

DOI: 10.11766/trxb202507250359

CSTR: 32215.14.trxb202507250359

佟浩然, 杨梦慧, 齐家淦, 李承俊, 金蕴, 杨春雪. AM 真菌不同处理方式对碱胁迫下狼尾草生长及生理特性的影响[J]. 土壤学报, 2026,

TONG Haoran, YANG Menghui, QI Jiagan, LI Chengjun, JIN Yun, YANG Chunxue. The Effects of Different AM Fungal Treatment Methods on the Growth and Physiological Characteristics of *Pennisetum alopecuroides* Under Alkali Stress[J]. Acta Pedologica Sinica, 2026,

AM 真菌不同处理方式对碱胁迫下狼尾草生长及生理特性的影响*

佟浩然, 杨梦慧, 齐家淦, 李承俊, 金蕴, 杨春雪[†]

(东北林业大学园林学院, 哈尔滨 150040)

摘要: 长时间不合理的耕作方式, 使土壤盐碱化程度不断加重, 严重制约农业的可持续发展, 并对区域粮食安全构成威胁。丛枝菌根(AM)真菌能与大多数高等植物形成共生关系, 帮助植物提高对于盐碱胁迫的耐受性, 但碱性土壤环境下, AM 真菌、宿主植物以及土壤微生物之间的互作调控机制尚不明确, 不同接种方式所带来的差异也同样缺少系统比较。本研究选用松嫩平原的优势种狼尾草作为试验对象, 旨在探明不同 AM 真菌接种方式对碱胁迫下狼尾草生长及生理的影响, 设计 5 种接种处理: NS: 接种高温高压灭菌的原位土菌剂; NL: 接种灭菌原位土中添加 38 μm 滤膜过滤的土壤浸出液菌剂; NB: 接种添加苯菌灵处理的灭菌原位土菌剂; AS: 接种未灭菌的原位土固体菌剂; AL: 接种未灭菌的原位土液体菌剂, 所有处理均在正常对照(CK)与碱胁迫(SS)条件下培养 60 天, 随后系统测定植株的生长状况、菌根侵染率、生理抗性指标及土壤球囊霉素的含量。

由实际测定结果分析, AS 处理的侵染效果与根系发育表现最优, 表明土壤中的微生物群落可与 AM 真菌协同共生, 改善根系发育并提升植株的耐碱能力; NS 处理由于彻底灭活所有微生物, 导致植物抗逆性大幅下降, 从另一方面也证实土壤微生物在耐碱机制中的不可或缺性; NL 处理虽在一定程度上缓解了灭菌造成的负面效应, 但因过滤过程中损失了一部分带有活性的微生物组分, 所以整体的改善幅度较为有限; NB 处理可在有效抑制 AM 真菌活性的同时较好保留其他非目标微生物的功能, 是区分与检验 AM 真菌特异性的有效方法; AL 处理虽侵染率低, 但仍表现出促生效果, 可能与菌剂中的微生物代谢物可独立参与植株抗逆和生长调节有关。研究表明 AM 真菌不同接种方式对狼尾草在碱胁迫下的生长生理状况存在显著影响, AS 处理通过互惠共生增强植株的抗逆能力; NB 处理是抑制 AM 真菌的首选方法, 对土壤微生态的干扰最小, 建议在实际接种中优先选用 AS 处理方法。本研究可为盐碱地植被修复和 AM 真菌资源的高效利用提供参考以及数据支撑。

关键词: AM (Arbuscular mycorrhizal) 真菌; 狼尾草; 碱胁迫; 菌根活性抑制; 菌剂接种

中图分类号: S154.3

文献标志码: A

The Effects of Different AM Fungal Treatment Methods on the Growth and Physiological Characteristics of *Pennisetum alopecuroides* Under Alkali Stress

TONG Haoran, YANG Menghui, QI Jiagan, LI Chengjun, JIN Yun, YANG Chunxue[†]

(College of Landscape Architecture, Northeast Forestry University, Harbin 150040, China)

Abstract: 【Objective】Long-term unreasonable farming methods have aggravated the degree of soil salinization, seriously

* 中央高校教育教学改革(国)-园林学院资助(530-41111204) Supported by the College of Landscape Architecture, Central University Education and Teaching Reform (National) (No.530-41111204)

[†] 通讯作者 Corresponding author, E-mail: senxiu99@163.com

作者简介: 佟浩然(2003-), 女, 黑龙江齐齐哈尔人。E-mail: 1679883277@qq.com

收稿日期: 2025-07-25; 收到修改稿日期: 2026-03-01; 网络首发日期(www.cnki.net):

restricting the sustainable development of agriculture and posing a threat to regional food security. Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi can form a symbiotic relationship with most higher plants and help plants to improve their tolerance to saline-alkali stress. However, in alkaline soil environment, the interaction regulation mechanism between AM fungi, host plants and soil microorganisms is not clear, and the differences caused by different inoculation methods are also lack of systematic comparison. The purpose of this study was to explore the effects of different AM fungal inoculation methods on the growth and physiology of *Pennisetum alopecuroides* under alkali stress. 【Method】 In this study, the dominant species *Pennisetum alopecuroides* in Songnen Plain was selected as the experimental object. Five inoculation treatments were designed: NS (inoculated with high temperature and high pressure sterilized in situ soil microbial agent); NL (inoculated in-situ sterilized soil with 38 μm filter-filtered soil leachate microbial agent); NB (inoculation of sterilized in-situ soil microbial agent treated with benomyl); AS (inoculation of unsterilized in-situ soil solid microbial agent); AL (unsterilized in situ soil liquid bacteria were inoculated). All treatments were cultured under normal control (CK) and alkali stress (SS) conditions for 60 days. Then the growth status, mycorrhizal infection rate, physiological resistance index and soil glomalin content of the plants were systematically determined. 【Result】 According to the analysis of the actual measurement results, the infection effect and root development performance of AS treatment were the best, indicating that the microbial community in the soil could cooperate with AM fungi to improve root development and enhance the alkali resistance of plants. NS treatment caused a significant decrease in plant stress resistance due to the complete inactivation of all microorganisms, confirming the indispensability of soil microorganisms in the alkali resistance mechanism. Although NL treatment alleviated the negative effects caused by sterilization to a certain extent, the overall improvement was limited due to the loss of some active microbial components during the filtration process. NB treatment could effectively inhibit the activity of AM fungi while retaining the function of other non-target microorganisms, which is an effective method to distinguish and test the specificity of AM fungi. Although the infection rate of AL treatment was low, it still showed a growth-promoting effect, which may be related to the fact that the microbial metabolites in the bacterial agent can independently participate in plant stress resistance and growth regulation. 【Conclusion】 The results showed that different inoculation methods of AM fungi had significant effects on the growth and physiological status of *Pennisetum alopecuroides* under alkali stress, and AS treatment enhanced the plant's stress resistance through reciprocal symbiosis. NB treatment is the preferred method to inhibit AM fungi, and has the least interference to soil microecology. It is suggested that AS treatment should be preferred in actual inoculation. This study can provide reference and data support for vegetation restoration and efficient utilization of AM fungal resources in saline-alkali land.

Key words: Arbuscular mycorrhizal (AM) fungi; *Pennisetum alopecuroides*; Alkali stress; Mycorrhizal activity inhibition; Fungal inoculant inoculation

土壤盐碱化是人类不合理耕作以及水资源管理失衡等方面共同带来的全球性生态问题, 对国内农牧业的发展以及粮食安全造成了极大威胁^[1-2]。高盐度、强碱性以及低肥力等特性会对植物造成渗透胁迫、离子毒害以及氧化损伤等影响, 抑制植物生长^[2-6]。从现有状况分析, 盐碱地改良难度较大, 植被恢复缓慢, 盐碱胁迫破坏了植物和有益微生物的共生关系, 形成恶性循环^[7-8]。但研究发现, 盐碱环境在一定程度上也有利于 AM 真菌和植物形成共生关系抵御胁迫, 如 AM 真菌在胁迫条件下会加快宿主植物对矿质元素的吸收, 提高渗透调节效率, 并提高清除活性氧的能力, 同时还可以促进植物的生长发育^[9-10]; AM 真菌可连接多株植物根系形成丛枝菌根网络, 以此实现养分和水分的跨植株转移, 平衡物种间关系, 提升系统的稳定性^[11-13]。在盐碱地修复中, 多种功能微生物借助协同作用来改良土壤环境, 一方面激活了关键酶促反应, 促进元素循环, 加速有机质分解, 另一方面借助离子螯合和渗透调节降低 Na^+ 的毒性, 同时分泌有机酸中和碱性物质, 改善土壤结构, 这种植物根系和微生物代谢网络的耦合体系能够同时调控盐分迁移和养分循环, 最终形成一种自维持的土壤微生物修复系统^[2,14]。

