐地碱蓬为调查样地优势植物。采用五点采样法分别采集盐地碱蓬根系及根际土样品, 每个区域 20 个重复。

土壤可溶性盐总量采取残渣烘干法测定(鲍士旦 2000)。盐地碱蓬根系定殖率参照 Phillips & Hayman (1970)的品红染色法处理根系样品, 每个处理组随机挑选 30 条长度均为 1 cm 的根段, 镜检观察 DSE 真菌定殖状况, 并计算 DSE 真菌的定殖率(菌丝、微菌核)以及定殖强度。按 Biermann & Linderman (2006)的方法计算 DSE 定殖率和定殖强度:

$$\text{DSE 定殖率} = (\text{定殖根段数} / \text{总根数}) \times 100\%$$

$$\text{DSE 定殖强度} = (\text{定殖根段长度} / \text{定殖根段总长度}) \times 100\%$$

1.3 DSE 的分离和纯化

采用组织块分离法对盐地碱蓬根系 DSE 真菌进行分离培养。首先用自来水冲洗根样, 经表面消毒(75%乙醇 5 min → 5%次氯酸钠 3 min)和无菌水漂洗后, 将根段切成 5 mm 片段, 置于 PDA 平板(每皿 5 段)于 28 °C 黑暗培养(Li *et al.* 2018)。每日观察菌落生长情况, 挑取边缘菌丝体进行纯化。

1.4 盐胁迫试验设计

通过固体培养对 DSE 菌株进行耐盐性初筛: 将纯化菌株分别接种于含 0 和 0.4 mol/L NaCl (基于研究区土壤盐含量最大值)的 PDA 培养基, 28 °C 黑暗培养 14 d, 筛选出 4 株生长良好的耐盐菌株。进一步采用液体培养进行耐盐复筛: 将 4 株 DSE 接种于含 0、2、3 mol/L NaCl 的 MMN 液体培养基, 于 28 °C、170 r/min 条件下黑暗培养 14 d, 每组 3 个重复。培养结束后

收集菌丝体用于生理生化指标测定及扫描电镜观察。

1.5 DSE 形态学和分子学鉴定

DSE 形态学鉴定: 依据《真菌鉴定手册》(魏景超 1979)中形态学鉴定的方法, 观察 0 和 0.4 mol/L NaCl 胁迫下初筛到的 4 株 DSE 菌株颜色、菌落形态、菌丝疏密程度。纯化后的 4 株 DSE 菌株重新接种在 PDA 平板培养基上, 并且在菌落边缘以 45° 插入盖玻片, 28 °C 恒温黑暗培养 14 d, 最后将长有菌丝的盖玻片取出, 将盖玻片置于滴有乳酸甘油的载玻片上, 在光学显微镜下观察并记录菌丝的颜色、形态、产孢结构及孢子形态等, 进行形态鉴定并拍照。

DSE 分子学鉴定: 从真菌样本中提取基因组 DNA, 使用 ITS1 (5'-TCCGTAGGTGAACCTG CGG-3') 和 ITS4-R (5'-TCCTCCGCTTATTGATAT GC-3') 引物对 ITS 序列区域进行 PCR 扩增, 对 PCR 产物进行测序, 以获得 ITS 区域的 DNA 序列基因。通过对比 DSE 序列、构建发育树, 以确定真菌种类与亲缘关系。

1.6 DSE 生理生化指标测定

生物量采用干重法测定, 黑色素根据 Berthelot *et al.* (2017)的方法进行测定。胞外总糖采用蒽酮比色法进行测定, 过氧化物酶活性采用愈创木酚法测定, 超氧化物歧化酶活性采用氮蓝四唑(NBT)光化还原法测定, 过氧化氢酶活性采用紫外吸收法测定, 还原型谷胱甘肽采用二硫代二硝基苯甲酸(DTNB)法测定, 脯氨酸采用酸性茚三酮法测定, 可溶性蛋白采用考马斯亮蓝 G-250 法测定(高俊凤 2006)。

1.7 数据处理

采用 SPSS 25.0 软件对数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。采用 Origin 2021 对数据进行统计分析并绘图。真菌序列的比对和发育树的构建采用 MEGA 11 完成。

2 结果与分析

2.1 新疆红沙泉矿区土壤盐分及 DSE 定殖状况

新疆红沙泉矿区不同采样区盐地碱蓬根际土可溶性盐总量差异显著, 但均属于轻盐渍化土

壤,其中未开采区土壤盐含量显著高于复垦区和扰动区,最高可达 2.18%。由于盐分易在土壤表层富集,而排土场的土壤剥离自深层低盐土壤,可能是复垦区和扰动区土壤盐含量较低的原因。而复垦区和扰动区无显著差异,可能是排土场复垦年限较短,土壤盐含量还未出现显著差异。

对矿区优势植物盐地碱蓬根系的真菌定殖情况进行测定,结果发现,DSE 能够与盐地碱蓬形成良好的共生关系,且具有典型的有隔菌丝和微菌核结构(图 1)。新疆红沙泉矿区盐地碱蓬根系 DSE 定殖率和定殖强度差异显著($P<0.05$) (表 1)。扰动区和未开采区的 DSE 总定殖率和菌丝定殖率均显著高于复垦区,复垦区 DSE 定殖强度仅为未开采区的 23.3%,可能复垦区植被覆盖度较高,导致了 DSE 对该区植物生长贡献比例降低。3 个区域的微菌核定殖率无显著差异。

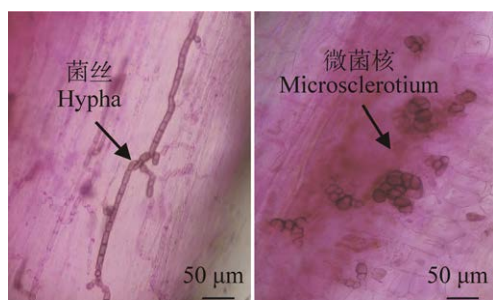


图 1 新疆红沙泉矿区盐地碱蓬根系 DSE 定殖结构
Fig. 1 The DSE colonization structure of *Suaeda glauca* roots in Hongshaquan Mining Area, Xinjiang.