AM 真菌作为土壤微生物群落当中的主要类群之一, 在盐碱地等多种生境广泛分布, 能与 90%

以上的高等植物构建共生关系,以实现养分吸收、渗透调节以及次生代谢产物分泌,显著提高植物的耐盐碱能力,具有重要的经济价值^[15-18]。近些年来,分子生物学技术更新换代迅速,这使得如何合理运用 AM 真菌来改良盐碱地成为研究热点。新兴技术的落地运用使研究人员对于 AM 真菌的生理功能以及其与宿主之间的交互作用机制有了更为清晰的认知,近些年关于菌丝养分吸收与转运机制的研究取得显著进展,如利用稳定同位素标记与高通量成像技术,明确了 AM 真菌菌丝网络在盐胁迫状况下对氮、磷等关键营养元素的吸收与分配效率,发现菌丝作为媒介可以实现同时高效吸收及运输氮、磷两种元素,显著缓解了盐碱土壤中的离子毒害和营养缺乏问题,提高了植物的抗氧化能力以及渗透调节能力^[19]。此外,大量研究显示,AM 真菌能够凭借其庞大的外生菌丝网络扩大宿主植物的根系吸收范围,高效活化并吸收土壤中的惰性磷、锌等养分,同时改善对水分的吸收,缓解了盐碱胁迫所导致的营养失衡和生理干旱,提升了植物的抗逆性^[20]。这些发现为科研工作者提供新的视角认识 AM 真菌在盐碱胁迫下对宿主植物的调控过程。然而,虽然大量实验已反复验证了 AM 真菌可提升植物耐盐碱性的生理效应,但对于 AM 菌剂的不同处理方式,如菌种组合、接种剂量、施用时机等,对盐碱地改良效果的稳定性和普适性产生的影响还缺乏系统性的研究梳理^[18]。现有研究大多局限于接菌与不接菌处理的简单对比,缺少在复杂土壤微生物群落背景下对 AM 真菌功能性状的精准解析,在方法学方面,如何排除非目标微生物的干扰,同时保持土壤生态系统的完整性仍是一项重要挑战,常规的土壤灭菌处理致使微生物群落全面缺失,而化学抑制剂虽可以特异性抑制 AM 真菌,但可能改变土壤理化性质,如施用苯菌灵会降低土壤 pH 并且提高土壤的氧化还原能力^[21]。因此,发展能够精准调控 AM 真菌同时真实体现其生态功能的技术手段显得尤为关键,对于揭示盐碱地中 AM 真菌与植物的交互作用机制具有重要的科学和实践价值。

狼尾草(*Pennisetum alopecuroides*)作为松嫩盐碱草地的优势物种,呈现出较强的环境适应性^[22-24],狼尾草是菌根型多年生草本植物,它的根系发达,生长期长,有重要的牧草价值以及景观价值^[6,22,25-30]。虽在国内多地已实现了规模化栽培,但对于其耐盐碱机制及其与 AM 真菌共生机制的研究相对滞后,现有工作大多集中在引种栽培以及生态应用方面。研究初步说明,狼尾草具有突出的耐盐碱能力,只有在极端胁迫的情况下才会出现生长受限的情况^[31],这种特性可能源于其与 AM 真菌形成的特殊共生体系。松嫩盐碱草地的原位 AM 真菌经过长期自然选择,可能进化出独特的生理功能^[32],利用原位土菌剂进行研究可以更真实地反映 AM 真菌和植物的交互作用特征,为碱胁迫适应机制提供新的视角。这项研究将分子生物学技术和生态学方法整合起来,完善 AM 真菌和植物共生抗逆理论,揭示碱胁迫下 AM 真菌和狼尾草的相互作用机制,为 AM 真菌的高效利用提供技术支持。

1 材料与方法

1.1 供试材料栽培与菌剂制备

运用 KMnO₄ 溶液对狼尾草种子开展 30 min 浸泡消毒工作,种子发芽选用纸上培养法,将种子放置于铺设有湿润双层滤纸的培养皿中,在人工气候箱内培养到种子发芽,AM 真菌接种的原位土菌剂采自黑龙江省安达市松嫩平原盐碱草地,随机挑选 3 块样地。

进行取样工作时,首先对地表之上的枯枝落叶进行清理,以目标植株的茎基部作为中心,顺着根系集中分布的区域开展根围土的采集工作,采样点位按照五点法进行布置,即分别在东、南、西、北四个方向以及中心各自设置一个取样点。在进行具体处理操作时,利用无菌铲按照狼尾草根系的自然延伸方向进行挖掘,将附着有须根的根围土壤取出,整个过程当中尽量保证根系与土壤原本的结合状态,不对其进行扰动。每个取样点挖掘 300 g 根围土,将五个点位的土样合并后充分混匀,总重量约为 1.5 kg,在野外立刻将石块以及非狼尾草的根系剔除干净,仅保留紧贴在狼尾草须根之上的土壤,返回实验室后,将土样再次进行翻混使其均匀,借助 0.3 mm 孔径的筛网,把残留的砾石和杂根去掉后自然风干,最终放置于 4℃ 条件之下进行冷藏保存,为后续使用做好准备。

将处理好的土壤过 0.85 mm 孔径筛, 在育苗盆当中, 每盆装入 300 g 灭菌的不含有盐碱的营养土, 将其当作栽培基质, 在各个处理组里, 平铺一层固体菌剂, 直到形成一层均匀并且连续的覆盖层, 保证下层土壤没有裸露。菌剂铺设后, 每盆移栽 6 粒发芽种子, 立刻覆盖一层灭菌的不含有盐碱的普通营养土, 每盆 20 g, 在防止菌剂暴露的同时为播种创造无菌环境, 保证根系在生长过程当中与菌剂接触, 而非种子萌发时直接接触^[33]。原位土液体菌剂的制备参考湿筛析法: 取过筛后的根围土风干样品, 将预先收集的狼尾草须根剪碎成为 1 至 2 cm 片段, 与过筛后根围土混合, 称取适量该固体混合物与无菌去离子水按照 1:10 比例充分振荡混合, 静置数十秒以后, 把上层悬浮液倾析并且依次借助 125 μm 、63 μm 和 38 μm 的筛网, 最终收集 38 μm 筛网上的截留物, 该部分富含 AM 真菌孢子及菌丝片段。用无菌去离子水将其冲洗并且重悬到所需体积, 得到含 AM 真菌孢子的原位土液体菌剂, 现配现用, 在已装有 300 g 灭菌基质的实验盆中制作 6 个播种穴, 使用移液器向每个穴中注入 5 mL 土壤悬浮液, 随即放入一粒发芽种子, 并覆盖 20 g 灭菌原位土, 所有处理结束后进行浸盆, 而后移入植物光照培养室, 待狼尾草植株生长到 70 d 时, 进行相应的碱胁迫处理^[34]。

1.2 试验设计与处理

试验于 2024 年 9 月至 12 月期间开展, 在实验设计方面, 以 AM 真菌不同处理方式的 5 组同级比较作为框架, 分别设置了接种 AM 真菌以及灭活 AM 真菌的处理, 鉴于灭菌与接种方式的不同, 划分出 5 种土壤处理, 灭菌组设置三个处理: (1) 接种经过高温 (121 $^{\circ}\text{C}$) 高压 (109kPa) 灭菌 1 h 的原位土菌剂 (NS), 该方法为常规高温高压灭菌办法, 能将土壤中的微生物全部灭活, 但同时也会对土壤本身的某些理化性质产生影响。本研究设置该处理充当完全灭菌对照, 以此评估在无任何微生物活动的状况下土壤基质自身发挥的作用; (2) 接种灭菌原位土并添加经过 38 μm 滤膜过滤的土壤浸出液菌剂 (NL), 该做法在 NS 的基础上进行物理改良, 向灭菌土中掺入经过 38 μm 滤膜过滤的土壤浸出液, 将 AM 真菌拦截在滤膜上的同时让细菌等体型更小的微生物群重新回到土壤中, 使土壤微生物的功能得到一定程度的恢复; (3) 接种经过 50 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 苯菌灵溶液处理过的灭菌原位土菌剂 (NS), 这一处理在 NL 的基础上加入化学调控手段, 借助苯菌灵专性抑制 AM 真菌的性质, 同时减少对原有其他微生物群落结构的影响。接菌组包含两个处理: (1) 直接施用未经过灭菌的原位土固体菌剂 (AS), 包含自然状态下完整的 AM 真菌群落以及土壤微生物群落, 作为接菌组的基准对照; (2) 接种未经过灭菌的原位土液体菌剂 (AL), 即富含 AM 真菌孢子的悬浮液, 选用以孢子为主的液体接种方式, 利于单独评价 AM 真菌本身起到的直接作用。试验遵循同级比较及控制变量的原则, 在上述接种处理的基础上, 同时设置碱胁迫 (SS) 以及正常对照 (CK) 两个条件, 构成双因素设计, 共 10 组处理, 每个处理设置 3 个重复, 剖析 AM 真菌及其与土壤微生物群落的互作对狼尾草耐碱能力的影响。

在植物移栽生长 60d 后开展碱胁迫处理工作, 以碳酸钠 (Na_2CO_3) 与碳酸氢钠 (NaHCO_3) 的混合溶液进行碱胁迫处理, 鉴于 1.1 中狼尾草生长地的盐碱状况, 将 Na_2CO_3 与 NaHCO_3 (摩尔比 1:9) 作为原料配制 pH 为 9.14 的碱溶液。9.14 为中间胁迫溶液, 可避免高浓度碱胁迫造成植株死亡。将上述混合碱胁迫溶液作为植物培养基质开展浇灌处理, 进行 7 d 碱胁迫处理。在开展胁迫处理时, 为避免高浓度胁迫对植株造成急性损伤, 在每个阶段实施前, 需将托盘中残留溶液清除掉, 模拟植物原本生长地的碱性环境, 每天定时定量施加, 以此保证托盘渗出液 pH 稳定, 并监测植株在整个生长过程中的形态响应, 以此实现后续操作^[35]。所有盆栽置于温室, 每日光照时间 14 小时, 光照强度为 500 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$, 昼夜平均温度 24 $^{\circ}\text{C}$, 空气相对湿度 60%~70%。在此期间, 对狼尾草实验苗定期定量浇水, 并监测土壤含水量, 种植 60 d 之后, 测定狼尾草生物量、根系 AM 真菌侵染率、叶片生理指标以及土壤球囊霉素等参数^[36]。

1.3 根系侵染率指标测定

胁迫结束后, 将狼尾草根系洗净, 选取侧根剪成 1 cm 长度的根段, 运用 FAA 固定液浸没所取根系, 开展 12 h 的固定工作。按照 Phillips^[37]的染色方法, 将根段从 FAA 固定液中取出, 用水冲洗,

沥干, 浸没在 10%KOH 溶液中进行水浴, 90℃加热 1 h 让组织透明, 加热结束后, 倒掉 KOH, 用清水轻轻漂洗根样直至水不再呈黄色。

将根段先放到 10% H_2O_2 中进行脱色处理工作, 时间持续 20 min, 处理后取出, 充分清洗干净, 洗净的根系用 2%HCl 进行酸化处理 10 min, 酸化工作完成后将其转移到含有 0.05%台盼蓝的乳酸甘油染液中, 在 90℃水浴条件下实现加热染色 30 min, 染色结束后, 从每个处理组中随机挑选 45 个根段, 制作成临时装片, 在光学显微镜 ZEISS AxioScopeA1 下对菌丝、丛枝以及孢囊的形态结构开展观察工作。依据 Trouvelot^[38]分级系统记录侵染等级, 并运用 MYCOCALC 软件计算各个处理的菌根侵染指标, 包含侵染率(%)、侵染强度(%)、丛枝丰度(%)以及孢囊丰度(%)等菌根参数^[39]。

1.4 狼尾草生长指标测定

胁迫处理完成后, 从每一个处理组中随机挑选 3 株狼尾草幼苗, 分别对形态及生物量指标开展测定工作。在操作时, 首先要将根系清洗干净, 用无菌滤纸轻轻将表面多余的水分吸掉, 然后将其平铺在根系扫描仪 LA2400 Scanner 的载物平台上, 借助扫描获取完整的根系数字图像, 将得到的图像导入至 WinRhizo Pro 2023 根系分析系统 Version 5.0, Regent Instruments Inc., Quebec, Canada 中进行自动解析, 定量得到根长、根系表面积、平均直径、总体积、根尖数、分枝数以及交叉数等一系列数据。同步测量并记录每一株的叶长、叶宽, 称量单株鲜重, 运用梯度烘干法, 即在 105℃条件下初烘 30 min, 再于 80℃恒温条件下干燥 24 h, 直到两次称量差异微小、达到恒重, 来测定植株的干物质重量^[40]。

1.5 狼尾草生理指标测定

选取不同处理的狼尾草叶片, 运用王学奎和黄见良^[41]的方法开展生理生化指标的测定工作, 选用 95%乙醇浸提法实现叶绿素含量的测定, 运用氮蓝四唑(NBT)还原法^[42]进行超氧化物歧化酶(SOD)活性的测定工作, 采用硫代巴比妥酸法^[43]测定丙二醛含量, 运用酸性茚三酮法进行脯氨酸含量的测定, 将考马斯亮蓝 G-250 染色法作为测定可溶性蛋白含量的方法, 借助蒽酮比色法开展可溶性糖含量的测定, 运用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)的活性, 运用钼酸铵法进行过氧化氢酶(CAT)活性的测定, 借助分光光度计法^[44]开展超氧阴离子自由基含量的测定。

1.6 数据分析

所有试验数据运用 Microsoft Excel 2024 开展整理工作, 在 SPSS 软件中计算各项指标的均值以及标准差, 依次实现单因素方差分析、Duncan 多重检验以及主成分分析, 图形部分统一选用 Origin 2021 绘制。本研究的核心目的是比较碱胁迫条件下 AM 真菌不同处理方式的实际效果, 将无碱胁迫处理(CK)作为衡量胁迫效应的参照基准。为使分析结果更具针对性, 分别对 CK 和 SS 两种环境下的数据进行单因素方差分析, 在各自处理方法中比较 5 种处理间的组间差异, 以明确相同环境背景下不同处理方式在统计学上是否具有显著差异性, 借助李亚莉等^[45]的方法计算各指标隶属函数值并进行综合评价, 计算公式为:

$$X_{\mu} = (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (1)$$

$$X_{\mu} = 1 - (X - X_{\min}) / (X_{\max} - X_{\min}) \quad (2)$$

式中, X 为某一指标测定值; X_{μ} 为隶属函数值; $X_{\min}$ 为所有处理组中该指标的最小值; $X_{\max}$ 为所有处理组中该指标的最大值。若某一指标与耐碱能力呈正相关, 则采用式(1)计算; 若为负相关, 则采用式(2)计算。每个处理组的耐碱能力综合评价值就是将该处理组的隶属函数值进行累加并计算平均值。

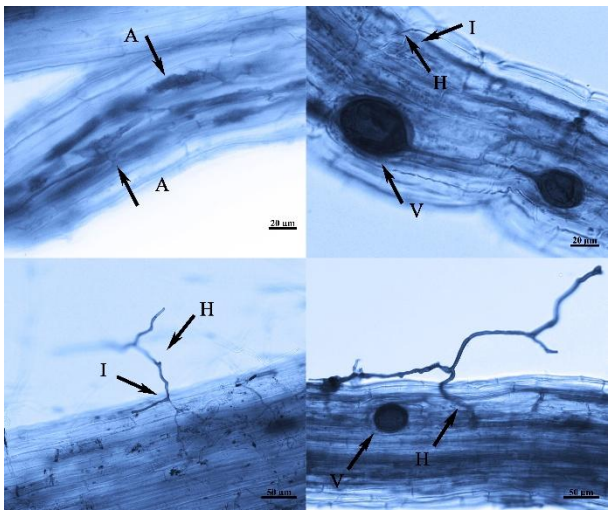
2 结果与讨论

2.1 AM 真菌对狼尾草根系的侵染状况

从图 1 可清楚观察到, 狼尾草根系中形成典型的菌根侵染结构, 该结构囊括菌丝、丛枝、孢囊

以及侵入点,依照表 1 的数据可知,选用接种 AM 真菌处理以及选用灭活 AM 真菌处理的两者之间,侵染特性方面存在显著差异。

在接菌条件下,接种未灭菌的原位土固体菌剂处理 AS,侵染率达到 95.56%,对比 AL 处理组侵染率,二者存在显著差异($P<0.05$),与 AL 相比,AS 的侵染强度提高 58.7%,丛枝丰度提升 172.5%,存在显著优势。而灭活 AM 真菌处理组的菌根侵染基本被完全阻断,只有接种苯菌灵处理的灭菌原位土菌剂 NB 能够检测到极其微弱的侵染。同时所有灭菌处理的丛枝丰度均为零,说明添加 38 μm 滤膜过滤的土壤浸出液或苯菌灵,均未能实现丛枝杆菌正常功能的恢复。碱胁迫(SS)对 AM 真菌的侵染也表现出较强的抑制作用:与未受到胁迫的对照组(CK)比较,胁迫条件(SS)下 AS 处理的侵染强度降低 43.7%,丛枝丰度降低 48.0%,而接种液体菌剂 AL 在胁迫下受到的抑制更为显著。



注: H: 菌丝; V: 泡囊; A: 丛枝; I: 侵入点。Note: H: Hyphae, V: Vesicle, A: Arbuscule, I: Infection site.