2.2 具有高盐耐受性 DSE 的筛选

基于 DSE 耐盐性初筛的 4 株 DSE 菌株形态观察,其菌株颜色、菌落形态和菌丝疏密程度均

有显著差异,具体形态特征见表 2,图 2。

2.3 DSE 形态特征及分子鉴定结果

4 株 DSE 的微观形态见图 3,706-5 菌丝呈深棕色,具横隔,隔间距约 10–50 μm ,形成有隔孢子;706-15 菌丝隔间距约 15–60 μm ,产生分生孢子;746-3 产生有隔孢子;706-9 菌丝隔间距约 10–50 μm 。所得 4 株菌目标序列系统发育分析见图 4。将 4 株 DSE 分别确定为 706-5 为链格孢属 *Alternaria* sp.,706-15 为球毛壳 *Chaetomium globosum*,746-3 为高粱链格孢 *Alternaria sorghi*,706-9 为细链格孢 *Alternaria tenuissima*。

2.4 不同盐浓度对 DSE 微观形态的影响

4 株 DSE 在不同浓度的 NaCl 胁迫下的电镜结果显示(图 5),706-5 在 2 mol/L NaCl 浓度下的菌丝与对照(0 mol/L NaCl)形态相似,菌丝粗壮且表面略粗糙;706-15 随着盐浓度的升高,菌丝逐渐饱满均匀,菌丝隔更加明显,同时伴随着产孢量的增加;746-3 在 2 mol/L NaCl 浓度下的菌丝相较对照更粗壮,并且 DSE 菌丝隔清晰可见;706-9 在 2 mol/L NaCl 浓度下的菌丝比对照更粗,但菌丝表面出现皱缩,更加粗糙。

同一 NaCl 浓度下,4 株 DSE 菌丝状态差异显著(图 5)。0 mol/L NaCl 下,706-5 菌丝直径最大,约为 2 μm ,表面也最粗糙,706-9 菌丝细长,长度仅有 1 μm 左右;2 mol/L NaCl 胁迫下,746-3 菌丝直径最大,为 3–4 μm ,菌丝隔最明显,隔间距约 8 μm ;3 mol/L NaCl 胁迫下,706-15 仍能保持完整的菌丝形态,有孢子产生,孢子直径 2–3 μm 。

表 1 新疆红沙泉矿区盐地碱蓬根系 DSE 定殖情况

Table 1 The DSE colonization in *Suaeda glauca* roots in Hongshaquan Mining Area, Xinjiang

采样区 Sampling area	总定殖率 Total colonization rate/%	菌丝定殖率 Colonization rate of hypha/%	微菌核定殖率 Colonization rate of microsclerotium/%	定殖强度 Colonization strength/%
复垦区 Reclamation area	27.78±4.01 b	21.67±3.47 b	15.56±2.94 a	7.89±1.47 b
扰动区 Disturbed region	50.00±5.77 a	46.67±8.82 a	26.67±6.67 a	22.67±6.94 ab
未开采区 Unmined area	47.12±2.98 a	46.67±3.33 a	12.78±8.30 a	34.02±8.28 a

注:不同小写字母表示不同采样区之间差异显著($P<0.05$)

Note: Different lowercase letters indicate significant differences between different sampling areas ($P<0.05$).

表 2 有无盐胁迫下优选耐盐 DSE 的形态描述

Table 2 Morphology description of optimally selective salt-tolerant DSE under absence and presence of salt stress

菌株编号 Strain	菌落形态学特征 Morphological feature of colony
706-5	Control 灰棕色，伴有少量白色菌丝，边缘呈起伏波状 Grayish brown, with a small amount of white mycelium; the margin is undulating
	Salinity 菌落颜色变浅，白色菌丝增多，菌落边缘变平滑 The color becomes lighter, the white mycelium increases, with edge becoming smooth
706-15	Control 中间为浅黄色，边缘为浅灰色，表面有白色绒毛状菌丝覆盖，边缘全缘 Light yellow at middle, the edge is light gray, with surface covered with white villous mycelium and whole and light gray edge
	Salinity 菌落颜色整体变为浅黄色，表面呈粉粒状且分布紧密而均匀，形状规则且边缘平整 Entirely light yellow, regular in shape, with surface densely and uniformly powdery and granular, and flat edge
746-3	Control 中间为浅棕色，边缘呈白色且菌丝较中间稀疏 Light brown at center, with white margin; the margin hypha is comparatively sparse
	Salinity 菌落边缘白色菌丝消失，表面有少量白色绒毛状菌丝均匀分布，边缘平滑，呈规则圆形 Edge white mycelia absent, surface with sparse, evenly distributed white villous mycelia, smooth edges, regularly round
706-9	Control 深灰色，中间表面覆盖一层白色菌丝，边缘不整齐 Dark grey, with white mycelium covering the middle surface and uneven edges
	Salinity 菌落表面白色菌丝覆盖面积减少 The white mycelium covering area of colony surface decreased

注：Control 和 Salinity 分别指无盐胁迫和 0.4 mol/L NaCl 胁迫

Note: Control and salinity refer to salt-free and 0.4 mol/L NaCl stress respectively.

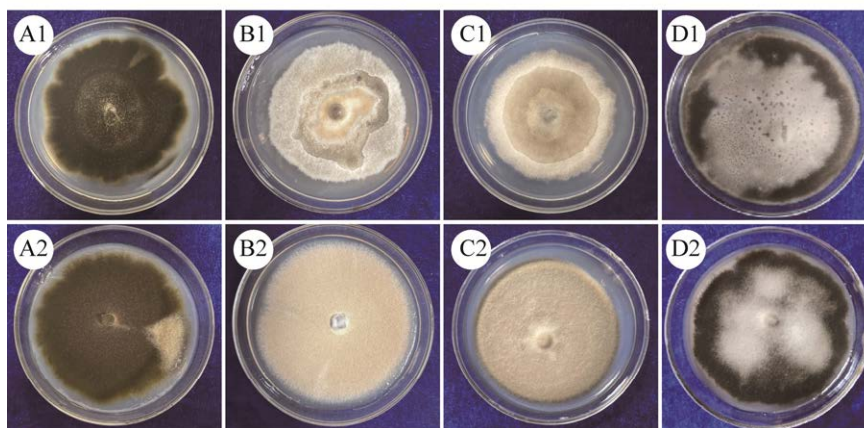


图 2 有无盐胁迫下优选耐盐 DSE 真菌群落对比 A1-D1、A2-D2 分别为 706-5、706-15、746-3 和 706-9 在无盐胁迫和 0.4 mol/L NaCl 胁迫下的菌落形态

Fig. 2 A comparison of optimally selective salt-tolerant DSE communities under absence and presence of salt stress. A1-D1 and A2-D2 show the colony morphologies of 706-5, 706-15, 746-3 and 706-9 under no salt stress condition and 0.4 mol/L NaCl stress, respectively.