图 1 AM 真菌对狼尾草根系的侵染 (以彩图发表)

Fig. 1 Infection of *Pennisetum alopecuroides* root system by AM fungi

表 1 不同处理方式对 AM 真菌侵染特性的影响

Table 1 The influence of different treatment methods on the colonization characteristics of AM fungi

处理方式 Treatment method		侵染率 Colonization rate/%	侵染强度 Colonization intensity	泡囊丰度 Vesicle abundance/%	丛枝丰度 Arbuscule abundance/%
对照	NS	4.45±3.85c	0.40±0.35d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
No alkali	NL	4.45±3.85c	0.53±0.50d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
stress	NB	8.89±3.84c	2.76±3.39d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
applied	AS	95.56±7.70a	26.47±3.93a	13.40±6.42a	7.05±1.56a
(CK)	AL	95.55±3.85a	16.67±2.21b	6.44±0.71b	2.59±0.67bc
碱胁迫	NS	2.22±3.85c	0.20±0.35d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
Alkali	NL	2.22±3.85c	0.20±0.35d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
stress	NB	4.45±3.85c	0.53±0.50d	0.00±0.00c	0.00±0.00d
applied	AS	91.11±7.70a	14.90±1.39b	6.85±1.76b	3.67±2.82b
(SS)	AL	73.33±6.66b	9.33±2.99c	4.57±1.99b	1.40±0.03cd

注：不同小写字母表示不同处理间在 $P<0.05$ 水平差异显著。NS：接种高温高压灭菌原位土菌剂；NL：接种灭菌原位土加经 38 μm 滤膜过滤的土壤浸出液菌剂；NB：接种添加苯菌灵处理的灭菌原位土菌剂；AS：接种未灭菌的原位土固体菌剂；AL：接种未灭菌的原位土液体菌剂（含 AM 真菌孢子的悬浮液），下同。Note: Different lowercase letters indicate statistically significant differences among treatments at the $P<0.05$ level. NS: Inoculated with autoclaved native soil inoculum; NL: Inoculated with sterilized native soil plus 38 μm filtered soil leachate; NB: Inoculated with sterilized native soil treated with benomyl; AS: Inoculated with non-sterilized native solid soil inoculum; AL: Inoculated with non-sterilized native soil liquid inoculant (containing AM fungal spore suspension). The same below.

2.2 AM 真菌对狼尾草生物量和表型的影响

不同处理下狼尾草幼苗的生长状况如图 2 所示，直观呈现碱胁迫以及 AM 真菌接种对于植株生长产生的影响。由表 2 和表 3 的数据可知，碱胁迫条件下狼尾草的各项生长指标均显著低于对照组，地上部分的株高、茎粗以及分蘖数明显降低，同时根系发育也受到抑制，SS 组中接种高温高压灭菌的原位土菌剂处理组 NS，其根系长度与 CK 组相比下降 48.7%，根系表面积减少 44.1%，根系体积降低 38.1%。在该情况下，接菌组在碱胁迫与非碱胁迫条件下均呈现出对植物生长的促进作用。在非碱胁迫条件下，接菌组的株高、茎粗以及分蘖数均高于其他处理组，接种未灭菌的原位土固体菌剂（AS）组与 NS 组相比，株高提升 17.1%，根系长度增加 34.3%，其根系长度、表面积及体积等指标均显著优于灭菌对照组，根系发育指标也高于其他处理组，AS 处理的根系体积为 NB 组的 1.42 倍，达到最大值。AL 处理的根系表面积较 NB 组高出 17.0%。在碱胁迫条件下，各处理组的根系发育虽受到不同程度的抑制，但接种 AM 真菌的处理组，其根系各项指标的绝对值仍显著优于灭菌组，如 AS 处理组的根长较 NS 组增加 77.9%，分蘖数也较 NS 组高出 41.1%，充分说明 AM 真菌对缓解逆境下植物的生长抑制存在实质性影响。相比之下，灭菌处理组的根系指标整体偏低，证实土壤中原有的土著微生物对植物根系的正常生长极为重要。此外，接种添加苯菌灵的灭菌原位土菌剂虽对部分土壤微生物有所抑制，但在 CK 条件下，根系长度仍较 NS 组增加 12.1%，根系表面积增加 15.4%，NB 组根系和地上部分指标仍显著高于灭菌组，说明非 AM 微生物对植物生长也存在一定贡献。而在 SS 条件下，NB 处理组的根系体积与 NS 组相比提高 4.2%，但仍低于 AM 接菌组，说明 AM 真菌存在不可替代性，有着卓越功能和通过丛枝菌丝桥结构直接参与植物养分转运的独特机制^[46]。

表 2 不同处理方式对狼尾草植株地上生长指标的影响

Table 2 Effects of different treatment methods on aboveground growth indicators of *Pennisetum alopecuroides*

处理方式		株高	茎粗	叶长	叶宽	分蘖数
Treatment method		Stem height/cm	Stem diameter/cm	Leaf length/cm	Leaf width/mm	Tiller number/株
对照	NS	52.67±4.04ab	4.37±0.47ab	32.33±3.21a	4.53±0.23a	6.33±0.58ab
No alkali	NL	53.33±6.43ab	4.33±0.40ab	33.83±0.29a	4.62±0.63a	7.33±0.58a
stress	NB	53.00±11.79ab	4.50±0.61ab	34.67±4.51a	4.66±0.56a	7.33±0.58a
applied	AS	61.67±4.73ab	4.67±1.26a	35.00±3.00a	5.00±0.10a	8.00±1.00a
(CK)	AL	56.43±3.86ab	4.57±0.49a	37.00±3.61a	4.90±0.10a	7.67±1.16a
碱胁迫	NS	46.67±1.53b	3.40±0.17b	28.67±2.31a	4.20±0.26a	5.67±1.16b
Alkali	NL	47.33±6.11b	3.53±0.40ab	31.00±3.61a	4.43±0.67a	7.00±1.00ab
stress	NB	48.67±1.16b	3.63±0.15ab	30.17±1.04a	4.47±0.55a	7.33±0.58a
applied	AS	50.00±9.17b	3.80±0.78ab	32.50±5.77a	4.77±0.21a	8.00±1.00a
(SS)	AL	52.33±2.31ab	3.83±0.35ab	32.00±3.61a	4.70±0.56a	7.67±0.58a

表 3 不同处理方式对狼尾草植株地下生长指标的影响

Table 3 Effects of different treatment methods on belowground growth indicators of *Pennisetum alopecuroides*

处理方式		根系长度	根系表面积	根系体积	根系平均直径	根系投影面积
Treatment method		Root length/cm	Root surface area /cm ²	Root volume /cm ³	Average root diameter/mm	Root projected area/mm
对照	NS	325.95±34.81bc	29.22±1.76bc	0.21±0.01bc	0.29±0.01cd	9.3±0.56bc
No alkali	NL	325.27±61.93bc	27.76±5.20c	0.19±0.04cd	0.27±0.02d	8.84±1.66c
stress	NB	365.47±84.03ab	33.73±0.38ab	0.24±0.01bc	0.27±0.01d	11.88±0.05a
applied	AS	437.65±11.81a	37.32±0.16a	0.34±0.07a	0.35±0.03a	12.56±2.62a
(CK)	AL	384.61±5.08ab	39.47±8.23a	0.25±0.01b	0.28±0.01d	10.74±0.12ab
碱胁迫	NS	167.12±5.37d	16.34±0.58e	0.13±0.01e	0.31±0.01bc	5.2±0.184e
Alkali	NL	239.81±20.32cd	20.98±0.64de	0.15±0.01de	0.28±0.02d	6.68±0.21de
stress	NB	248.46±17.10cd	26.46±2.14cd	0.19±0.02cd	0.28±0.02cd	8.21±0.33cd
applied	AS	297.38±29.65bc	29.87±0.69bc	0.24±0.01b	0.34±0.02a	9.2±0.06bc
(SS)	AL	296.74±7.35bc	26.83±1.02c	0.23±0.01bc	0.32±0.001ab	8.42±0.68cd

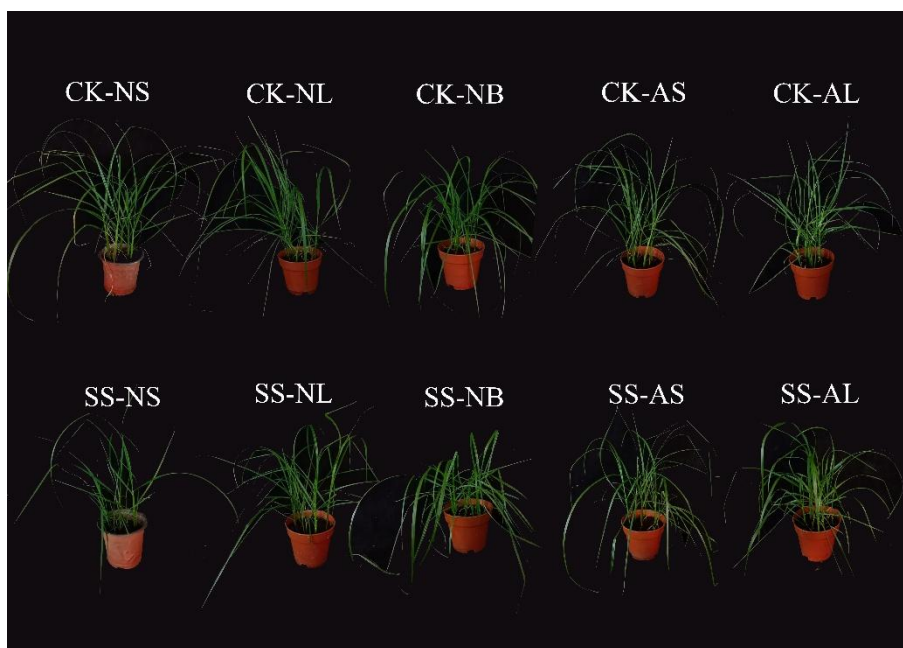


图 2 不同处理下狼尾草幼苗生长状况 (照片摄于接种后 45 天) (以彩图发表)

Fig. 2 Growth status of *Pennisetum alopecuroides* seedlings under different treatments (Photographed at 45 days after inoculation.)

2.3 AM 真菌对狼尾草叶绿素和渗透调节物质含量的影响

从图 3 的堆叠柱状图中可知, 接种 AM 真菌处理组 (AS/AL) 与灭活 AM 真菌处理组 (NS/NL/NB), 在狼尾草渗透调节物质生理指标方面存在显著差异。

根据球囊霉素的各项相关指标进行分析, 接菌处理的 T - GRSP 及 EE - GRSP 的含量, 显著高于灭菌组 ($P<0.05$)。分析光合色素变化时发现, 无论是否存在碱胁迫, 接种 AM 真菌的处理组, 叶绿素 a 以及叶绿素 b 的含量均优于灭菌组, 在接菌处理组中, AS 处理的提升幅度最大, 但 AS

和 AL 间的差距未达到统计学显著性, 即 $P>0.05$ 。类胡萝卜素含量在接菌后同样有所上升, 但各处理间的显著差异只有在无胁迫的对照条件 (CK) 下才可呈现。在 CK 背景下, 接菌组的各项指标整体高于灭菌组, 碱胁迫则明显抑制了 GRSP 与光合色素水平, 各项数值低于 CK 组, 在几种灭菌处理中, NB 处理的表现相对最好, 多数指标均处在前列。由此可分析得出, AM 真菌接种可有效提高狼尾草的 GRSP 含量, 并在一定程度上改善叶片光合色素状况, 但改善效果明显受到碱胁迫条件影响, 其中接种未灭菌的原位土固体菌剂 (AS) 的效果最为突出, 充分说明完整的菌根共生体系对改善植物生理指标起到关键作用。

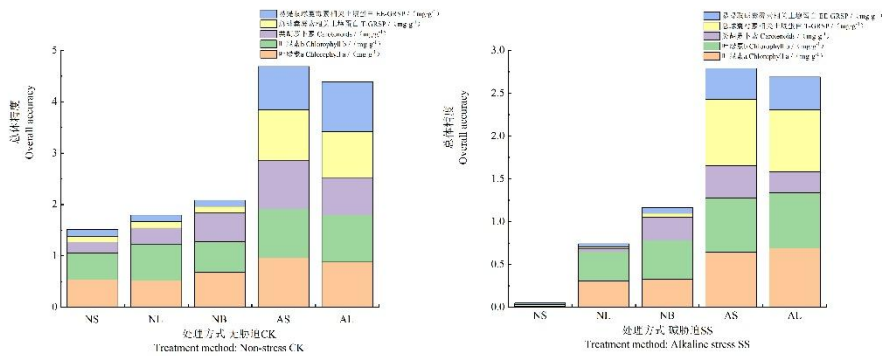


图 3 AM 真菌对狼尾草叶绿素和渗透调节物质含量的影响 (以彩图发表)

Fig. 3 Effects of AM fungi on chlorophyll and osmotic adjustment substance contents in *Pennisetum alopecuroides*

2.4 AM 真菌对狼尾草地上地下生理指标的影响

由表 4 可知, 在同样生长条件下 (CK 组与 SS 组), 接种 AM 真菌的植株生长指标优于灭活 AM 真菌的植株, 其中, 接种未经灭菌的原位土固体菌剂 AS 组的表现最为突出。

在非碱胁迫条件下, 采用 AS 处理的植株鲜重较 NS 组高出 24.5%, 干重上升 17.6%, 可溶性蛋白含量同样提高 10.6%, 在碱胁迫环境下, AS 处理组优势更为突出: 鲜重较 NS 组提高 74.4%, 可溶性糖含量达到 NS 组的 1.23 倍, 但游离脯氨酸含量较 NS 组降低 60.9%, 反映出 AS 处理下植株的抗逆状态更适宜。含水量的变化与整体生物量呈现出相同趋势, SS 条件下 AS 处理的含水量较 NS 组提高 5.3%, 使得植株维持相对更好的水分状况, 对比 CK 组与 SS 组的相应处理得到的生长指标数据, 可发现碱胁迫对狼尾草生长产生抑制, 但无论是否存在碱胁迫, 接种 AM 真菌均促进了狼尾草的长势。在碱胁迫条件下, 接种 AM 真菌下的植物生物量积累得到大幅提升, 还可帮助植株维持较好的水分状况, 以此实现其各项生理功能的正常运转。

表 4 不同处理方式对狼尾草叶片生理指标的影响

Table 4 Effects of different treatment methods on physiological indicators in *Pennisetum alopecuroides* leaves

处理方式		地上部分鲜重	地上部分干重	含水量	可溶性糖	可溶性蛋白	游离脯氨酸
Treatment method		Aboveground fresh weight/g	Aboveground dry weight/g	Water content/%	Soluble sugar/(mg·g ⁻¹)	Soluble protein/(mg·g ⁻¹)	Free proline/(μg·g ⁻¹)
对照	NS	0.98±0.08d	0.17±0.001c	0.83±0.01a	5.15±0.07i	13.16±0.13d	0.10±0.003d
No alkali	NL	1.01±0.05cd	0.19±0.006bc	0.82±0.01ab	5.43±0.07h	13.17±0.04d	0.09±0.01d
stress	NB	1.07±0.03bc	0.17±0.005ab	0.84±0.001a	5.56±0.04g	13.30±0.03cd	0.09±0.01d

applied	AS	1.22±0.07b	0.20±0.002a	0.84±0.001a	5.76±0.10f	14.56±0.07b	0.09±0.05d
(CK)	AL	1.13±0.05a	0.19±0.006a	0.83±0.01a	5.79±0.07f	14.49±0.59b	0.07±0.01d
碱胁迫	NS	0.43±0.03g	0.10±0.009e	0.76±0.02d	7.63±0.07e	13.75±0.09c	0.46±0.08a
Alkali	NL	0.61±0.04f	0.15±0.003d	0.76±0.02d	7.75±0.08d	13.66±0.04c	0.43±0.04a
stress	NB	0.67±0.05ef	0.15±0.02d	0.78±0.01cd	7.63±0.07c	13.75±0.09b	0.46±0.08b
applied	AS	0.75±0.04e	0.15±0.01d	0.80±0.02bc	9.40±0.02a	15.48±0.25a	0.18±0.02c
(SS)	AL	0.73±0.04e	0.15±0.01d	0.80±0.008bc	8.64±0.06b	15.03±0.14a	0.24±0.02b

2.5 AM 真菌对狼尾草抗氧化指标的影响

在碱胁迫条件下,可溶性糖及可溶性蛋白普遍出现升高的现象。无论是否存在碱胁迫,接种 AM 真菌处理的方式提高了狼尾草可溶性糖含量和可溶性蛋白含量,呈现出显著的组间差异,但只有在碱胁迫条件(SS)下,接种未灭菌的原位土固体菌剂组(AS)与接种未灭菌的原位土液体菌剂组(AL)间才呈现出显著差异($P<0.05$)。相对而言,游离脯氨酸的积累呈现出不同趋势,无碱胁迫处理条件下无显著差异,在经过碱胁迫处理后,其含量显著提高,维持在较高水平,且组间差异显著($P<0.05$),灭活 AM 真菌处理组的含量较接种 AM 真菌处理组高,其中接种未灭菌的原位土固体菌剂提高 100%,相比其他组别提升最低。

从图 4 中可以看出,碱胁迫显著增加狼尾草叶片中的丙二醛含量($P<0.05$),对比接种 AM 真菌的处理组(AS/AL)与灭活 AM 真菌处理组(NS/NL/NB)相比,前者 MDA 含量更低,并且接种高温高压灭菌原位土菌剂处理组(NS)及接种灭菌原位土加经 38 μ m 滤膜过滤的土壤浸出液菌剂(NL)的 MDA 含量与接种添加苯菌灵的灭菌原位土菌剂处理(NB)相比无显著差异($P>0.05$)。无论是否存在碱胁迫,接菌处理均呈现出较低的 MDA 累积水平,在无胁迫条件下,接种未灭菌原位土液体菌剂处理(AL)的 MDA 含量与 NS、NL、NB 处理的差异不显著($P>0.05$),在碱胁迫条件下,接种未灭菌的原位土固体菌剂和液体菌剂处理(AS/AL)与灭菌组相比呈现出显著差异($P<0.05$)。