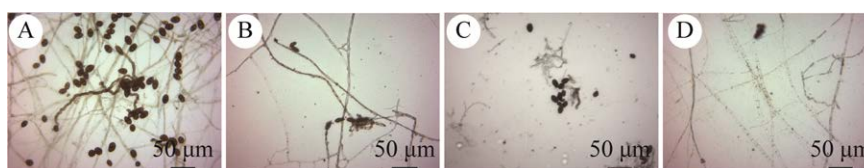


图 3 4 株 DSE 菌丝及孢子微观形态 A、B、C、D 分别为 706-5、706-15、746-3、706-9 这 4 株 DSE

Fig. 3 Mycelium and spore micromorphology of four DSE strains. A, B, C and D were 706-5, 706-15, 746-3 and 706-9 strains of DSE, respectively.

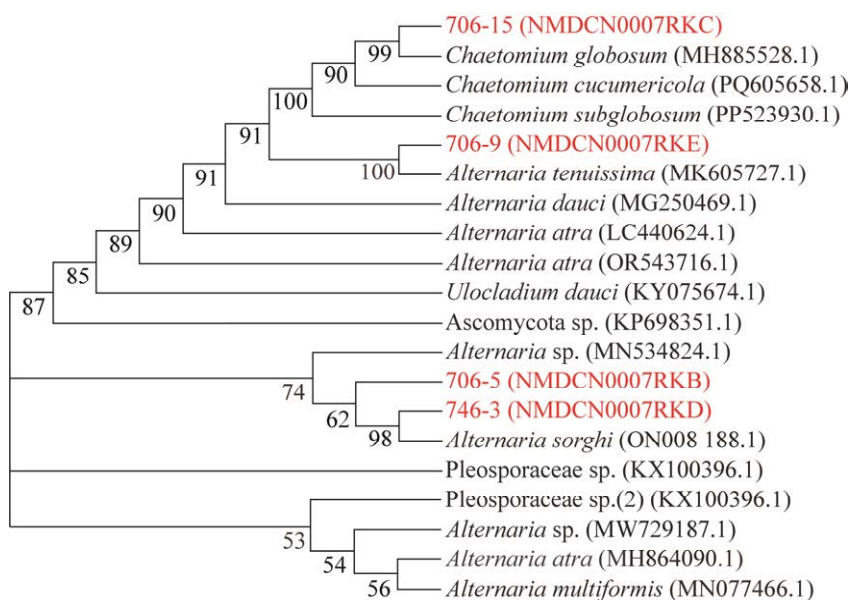


图 4 盐地碱蓬根系 4 株耐盐 DSE 真菌基于 rDNA ITS 序列构建的发育树 利用 MEGA 11 软件的邻接法构建系统发育树，树枝名称由真菌名称及其 rDNA ITS 基因序列登录号构成；分支点上的数字代表分支的支持率(Bootstrap 值)；括号中的数字代表 GenBank 序列号；标红部分为目标菌株

Fig. 4 Phylogenetic tree of four salt-tolerant DSE strains isolated from *Suaeda glauca* roots, based on rDNA ITS sequences. The phylogenetic tree was constructed using the neighbor-joining method of MEGA 11 software. Branch labels consist of the fungal name and its rDNA ITS gene sequence accession number; numbers at branch points represent bootstrap values; numbers in parentheses represent GenBank accession numbers; red-labeled part for the target strain.

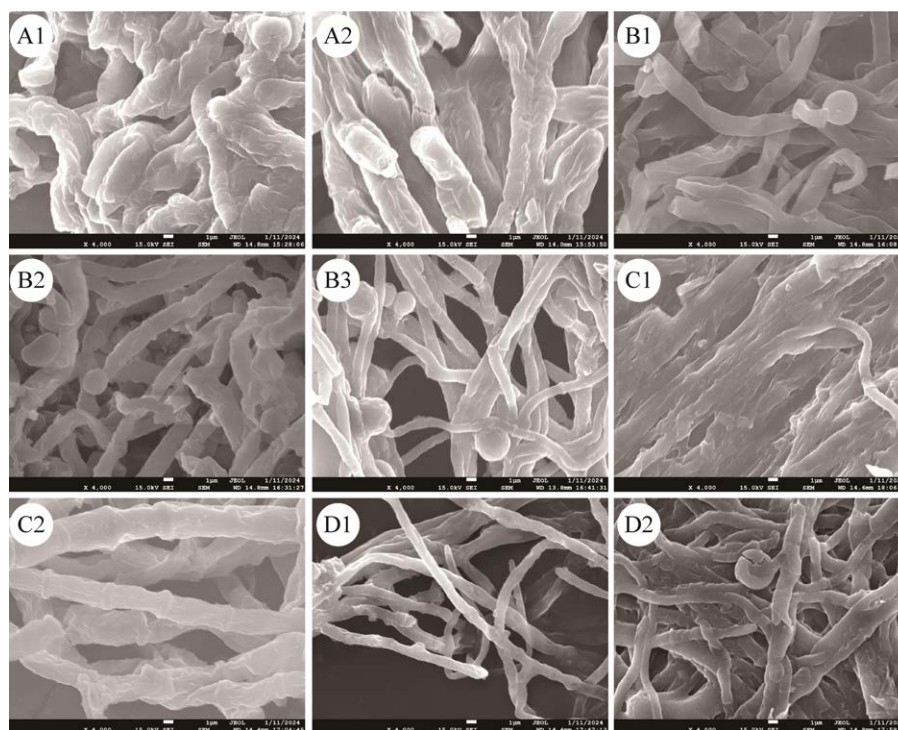


图 5 4 株 DSE 在不同浓度 NaCl 胁迫下的扫描电镜(4 000×)照片 A、B、C、D 分别为 706-5、706-15、746-3、706-9 这 4 株 DSE，1、2、3 分别为 0、2、3 mol/L NaCl

Fig. 5 Scanning electron microscope (4 000×) images of four DSE strains under different NaCl stress at different concentrations. A, B, C and D respectively represent the DSE strains 706-5, 706-15, 746-3 and 706-9 DSE; 1, 2 and 3 respectively represent 0, 2 and 3mol/L NaCl.