在碱胁迫(SS)条件下,狼尾草叶片中过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)、超氧化物歧化酶(SOD)以及苯丙氨酸解氨酶(PAL)的活性均有一定程度的升高,其中接菌处理组中酶的活性分别较未接菌的碱胁迫组提高了 19.5%、15.2%、11.3%、46.0%,在不同处理条件下,NS 组的 CAT 活性始终维持在较高水平,与 NL 处理之间存在显著差异($P<0.05$)。PAL 活性在碱胁迫下较对照组(CK)明显升高,在 CK 条件下,各个处理组的 POD 和 SOD 活性差异较小,但经过碱胁迫后,接菌处理组间以及其他处理组间均表现出较大差异($P<0.05$),此外,接种未灭菌的原位土固体菌剂 AS 的 PAL 活性同样高于其他处理组。

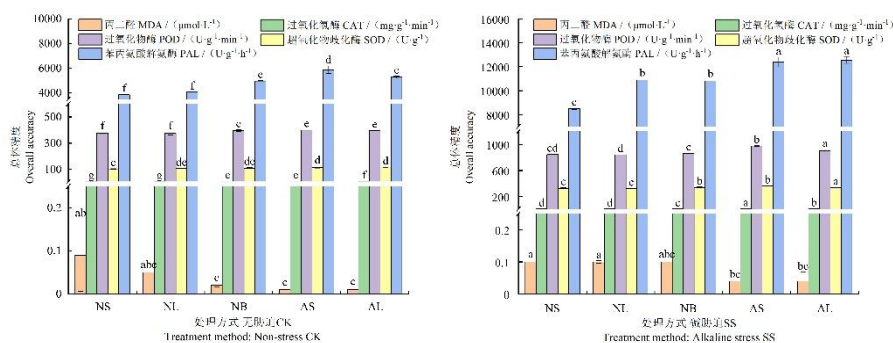


图 4 不同处理方式对 AM 真菌抗氧化指标的影响 (以彩图发表)

Fig. 4 Effects of different treatment methods on antioxidant indices of AM fungi

2.6 AM 菌剂不同处理方式的主成分分析

图 5 中展示了运用主成分分析 (PCA) 获取到的前两个主成分 (PC1 和 PC2) 的得分图, 在该图中, 不同颜色的椭圆代表不同的处理组, 共涉及到 NS、NL、NB、AS、AL 五种处理方式, 前两个主成分共解释了 33.5% 的总变异, 解释率虽属于适中情况, 但依旧能够观察到各个处理组在主成分空间中的分布状况, 其中 NS 与 AL 处理在 PC1 和 PC2 上的得分较为接近, 说明这两组在被分析的变量方面有相似特性, 而 NB 与 AS 处理组则在 PC1 上得分较高, 显示出这些组在某些变量上与其他组存在显著差异。

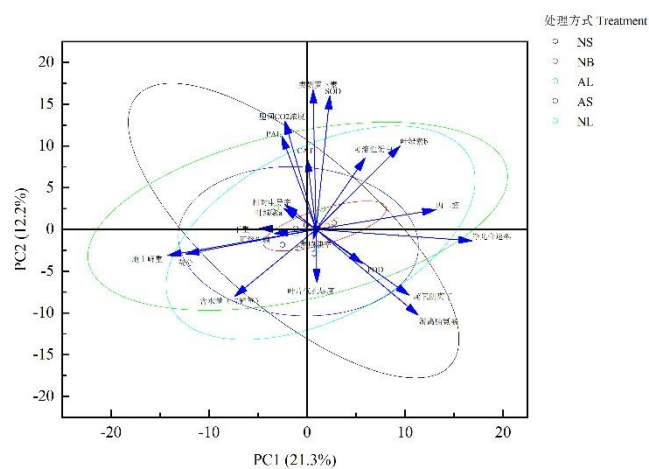


图 5 AM 不同处理方式的主成分分析 (以彩图发表)

Fig. 5 Principal component analysis (PCA) of different treatment methods

图中标注了多个变量的载荷向量, 净光合速率、超氧阴离子、游离脯氨酸、可溶性蛋白、叶绿素 b、类胡萝卜素以及 SOD (超氧化物歧化酶) 的箭头均指向 PC1 的正方向, 意味着这些变量在 PC1 方面的载荷较高, 对 PC1 的贡献较大。相反, 地上鲜重、水分、含水量 (占鲜重)、叶片气孔导度、POD (过氧化物酶)、CAT (过氧化氢酶) 以及 PAL (苯丙氨酸解氨酶) 的箭头则指向 PC1 的负方向, 说明这些变量对于 PC1 的贡献较小或者方向相反。对于 PC2 而言, 胞间 CO_2 浓度、相对电导率以及叶绿素 a 这些变量的箭头较长且指向 PC2 的正方向, 说明它们对于 PC2 的贡献较大, 地上鲜重与灰分等这些变量的箭头较短或指向负方向, 说明它们对于 PC2 的贡献较小或方向相反。

3 讨论

在侵染特征方面, 选用未灭菌的原位土固体菌剂(AS)进行接种, 其侵染率达到了 95.56%, 丛枝丰度为 7.05%, 这两项指标均显著高于其他处理, 说明完整的菌根共生体系能够有效促进植物与真菌互利共生关系形成, 这个结果也契合了 Smith 等^[47]的观点, 即土著微生物以及 AM 真菌协同作用可以有效提高定殖水平。AS 处理组根系发育指标呈现出的优势, 印证了 AM 真菌能够凭借扩展根系的吸收范围提高宿主植物养分获取能力的作用机制, 而接种高温高压灭菌原位土菌剂(NS)的处理,

呈现效果最差,高温灭菌将 AM 真菌灭活,还可能破坏土壤微生物群落结构以及关键理化性质,这一发现支持了 Bowles 等^[48]关于土壤灭菌对微生物功能网络存在负面影响的论点。需要注意的是,接种添加苯菌灵处理的灭菌原位土菌剂(NB)在有效抑制 AM 真菌侵染的植株生长方面,表现优于 NS 与 NL 处理,证实了 AM 真菌与土著微生物的协同作用可以促进植物根系的形态建成^[49],该方法更大程度上保留了非目标微生物的功能活性,是灭菌方法的改进,这一结果与方法学上将苯菌灵作为抑制策略具有一致性,正如 Wang 等^[50]在研究 AM 真菌对作物磷吸收贡献时运用的实验体系,说明 NB 处理可以作为有效区分 AM 真菌特异性功能的实验手段。而碱性胁迫环境下(SS)所有接菌处理的侵染强度均显著降低,可能和高 pH 环境干扰了菌根共生早期的信号交流过程有关,这一推断还需分子生态学实验证据的支持。

从生理响应角度分析,选用接种 AM 真菌的处理组(AS 和 AL),丙二醛含量较灭活 AM 真菌的处理显著降低,同时超氧化物歧化酶及过氧化物酶的活性分别提高 11.3%与 15.2%,说明 AM 真菌可以启动植物自身的抗氧化防御体系,以此降低膜脂过氧化带来的损伤。值得注意的是,在碱胁迫下,AS 处理组的植株,取样时叶片较其他处理组更加鲜绿,氧化受损的痕迹也更轻,这可能是因为它的抗氧化酶活性较高,从而有效清除部分活性氧。脯氨酸的积累模式呈现出显著差异:灭菌处理的脯氨酸含量显著高于 AS 处理组,NS 处理组数值较 AS 处理组高出 60.9%,这一变化趋势与 Chen 等^[51]在玉米中发现的结果相似,即 AM 真菌可能通过替代途径缓解渗透胁迫,减少植物对脯氨酸的依赖,这是一种更为节能的抗逆策略。而接种未灭菌的原位土液体菌剂处理(AL),虽其侵染率为零,但在干重及叶绿素 a 等指标上依然表现良好,并且植株根系发育较好,这可能与滤液中含有 AM 真菌分泌的生长刺激物质有关。另一方面,NB 处理中苯丙氨酸解氨酶的活性升高,苯菌灵在抑制 AM 真菌的同时可能促进了某些有益微生物群落的生长,如促进植物抗逆的根际细菌,这与 Li 等^[52]关于杀菌剂对土壤微生物群落结构非靶向效应的研究结果相符。

从方法学改进角度分析,本研究较为清晰地呈现出不同灭菌策略在解析 AM 真菌与植物交互时期的适宜条件以及各自所存在的不足之处,接种高温高压灭菌的原位土菌剂处理(NS),对植株生长及抗逆性的抑制作用较大,虽成功将 AM 真菌灭活,但同时也破坏了土壤微生物群落的结构与功能,还可能对土壤的理化性质产生不利影响,不适宜用于研究 AM 真菌自身的特异性功能。相较而言,接种灭菌原位土中添加经过 38 μ m 滤膜过滤的浸出液菌剂(NL),有效缓解了 NS 处理造成的负面影响,但由于过滤步骤损失了部分有代谢活性的微生物或胞外分泌物,导致整体改善幅度较为有限。值得关注的是,接种苯菌灵处理过的灭菌原位土菌剂(NB),在灭菌方案中呈现出最好的促生效果以及抗逆维持能力。苯菌灵在有效抑制 AM 真菌的同时能够最大限度保留土壤中其他非目标微生物的功能活性,从方法学角度分析,这一结果证实了 NB 处理可以作为一种有效的技术手段,用来区分 AM 真菌自身效应以及土壤微生物背景的效应,为在更贴近自然土壤微生态的环境下解析 AM 真菌的特异性功能提供可行办法。需要注意的是,苯菌灵对于土壤 pH 等理化性质产生的潜在影响仍需留意,后续研究中可对此进行细致评估。直接施用未灭菌的原位土固体菌剂(AS)处理组,在促进植株生长及提高抗逆性方面表现最为突出,反映出 AM 真菌与完整土壤微生物群落间可能存在协同效应,而接种未灭菌的原位土液体菌剂(AL)处理,尽管其菌根侵染率较低,但是植株生物量及叶绿素含量仍优于灭菌处理,表明菌剂中的某些活性物质可以直接或间接地对植物生长进行调控。