2.5 不同盐浓度胁迫对 DSE 生理生化指标的影响

将 4 株 DSE 在 MMN 液体培养基中培养 14 d 后测定生物量、还原型 GSH、SOD 活性以及可溶性蛋白等。4 株 DSE 在不同 NaCl 浓度处理下各项指标差异显著 ($P < 0.05$, 图 6)。706-5、746-3 和 706-9 这 3 株菌在 NaCl 浓度为 3 mol/L 时生物量为 0, 706-15 的生物量随着盐浓度的升高而升高, 746-3 在 2 mol/L NaCl 浓度下与对照无显著差异, 706-9 的生物量在 2 mol/L NaCl 浓度下显著高于对照, 提高了 25%。

706-5、706-15 和 746-3 这 3 株菌均在 2 mol/L

NaCl 浓度下 POD 活性最高, 706-9 在 2 mol/L NaCl 浓度下 POD 活性较 CK 显著降低。706-5、746-3 和 706-9 的 SOD 活性均在 2 mol/L NaCl 浓度下最高, 706-15 的 SOD 活性在 3 个不同 NaCl 浓度下无显著差异。盐胁迫下 706-15 和 706-9 的 CAT 活性显著高于对照, 746-3 在 2 mol/L NaCl 浓度下的 CAT 活性与对照无显著差异。706-15 在盐胁迫下的还原型 GSH 活性显著高于对照处理, 其中在 2 mol/L NaCl 浓度下的含量较对照提高了 82%。

4 株菌的黑色素含量随着盐浓度的升高逐渐降低。4 株菌随盐浓度升高胞外总糖含量显著

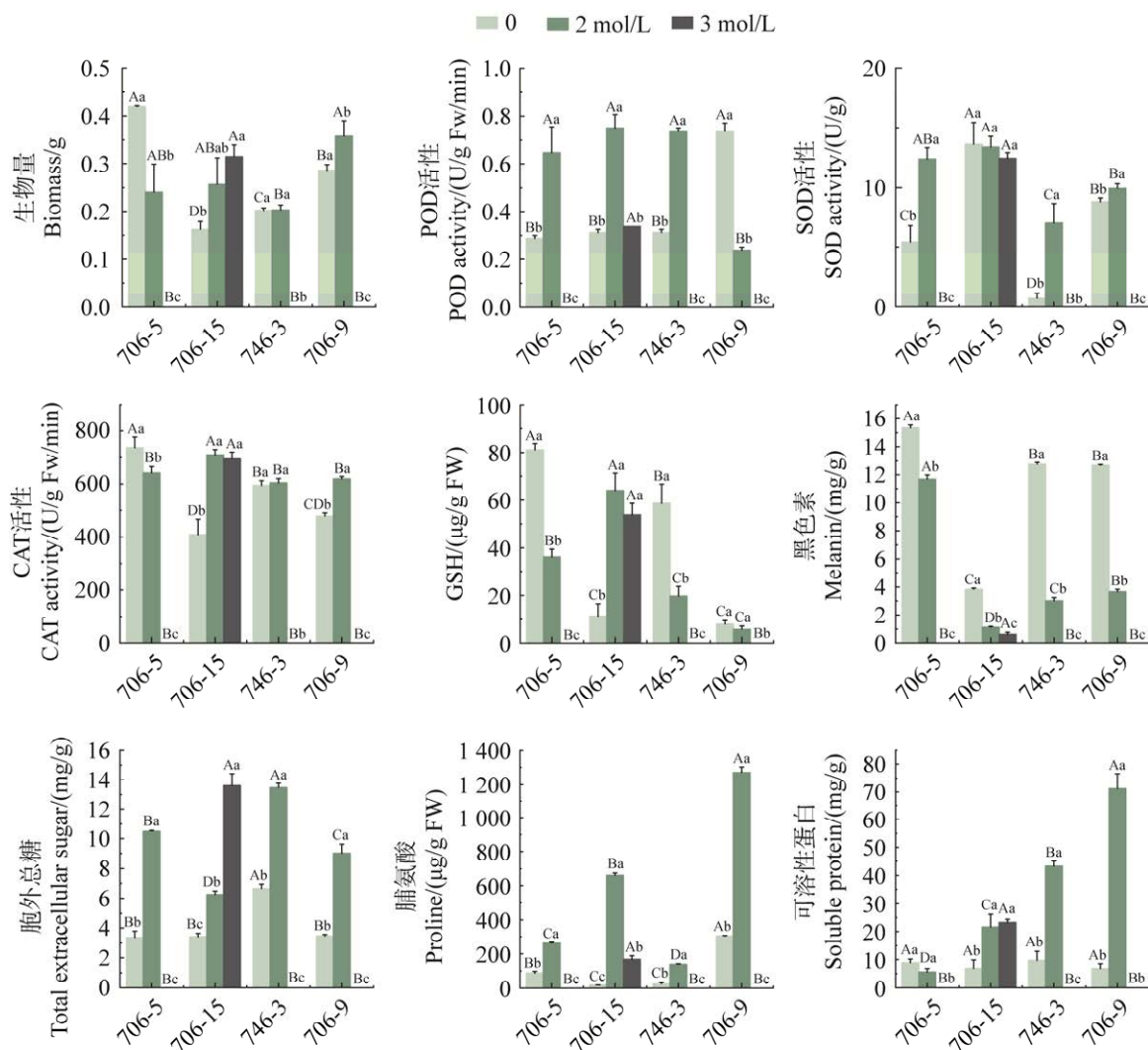


图 6 4 株耐盐 DSE 在不同浓度盐胁迫下的生理生化指标变化 不同小写字母表示每种 DSE 在不同 NaCl 浓度下差异显著 ($P < 0.05$), 不同大写字母表示每个 NaCl 浓度下不同 DSE 差异显著 ($P < 0.05$)

Fig. 6 Changes in physiological and biochemical indexes of four strains of salt-tolerant DSE under different concentrations of salt stress. Different lowercase letters indicate significant differences among different DSE at different NaCl concentrations ($P < 0.05$), and different uppercase letters indicate significant differences among different DSE at each NaCl concentration ($P < 0.05$).

增加。4 株菌的脯氨酸含量均在 2 mol/L NaCl 浓度下最高。706-15、746-3 和 706-9 在盐胁迫下的可溶性蛋白含量显著高于对照，其中 706-9 在 2 mol/L NaCl 浓度下相比对照提高了 9 倍。

对 4 株 DSE 的生理生化指标分别进行主成分分析(图 7)。不同盐浓度下，706-5 生物量与可溶性蛋白、还原型 GSH 和黑色素均显著正相关。706-15 生物量与可溶性蛋白正相关，与黑色素和 SOD 负相关。746-3 生物量与 CAT 活性呈极显著正相关。706-9 生物量与 CAT 和 SOD 活性均极显著正相关。