综上,本研究系统比较不同菌剂处理带来的生物学效应,明确了 AM 真菌在提高植物耐碱能力方面的作用,也为今后相关研究中依据研究目的选用适宜灭菌方法提供思路。在后续工作中,可将分子生态学技术与同位素示踪等方法结合,对互作机制开展更深入的解析,以揭示 AM 真菌发挥功能的途径及其与宿主植物的互作模式。尽管本研究取得一些重要发现,但仍存在以下局限性:试验材料仅选取狼尾草一种植物,未来可扩展至更多耐盐碱物种,以检验 AM 真菌作用的普适性;苯菌灵处理的长期生态效应目前还未明确,其对于土壤健康及植物生长的持续性影响还需凭借长期监测进行评估。从应用方面评估,本研究成果为盐碱地的生态修复提供理论依据及技术支撑。从实践角

度分析, 建议优先运用含有活性 AM 真菌的原位土进行接种, 可以有效提高植物的存活率以及生长表现, 而实验设计中若需要灭活 AM 真菌, 则苯菌灵处理可作为可靠的选择。此外, 研究提示, 在盐碱地改良过程中应当重视土壤微生物多样性的保护, 充分发挥其生态功能。

4 结 论

鉴于上述研究成果分析可知, AM 真菌的不同处理方式会对植株生长产生较大影响, 接种 AM 真菌能够使狼尾草在碱胁迫之下的生存能力显著提高, 并且接种未灭菌的原位土固体菌剂呈现出独特的促生效果, 说明 AM 真菌可能借助与植物互惠共生的方式发挥作用。依据对不同灭菌方法的对比, 添加苯菌灵处理的灭菌原位土菌剂 (NB) 的灭菌效果较好, 有效抑制微生物活性的同时最大程度地保留了土壤原本的理化特性, 可以作为较好的灭菌办法。接种高温高压灭菌原位土菌剂

(NS) 对土壤微生态造成严重破坏, 需要注意其带来的负面影响。综上所述, 选择灭活 AM 真菌的接种菌剂时, 可优先选用苯菌灵处理的原位土, 在有效灭活 AM 真菌的同时将对土壤理化性质的影响降到最低, 并且避免运用高温高压法灭活原位土, 这一办法在改变土壤理化性质的同时对土壤中其他微生物也会产生影响, 不能保证试验的准确性。在接菌处理时, 可优先选择带有活性 AM 真菌的原位土进行接菌, 其次选择 AM 真菌孢子悬浮液。综上, AM 真菌的不同处理方式会对 AM 真菌自身产生影响, 并且也会对土壤理化性质及土壤微生物造成影响, 二者与宿主植物的生长以及生理特性存在密切联系。此外, 研究发现, 宿主植物的生长及生理特性也和 AM 真菌本身存在相关性, 在碱胁迫条件下开展 AM 真菌相关研究时, 应充分考虑并选择适宜的处理方式, 从而更准确、高效地研究植物、土壤微生物以及土壤理化性质间的复杂关系, 为后续的科研试验提供可靠依据。

参考文献 (References)

- [1] Gao Q, Lu N. Current status and prospect of research on comprehensive management and development of saline-alkali land[J]. China Southern Agricultural Machinery, 2021, 52(16): 153-155. [高倩, 卢楠. 盐碱地综合治理开发研究现状及展望[J]. 南方农机, 2021, 52(16): 153-155.]
- [2] Sun R B, Zhang F L, Zong J W, et al. Research progress on the role of microorganisms in the remediation of saline-alkali land[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2025, 52(2): 14-30. [孙瑞波, 章凤玲, 宗静雯, 等. 微生物在盐碱地改良中的作用研究进展[J]. 广东农业科学, 2025, 52(2): 14-30.]
- [3] Munns R, Tester M. Mechanisms of salinity tolerance[J]. Annual Review of Plant Biology, 2008, 59: 651-681.
- [4] Xiao W L, Wang H R, Wang M L, et al. Mechanisms of plant response to saline-alkali stress: A review[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2024, 40(33): 78-85. [肖雯丽, 王含瑞, 王梦亮, 等. 盐碱胁迫下植物响应机制的研究进展[J]. 中国农学通报, 2024, 40(33): 78-85.]
- [5] Ye B Y, Yu Y, He P Y, et al. Remediation of saline-alkali soil microecology by a combined system of mycorrhizal fungus-*Bacillus subtilis*[J]. China Environmental Science, 2025, 45(1): 440-449. [叶玢妤, 俞跃, 何沛益, 等. 丛枝菌根真菌-枯草芽孢杆菌组合体系对盐碱土壤微生态的修复作用[J]. 中国环境科学, 2025, 45(1): 440-449.]
- [6] Yang Y Q, Guo Y. Unraveling salt stress signaling in plants[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2018, 60(9): 796-804.
- [7] Yu H Q. The symbiotic relationship of Am fungi and the Chenopodiaceae plant in saline and alkaline land[D]. Changchun: Northeast Normal University, 2015. [于宏清. AM 真菌与盐碱地藜科植物的共生关系[D]. 长春: 东北师范大学, 2015.]

- [8] Wang B Q, Yan T Q. Research status and prospect of soil salinization control in northeast, northwest, North China and coastal areas of China[J]. Agricultural Science and Engineering in China, 2025, 37(4): 33-41. [王波清, 颜庭琦. 我国东北、西北、华北、沿海地区土壤盐碱化治理的研究现状与展望[J]. 中国农业文摘-农业工程, 2025, 37(4): 33-41.]
- [9] Zhang S B, Wang Y S, Zhang M Q, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of *Leymus chinensis* under salt stress[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 786-795. [张淑彬, 王幼珊, 张美庆, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌对羊草生长和生理特性的影响[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 786-795.]
- [10] Chen D Y, Li Y, Zhang R K, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi improve the adaptation of a high-latitude population of the invasive plant *Wedelia trilobata* to low-temperature stress[J]. Microbiology China, 2025, 52(12): 5765-5778. [陈戴一, 李颖, 张蕊科, 等. 丛枝菌根真菌提高入侵植物南美蟛蜞菊高纬度种群对低温胁迫的适应性[J]. 微生物学通报, 2025, 52(12): 5765-5778.]
- [11] Zhou Y, Xie K, Cai H, et al. Influence of exogenous melatonin and arbuscular mycorrhizal fungi on growth and physiological characteristics of *Rosa chinensis* seedling under salt stress[J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2024, 44(3): 370-380. [周英, 谢科, 蔡汉, 等. 盐胁迫下外源褪黑素和丛枝菌根真菌对月季幼苗生长生理特性的影响[J]. 西北植物学报, 2024, 44(3): 370-380.]
- [12] Unger S, Habermann F M, Schenke K, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi and nutrition determine the outcome of competition between *Lolium multiflorum* and *Trifolium subterraneum*[J]. Frontiers in Plant Science, 2021, 12: 778861.
- [13] He X L, Yang H Y, Zhao L L. Effects of AM fungi on growth and element absorption of *Lycium barbarum* seedlings under salt stress[J]. Acta Pedologica Sinica, 2019, 56(1): 189-199. [贺学礼, 杨宏宇, 赵丽莉. 盐胁迫下 AM 真菌对宁夏枸杞幼苗生长和元素吸收的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 189 - 199.]
- [14] Wu Y F, Xue M L, Wei W S. Exploratory research on saline-alkali land remediation technologies[J]. Modern Salt and Chemical Industry, 2025, 52(1): 9-11. [武迎飞, 薛美玲, 魏文硕. 盐碱地治理技术探索研究[J]. 现代盐化工, 2025, 52(1): 9-11.]
- [15] Xu J M. Research on the diversity and function of AM fungi in the rhizosphere of *Syneilesis aconitifolia* of Songnen saline-alkali grassland[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. [徐嘉美. 松嫩盐碱草地兔儿伞根围 AM 真菌多样性与功能研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.]
- [16] Du L J, Liu Y C, Shi Y Y, et al. Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the growth and mechanism of different apple cultivar under salt-alkali stress[J]. Acta Horticulturae Sinica, 2025, 52(9): 2410-2424. [杜丽君, 刘英材, 史妍妍, 等. 丛枝菌根真菌对苹果品种耐盐碱的影响及缓解机理[J]. 园艺学报, 2025, 52(9): 2410-2424.]
- [17] Wang Q Q, Gui H P, Luo T, et al. Research progress in arbuscular mycorrhizal fungi improving plant salt tolerance[J]. Microbiology China, 2025, 52(9): 3923-3936. [王倩倩, 贵会平, 罗彤, 等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐性的研究进展[J]. 微生物学通报, 2025, 52(9): 3923-3936.]
- [18] Chen B D, Wang E T. Research prospects on ecology, physiology and application technology of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Bulletin of Botanical Research, 2025, 45(3): 329-332. [陈保冬, 王二涛. 丛枝菌根生态生理与应用技术研究展望[J]. 植物研究, 2025, 45(3): 329-332.]
- [19] Guo N, Zhang Y, Liu X Y, et al. Research progress on the physiological mechanism of arbuscular mycorrhizal fungi in improving plant salt tolerance[J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2023, 51(4): 16-23. [郭娜, 张玥, 刘贤雍, 等. 丛枝菌根真菌提高植物耐盐性生理机制研究进展[J]. 江苏农业科学, 2023, 51(4): 16-23.]