3 讨论

DSE 的定殖结构与其生长阶段密切相关，赵昕等(2021)研究指出，DSE 在生长期以菌丝为

主，而在胁迫或休眠期可能形成更多微菌核。本研究中，盐地碱蓬根际 DSE 定殖以菌丝为主，微菌核较少，可能与采样时 DSE 处于活跃生长期有关。此外，有研究表明 DSE 在某些逆境下可能增强与寄主的共生关系(杨欣熔 2023)。本研究也观察到，在一定范围内，土壤盐含量与 DSE 定殖强度呈正相关，这可能是因为高盐环境抑制了非耐盐微生物的竞争，为 DSE 提供了更有利的定殖条件。然而，这种正相关是否在更高盐度下仍成立，仍需进一步研究验证。

多项研究表明，盐胁迫对真菌的菌丝形态、抗性和代谢具有显著影响(王科选等 2023; 张迪等 2023)。Liu *et al.* (2017)研究发现盐胁迫下内生真菌菌丝局部膨大，尤其在尖端区域，可能与渗透调节物质的区隔化储存有关。本研究中，

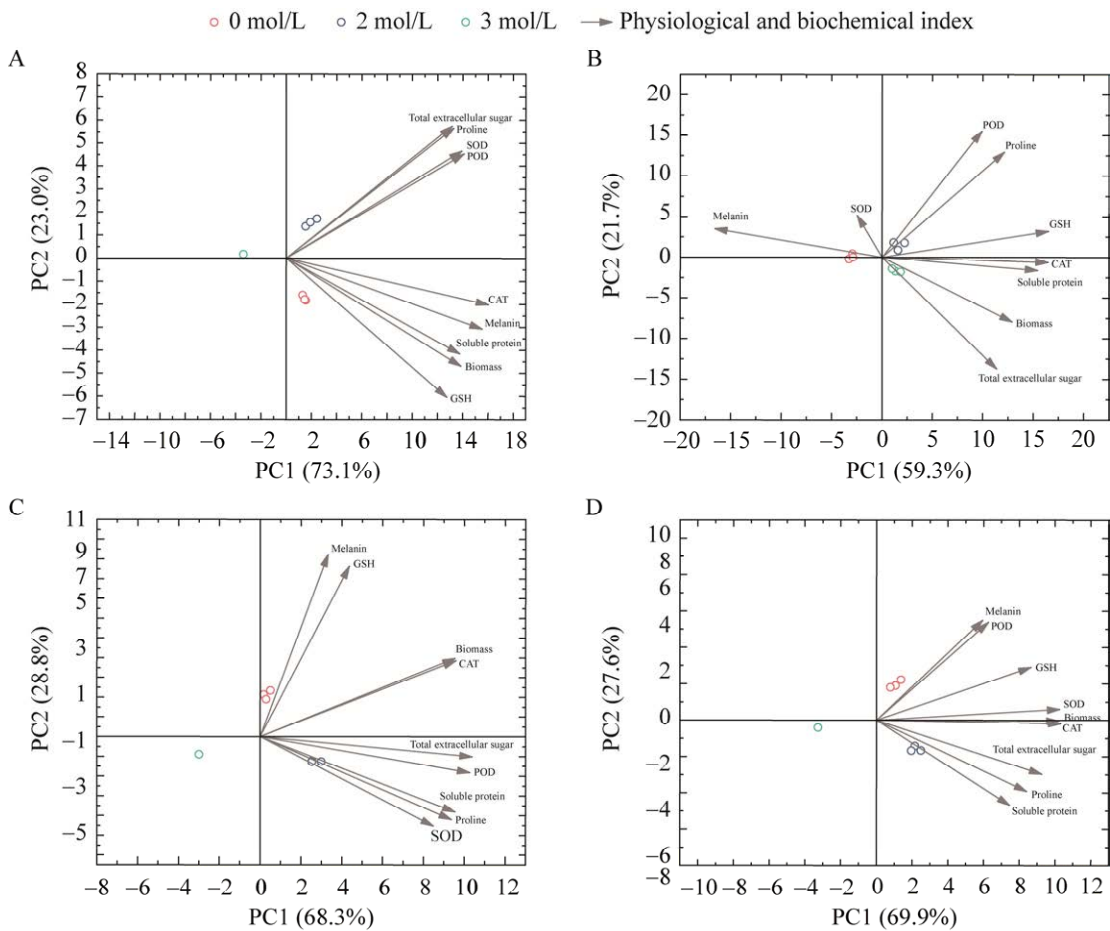


图 7 4 株 DSE 在不同浓度盐胁迫下的生理生化指标主成分分析
 Fig. 7 Principal component analysis of physiological and biochemical indexes of four strains of DSE under different concentration of salt stress. A: 706-5; B: 706-15; C: 746-3; D: 706-9.

DSE 菌丝在盐胁迫下菌丝变粗可能有助于 DSE 在盐胁迫下维持正常的生理功能,这种增粗现象可能源于双重适应机制:一方面,增粗的菌丝可能储存更多营养物质(解琳琳 2017),以维持其在胁迫环境中的生存需求;另一方面,耐盐菌株通过提高 POD 和 SOD 等抗氧化酶活性来维持细胞完整性(侯力峰 2020)。Wang *et al.* (2021)进一步揭示,真菌通过调控孢子萌发相关基因的表达来应对环境胁迫,解释了球毛壳在高盐环境下会增加产孢量,这可能是其进入休眠状态以等待适宜萌发条件的生存策略。本研究中观察到的盐胁迫下菌丝表面皱缩现象可能是渗透调节的结果(李海梅 2018),为平衡细胞内外的渗透压,细胞通过脱水收缩来适应高盐环境,这种形态改变虽然可能限制营养运输效率,但却是维持细胞存活的重要策略。

微生物在盐胁迫环境下会启动多种生理保护机制。Salwan *et al.* (2019)发现,胞外多糖是生物被膜的主要组成成分,可形成保护屏障,结合 Na⁺等阳离子,减少其对细胞的渗透胁迫,从而保护细胞结构的完整性。本研究结果中,随着 NaCl 浓度升高,4 株 DSE 的胞外总糖含量均显著增加,表明分泌胞外多糖是 DSE 应对盐胁迫的重要策略之一。DSE 能提高植物抗氧化酶活性,如 SOD、POD、CAT 等,这些酶有助于清除植物体内的活性氧物质,减轻氧化胁迫,保护植物细胞免受损伤(Tan *et al.* 2024)。本研究中,随着盐浓度的升高 DSE 抗氧化酶呈现先升高后降低的趋势,在盐胁迫的初期,DSE 可能通过增强抗氧化酶活性来提高耐受性,但随着盐浓度的持续升高,适应性响应会达到极限,导致抗氧化酶活性降低(张琳琳等 2022)。脯氨酸和可溶性蛋白在植物抵抗盐胁迫过程中起到了渗透调节作用,帮助植物维持细胞内的渗透平衡,增强植物的耐盐性(肖强等 2005)。本研究中不同 DSE 菌株在脯氨酸和可溶性蛋白积累方面表现出显著差异,反映了不同菌株特有的耐盐策略。值得注意的是,高盐条件下某些菌株的脯氨酸含量下降,这与李久道等(2017)的发现一致,可能源于细胞膜损伤导致的胞内

物质外泄。

不同 DSE 菌株在面对盐胁迫时表现出独特的生理适应机制。研究表明,可溶性蛋白含量的变化与抗逆性密切相关,其含量的高低可作为评估抗逆性的重要依据(张延旭等 2019)。本研究中链格孢属和球毛壳的可溶性蛋白含量均与生物量呈现显著正相关,表明这 2 个菌株可能主要通过积累可溶性蛋白来调节细胞渗透压,保护关键酶活性,从而维持基本代谢功能。Gaber *et al.* (2020)研究发现,尽管 DSE 在盐胁迫下表现出较强的耐受性,但其黑色素的积累并不直接影响其耐盐能力。本研究中球毛壳的生物量与黑色素含量呈显著负相关,这可能是由于在高盐环境下,该菌株将有限的能量和资源优先分配给菌丝生长和孢子形成,而非黑色素的合成,这种适应性策略可能增强其在盐胁迫条件下的生存能力。盐胁迫会诱导真菌体内 CAT 活性的增加,以帮助清除过量的活性氧(ROS),从而减轻氧化损伤(Soror *et al.* 2024)。本研究中高粱链格孢在盐胁迫下 CAT 的活性与其生物量相关性较强,表明该菌株可能主要依赖高效清除活性氧来应对盐胁迫。这些差异反映了各菌株在长期进化过程中形成的不同生态适应策略,为其在不同盐度生境中的生态位分化提供了生理基础。

4 结论

新疆红沙泉矿区盐地碱蓬能与 DSE 形成良好共生关系,从碱蓬根系成功分离 DSE 真菌 23 株,并筛选得到 4 株耐盐菌:链格孢属、球毛壳、高粱链格孢和细链格孢。明确了球毛壳为最佳耐盐菌株,厘清了球毛壳通过增大菌丝直径、减小隔间距、提高可溶性蛋白含量响应盐度胁迫。本研究可为新疆盐碱地矿区生态修复提供优质微生物菌种资源,后续将开展田间接种验证其应用效果。

作者贡献

刘敏娜:实验设计与实施、数据采集、论文撰写与修订;解琳琳:样品采集、方案设计、论

文审阅及修订；毕银丽：论文构思与指导、论文审阅及修订。

利益冲突声明

该研究不存在任何潜在利益冲突的商业或财务关系。

[REFERENCES]

- Abdelaziz ME, Kim D, Ali S, Fedoroff NV, Al-Babili S, 2017. The endophytic fungus *Piriformospora indica* enhances *Arabidopsis thaliana* growth and modulates Na⁺/K⁺ homeostasis under salt stress conditions. *Plant Science*, 263: 107-115
- Azubuike CC, Chikere CB, Okpokwasili G, 2016. Bioremediation techniques-classification based on site of application: principles, advantages, limitations and prospects. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 32: 1-18
- Bao SD, 2000. Soil and Agro-chemical Analysis. 3rd ed. China Agriculture Press, Beijing. 1-516 (in Chinese)
- Berthelot C, Chalot M, Leyval C, Blaudez D, 2019. From darkness to light: emergence of the mysterious dark septate endophytes in plant growth promotion and stress alleviation. In: Hodkinson TR, Doohan FM, Saunders MJ, Murphy BR (eds.) *Endophytes for a growing world*. Cambridge University Press, Cambridge. 143-164
- Berthelot C, Leyval C, Foulon J, Chalot M, Blaudez D, Sessitsch A, 2016. Plant growth promotion, metabolite production and metal tolerance of dark septate endophytes isolated from metal-polluted poplar phytomanagement sites. *FEMS Microbiology Ecology*, 92(10): fiw144
- Berthelot C, Perrin Y, Leyval C, Blaudez D, 2017. Melanization and ageing are not drawbacks for successful agro-transformation of dark septate endophytes. *Fungal Biology*, 121: 652-663
- Bi YL, Peng SP, Wang SH, 2022. Remediation mechanism and ecological application mode of dark septate endophytes in western coal mining area. *Journal of China Coal Society*, 47(1): 460-469 (in Chinese)
- Bi YL, Xue Z, 2023. Dark septate endophyte inoculation enhances antioxidant activity in *Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* under heat stress. *Physiologia Plantarum*, 175(6): e14054
- Biermann B, Linderman RG, 2006. Quantifying vesicular-arbuscular mycorrhizae: a proposed method towards standardization. *New Phytologist*, 87: 63-67
- Cui CJ, 2024. Cloning of SsNLP7 gene and functional analysis of salt tolerance in *Suaeda salsa* (L.) Pall. MS Thesis, Shihezi University, Shihezi. 1-16 (in Chinese)
- Deng X, Song XS, Yin DC, Song RQ, 2015. Effects of salt stress on the growth and nutritional metabolism of two dark mesophytic fungi (DSE). *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 35(5): 1-8 (in Chinese)
- Gaber DA, Berthelot C, Camehl I, Kovacs GM, Blaudez D, Franken P, 2020. Salt stress tolerance of dark septate endophytes is independent of melanin accumulation. *Frontiers in Microbiology*, 11: 562931
- Gao JF, 2006. Experimental guidance on plant physiology. Higher Education Press, Beijing. 1-216 (in Chinese)
- Gao X, 2023. Evaluation of soil environmental quality and prediction of environmental capacity in typical coal mining areas of Zhundong, Xinjiang. MS Thesis, China University of Mining and Technology, Xuzhou. 1-82 (in Chinese)
- Guo MM, Li J, Li XM, Zhang X, Zhang YL, Li Y, Gu PW, 2024. Infection characteristics of AMF and DSE in xerophytic medicinal plants in Ningxia and identification of DSE. *Research of Agricultural Sciences*, 45: 58-63 (in Chinese)
- Hou LF, 2020. Study on species diversity and salt tolerance of three species of dark septate endophytes in desert plants. PhD Dissertation, Hebei University, Baoding. 1-129 (in Chinese)
- Ji HL, Liu HL, Lu Y, 2018. Investigation and analysis of native wild halophyte plant resources in northern coastal areas. *Journal of Northwest Forestry College*, 33(4): 261-267 (in Chinese)
- Jin XY, Xu LJ, Dong MY, Song ZW, Zhang XH, Liu WX, Xu JG, Li YH, 2025. *In vitro* screening of NaCl-tolerant dark septate endophytes and their growth-promoting effects on *Anemone tomentosa*. *Microorganisms*, 13(6): 1303
- Li HM, 2018. Research on the molecular mechanism of FgPDK1 regulating the response of *Fusarium gramineum* to salt stress. MS Thesis, Nanjing Normal University, Nanjing. 1-65 (in Chinese)
- Li JD, Jin H, Pu SL, Zou JX, Guo P, Li LL, Wang Z, 2017. Physiological responses of sheep root grass and leaves under drought and salt stress. *Acta Prataculturae Sinica*, 34: 1705-1710 (in Chinese)
- Li M, He C, Wei M, Long JM, Wang JR, Yang XR, Wang KH, He XL, 2023. Temporal and spatial dynamics and functional metabolism of dark septate endophytes of *Gymnocarpos przewalskii* Maxim. in Northwest Desert, China. *Applied Soil Ecology*, 194: 105194
- Li X, He XL, Hou LF, Ren Y, Wang SJ, Su F, 2018. Dark septate endophytes isolated from a xerophyte plant

- promote the growth of *Ammopiptanthus mongolicus* under drought condition. *Scientific Reports*, 8(1): 7896
- Li Z, Zhu Z, Qian K, Tang BP, Han BC, Zhong ZH, Fu T, Zhou P, Stukenbrock EH, Martin FM, Yuan ZL, 2024. Intraspecific diploidization of a halophyte root fungus drives heterosis. *Nature Communications*, 15(1): 5872
- Li ZF, Zhu ZY, Yuan ZL, 2025. Dark septate endophytes – important partners of mycorrhizal fungi and genomic adaptive characteristics. *Plant Research*, 45(3): 352-360 (in Chinese)
- Liu KH, Ding XW, Narsing RMP, Zhang B, Zhang YG, Liu FH, Liu BB, Xiao M, Li WJ, 2017. Morphological and transcriptomic analysis reveals the osmoadaptive response of endophytic fungus *Aspergillus montevidensis* ZYD4 to high salt stress. *Frontiers in Microbiology*, 8: 1789
- Liu MJ, Zhang XT, Zhao ZW, 2009. Research progress of dark septate endophyte fungi (DSE). *Mycosystema*, 8(6): 888-894 (in Chinese)
- Mahajan S, Tuteja N, 2005. Cold, salinity and drought stresses: an overview. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 444: 139-158
- Manchanda G, Garg N, 2008. Salinity and its effects on the functional biology of legumes. *Acta Physiologiae Plantarum*, 30: 595-618
- Netherway T, Bengtsson J, Buegger F, Fritscher J, Oja J, Pritsch K, Hildebrand F, Krab EJ, Bahram M, 2024. Pervasive associations between dark septate endophytic fungi with tree root and soil microbiomes across Europe. *Nature Communications*, 15(1): 159
- Phillips JM, Hayman DS, 1970. Improved procedures for clearing roots and staining parasitic and vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi for rapid assessment of infection. *Transactions of the British Mycological Society*, 55: 158-IN118
- Porcel R, Aroca R, Ruiz-Lozano JM, 2011. Salinity stress alleviation using arbuscular mycorrhizal fungi. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 32: 181-200
- Prema S, Valli P, Muthukumar T, 2018. Dark septate root endophytic fungus *Nectria haematococca* improves tomato growth under water limiting conditions. *Indian Journal of Microbiology*, 58(4): 489-495
- Ruotsalainen AL, Kauppinen M, Wali PR, Saikkonen K, Helander M, Tuomi J, 2022. Dark septate endophytes: mutualism from by-products? *Trends in Plant Science*, 27: 247-254
- Salwan R, Sharma A, Sharma V, 2019. Microbes mediated plant stress tolerance in saline agricultural ecosystem. *Plant and Soil*, 442: 1-22
- Sheng M, Tang M, Zhang FF, Huang YH, 2010. Influence of arbuscular mycorrhiza on organic solutes in maize leaves under salt stress. *Mycorrhiza*, 21: 423-430
- Soror NH, Abdel-Rahman T, Ali D, Ali EAM, 2024. Diversity, tolerance and antioxidant enzymes of indigenous fungi isolated from xerophytes grown in stressed soil. *Journal of Applied Biotechnology Reports*, 11(2): 1322-1333
- Tan JY, Yue ZC, Li ST, Pan YY, Chu ZY, Ban YH, Xu ZY, 2024. Alleviation of salt stress and changes in glycyrrhizic acid accumulation by dark septate endophytes in *Glycyrrhiza glabra* grown under salt stress. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 72: 14557-14569
- Wang F, Sethiya P, Hu XH, Guo SH, Chen YY, Li A, Tan K, Wong KH, 2021. Transcription in fungal conidia before dormancy produces phenotypically variable conidia that maximize survival in different environments. *Nature Microbiology*, 6(8): 1066-1081
- Wang KX, Shu B, Yuan ZL, 2023. Rhizosphere *Fusarium* species in coastal halophytes and their abiotic tolerance and potential pathogenicity. *Mycosystema*, 42(8): 1673-1690 (in Chinese)
- Wang SH, Bi YL, Quan WZ, Christie P, 2022. Growth and metabolism of dark septate endophytes and their stimulatory effects on plant growth. *Fungal Biology*, 126: 674-686
- Wei JC, 1979. Handbook for identification of fungi. Shanghai Scientific & Technological Publishers, Shanghai. 1-781 (in Chinese)
- Xiao Q, Zheng HL, Chen Y, Huang WB, Zhu Z, 2005. Effects of salinity on the growth of *Spartina alterniflora* and the contents of proline, soluble sugar and protein. *Chinese Journal of Ecology*, 2005(4): 373-376 (in Chinese)
- Xie HP, Wu LX, Zheng DZ, 2019. Forecast of China's energy consumption and coal demand in 2025. *Journal of China Coal Society*, 44: 1949-1960 (in Chinese)
- Xie LL, 2017. Study on species diversity and salt tolerance of DSE fungi in the root system of flower stem in northwest desert. MS Thesis, Hebei University, Baoding. 1-59 (in Chinese)
- Yang XR, 2023. Study on species diversity and drought tolerance of dark epiphytic fungi in different germplasms of licorice. MS Thesis, Hebei University, Baoding. 1-82 (in Chinese)
- Yue H, Zhu R, Liu Y, Wei JL, Bi YL, Jiang KS, 2022. Construction of soil moisture monitoring model for desertified open-pit mines: a case study of Hongshaquan mining area. *Coal Science and Technology*, 50: 300-311 (in Chinese)
- Zhan F, He Y, Li Y, Li T, Yang YY, Toor GS, Zhao ZW, 2015.

- Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in a dark septate endophyte (DSE), *Exophiala pisciphila*. *Environmental Science and Pollution Research*, 22: 17897-17905
- Zhang CM, Man XW, Wu F, Yuan Y, Bian LS, 2023. A comparison of soil-plant continuum microbial communities in plantations of *Pinus tabuliformis* and *P. sylvestris* var. *mongolica* in West Mountain of Beijing. *Mycosystema*, 42(10): 2041-2062 (in Chinese)
- Zhang D, Zheng JY, Zeng LM, Zhang Q, Feng Y, Si XX, Shi X, 2023. Secondary metabolites of an endophytic fungus *Neocamarosporium* sp. ZLM-26 from *Suaeda salsa*. *Mycosystema*, 42(6): 1396-1403 (in Chinese)
- Zhang LL, Yu MH, Ding GD, Wang CY, Gao GL, Du FM, Mi WL, 2022. Effects of saline-alkali stress on the growth and physiological characteristics of oil sand bean. *Science of Soil and Water Conservation*, 20: 65-71 (in Chinese)
- Zhang YX, Bi YL, Guo N, Song ZH, Li XL, Miao CG, 2019. Effects of inoculation with different arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of alfalfa. *Journal of China Coal Society*, 44: 3815-3822 (in Chinese)
- Zhao X, Gao HL, Long JM, Liu YX, Li X, He XL, 2021. Spatio-temporal distribution of dark septate endophytic fungi and other microorganisms in the roots of *Haloxylon ammodendron* in the sandy areas of Northwest China and their responses to the rhizosphere soil environment. *Mycosystema*, 40: 2716-2734 (in Chinese)
- [附中文参考文献]**
- 鲍士旦, 2000. 土壤农化分析. 第3版. 北京: 中国农业出版社. 1-516
- 毕银丽, 彭苏萍, 王淑惠, 2022. 西部煤矿区深色有隔内生真菌修复机理与生态应用模式. *煤炭学报*, 47(1): 460-469
- 崔翠杰, 2024. 盐地碱蓬 SsNLP7 基因克隆及耐盐性功能分析. 石河子大学硕士论文, 石河子. 1-16
- 邓勋, 宋小双, 尹大川, 宋瑞清, 2015. 盐胁迫对 2 株深色有隔内生真菌(DSE)生长及营养代谢的影响. *中南林业科技大学学报*, 35(5): 1-8
- 高俊凤, 2006. 植物生理学实验指导. 北京: 高等教育出版社. 1-216
- 高翔, 2023. 新疆准东典型煤矿区土壤环境质量评价及环境容量预测. 中国矿业大学硕士论文, 徐州. 1-82
- 郭苗苗, 李金, 李兴梅, 张旭, 张愉力, 李媛, 顾沛雯, 2024. 宁夏沙生药用植物 AMF、DSE 侵染特征及 DSE 鉴定. *农业科学研究*, 45: 58-63
- 侯力峰, 2020. 三种荒漠植物深色有隔内生真菌物种多样性和耐盐性研究. 河北大学博士论文, 保定. 1-129
- 季洪亮, 刘红丽, 路艳, 2018. 北方滨海地区乡土野生盐生植物资源调查及分析. *西北林学院学报*, 33(4): 261-267
- 李海梅, 2018. FgPDK1 调控禾谷镰孢菌响应盐胁迫的分子机制研究. 南京师范大学硕士论文, 南京. 1-65
- 李久道, 金华, 朴世领, 邹吉祥, 郭鹏, 李琳琳, 王智, 2017. 羊草根、叶在干旱和盐胁迫下的生理反应. *草业科学*, 34: 1705-1710
- 李忠凤, 朱志勇, 袁志林, 2025. 深色有隔内生菌——菌根真菌重要伙伴及基因组适应性特征. *植物研究*, 45(3): 352-360
- 刘茂军, 张兴涛, 赵之伟, 2009. 深色有隔内生真菌(DSE)研究进展. *菌物学报*, 8(6): 888-894
- 王科选, 舒博, 袁志林, 2023. 滩涂盐碱地根际镰孢菌种类、非生物胁迫抗性及其致病性. *菌物学报*, 42(8): 1673-1690
- 魏景超, 1979. 真菌鉴定手册. 上海: 上海科学技术出版社. 1-781
- 肖强, 郑海雷, 陈瑶, 黄伟滨, 朱珠, 2005. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响. *生态学杂志*, 2005(4): 373-376
- 谢和平, 吴立新, 郑德志, 2019. 2025 年中国能源消费及煤炭需求预测. *煤炭学报*, 44: 1949-1960
- 解琳琳, 2017. 西北荒漠花棒根系 DSE 真菌物种多样性和耐盐性研究. 河北大学硕士论文, 保定. 1-59
- 杨欣熔, 2023. 不同种质甘草深色有隔内生真菌物种多样性及耐旱性研究. 河北大学硕士论文, 保定. 1-82
- 岳辉, 朱蓉, 刘英, 魏嘉莉, 毕银丽, 姜凯升, 2022. 荒漠化露天矿土壤湿度监测模型的构建——以红沙泉矿区为例. *煤炭科学技术*, 50: 300-311
- 张从明, 满孝武, 吴芳, 员瑗, 边禄森, 2023. 北京西山油松 *Pinus tabuliformis* 和樟子松 *P. sylvestris* var. *mongolica* 人工林土壤-林木连续体微生物群落比较. *菌物学报*, 42(10): 2041-2062
- 张迪, 郑金扬, 曾丽媚, 张全, 冯瑶, 司鑫鑫, 石晓, 2023. 盐地碱蓬内生菌 *Neocamarosporium* sp. ZLM-26 次级代谢产物. *菌物学报*, 42(6): 1396-1403
- 张琳琳, 于明含, 丁国栋, 王春媛, 高广磊, 杜凤梅, 糜万林, 2022. 盐碱胁迫对油沙豆生长和生理特性的影响. *中国水土保持科学*, 20: 65-71
- 张延旭, 毕银丽, 郭楠, 宋子恒, 李向磊, 苗春光, 2019. 接种不同丛枝菌根真菌对黄花苜蓿生长影响. *煤炭学报*, 44: 3815-3822
- 赵昕, 高慧利, 龙俊萌, 刘燕霞, 李夏, 贺学礼, 2021. 西北沙区梭梭根系深色有隔内生真菌等微生物时空分布及对根际土壤环境的响应. *菌物学报*, 40: 2716-2734