- [20] Yang M H, Liu Y J, Li N, et al. Effects of common mycorrhizal networks on the growth and alkali tolerance of *Pennisetum alopecuroides* under different planting patterns[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2026, 35(2): 179-194. [杨梦慧, 刘雅洁, 李娜, 等. 不同种植模式下的菌根网络对狼尾草生长与耐碱性的影响[J]. 草业学报, 2026, 35(2): 179-194.]
- [21] Chen Q Y, Zeng W Z, Liang X R, et al. Effect of benomyl on inhibition of arbuscular mycorrhizal fungi on cadmium migration in polluted soil-corn system[J]. Soils, 2024, 56(2): 375-381. [陈起跃, 曾文增, 梁新然, 等. 施苯菌灵抑制丛枝菌根真菌对污染土壤-玉米系统镉迁移的影响[J]. 土壤, 2024, 56(2): 375-381.]
- [22] Wang M. Cultivation techniques and garden application of *Pennisetum*[J]. Hebei Forestry, 2022(3): 35. [王曼. 狼尾草栽培技术与园林应用[J]. 河北林业, 2022(3): 35.]
- [23] Zhang H S, Zhou X H, Qiao G H, et al. Study on wild species of *Pennisetum* and their utilization value[J]. China Herbivores, 2010, 30(1): 41-44. [张怀山, 周学辉, 乔国华, 等. 狼尾草属野生种及其利用价值研究[J]. 中国草食动物, 2010, 30(1): 41-44.]
- [24] Lin Y, Chen Y B, Lin S F, et al. Effect of the physiological character of two *Pennisetum alopecuroides* L. *Pennisetum* forced by salt and alkali[J]. Fujian Science & Technology of Tropical Crops, 2023, 48(1): 5-9. [林莹, 陈雅彬, 林淑芬, 等. 盐碱胁迫对两种狼尾草生理特性的影响[J]. 福建热作科技, 2023, 48(1): 5-9.]
- [25] Bai S S, Wang Z F, Song X L, et al. The growth performance of *Pennisetum* forage varieties in Shandong[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(19): 131-136. [柏杉杉, 王兆凤, 宋希亮, 等. 狼尾草属牧草品种在山东的生长表现[J]. 中国农学通报, 2023, 39(19): 131-136.]
- [26] Wang X R, He H, Xiong C Y, et al. Evaluation on the growth status of five ornamental grasses in Yulin[J]. Journal of Yulin University, 2025, 35(2): 64-67. [王晓荣, 何欢, 熊超亿, 等. 五种观赏草在榆林市的生长状况评价[J]. 榆林学院学报, 2025, 35(2): 64-67.]
- [27] Li Y X, Han Y L, Shi Y Y, et al. Analysis of current research status of *Pennisetum* based on bibliometrics[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2025(3): 6-13. [李奕昕, 韩玉兰, 石尧余, 等. 基于文献计量的狼尾草属植物研究现状浅析[J]. 草学, 2025(3): 6-13.]
- [28] Chen Z T, Huang Q L, Pan W B, et al. Sequence analysis of the rDNA ITS region of *Pennisetum* species (Poaceae)[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2010, 19(4): 135-141. [陈志彤, 黄勤楼, 潘伟彬, 等. 狼尾草属牧草 rDNA 的 ITS 序列分析[J]. 草业学报, 2010, 19(4): 135-141.]
- [29] Chen L L. Characteristics of main forage varieties of *Pennisetum* in China[J]. China Dairy Cattle, 2012(3): 5-8. [陈卢亮. 我国狼尾草属牧草主栽品种特性介绍[J]. 中国奶牛, 2012(3): 5-8.]
- [30] Xin J N, Xu W, Wang Z Y, et al. Application of *Pennisetum alopecuroides* as ornamental grass[J]. Grassland and Turf, 2013, 33(5): 90-93. [信金娜, 徐威, 王志英, 等. 狼尾草作为观赏草的应用[J]. 草原与草坪, 2013, 33(5): 90-93.]
- [31] Hou J Q, Zhang M Y, Duan J X, et al. Research progress on grassland establishment and improvement of *Pennisetum clandestinum* cv. whittet[J]. Journal of Grassland and Forage Science, 2023(6): 1-6. [侯洁琼, 张美艳, 段佳鑫, 等. 威提特东非狼尾草在人工草地建植和改良中的研究进展[J]. 草学, 2023(6): 1-6.]
- [32] Wang D, Yuan F, Chen M, et al. Response of energy plant *Pennisetum americanum* $\times$ *P. purpureum* to NaCl stress and its salt tolerance threshold[C]//Proceedings of the 7th Congress of Shandong Society of Plant Physiology and Symposium on Plant Biology and Modern Agriculture. Society of Plant Physiology, 2012: 113. [王殿, 袁芳, 陈敏, 等. 能源植物杂交狼尾草对 NaCl 胁迫的响应及其耐盐阈值[C]//山东植物生理学会第七次代表大会暨植物生物学与现代农业研讨会论文集. 2012: 113.]

- [33] Williams A, Lenton T M. Experimental protocols for manipulating the plant-soil microbiome[J]. *Methods in Ecology and Evolution*, 2023, 14(1): 206-221.
- [34] Wang Z H, Liu Y J, Jin Y, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi inoculation and association with *Chloris virgata* on growth and physiological characteristics of *Leymus chinensis* under salt stress[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2024, 46(6): 22-35. [王子贺, 刘雅洁, 金蕴, 等. 盐胁迫下丛枝菌根真菌接种和虎尾草伴生对羊草生长和生理特性的影响[J]. *中国草地学报*, 2024, 46(6): 22-35.]
- [35] Feng Y T, Luo L X, Xu Q, et al. Effects of soda-alkali stress on seed germination and seedling growth in *Pennisetum glaucum* L.[J /OL]. *Acta Agrestia Sinica*, <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251210.1131.002>. [奉雨婷, 罗李旋, 徐倩, 等. 苏打碱胁迫对美洲狼尾草种子萌发和幼苗生长的影响[J /OL]. *草地学报*, <https://link.cnki.net/urlid/11.3362.S.20251210.1131.002>.]
- [36] Lu X Y, Liu Y J, Bai C X, et al. Effects of *Chloris virgata* and arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of *Leymus chinensis* under alkali stress[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(11): 69-83. [卢晓瑜, 刘雅洁, 白彩霞, 等. 虎尾草伴生和丛枝菌根真菌对碱胁迫下羊草生长的影响[J]. *草业学报*, 2024, 33(11): 69-83.]
- [37] 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-IN18.
- [38] Trouvelot A, Kough J L, Gianinazzi-Pearson V G. Mesure du taux de mycorhization VA d'un systeme racinaire. Recherche de methodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle[M]. Paris: INRA Press, 1986.
- [39] Liu Y J. Study on AM fungal community structure at different vegetation succession stages in Songnen saline-alkaline grassland [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2023. [刘雅洁. 松嫩盐碱草地不同植被演替阶段的 AM 真菌群落结构研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2023.]
- [40] Fang L L, Zhou Y H, Yang C X. Physiological characteristics of arbuscular mycorrhiza-*Rudbeckia hirta* symbiont under saline-alkali stress[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2023, 43(3): 421-431. [方林林, 周昀晖, 杨春雪. 丛枝菌根-黑心菊共生体对盐碱逆境的生理响应特性[J]. *西北植物学报*, 2023, 43(3): 421-431.]
- [41] Wang X K, Huang J L. Principles and techniques of plant physiological biochemical experiment[M]. 3rd ed. Beijing: Higher Education Press, 2015. [王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 3 版. 北京: 高等教育出版社, 2015.]
- [42] Gao J F. Experimental guidance for plant physiology[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [高俊凤. 植物生理学实验指导[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [43] Liu P, Li M J. Plant physiology experiment[M]. 2nd ed. Beijing: Science Press, 2016. [刘萍, 李明军. 植物生理学实验[M]. 2 版. 北京: 科学出版社, 2016.]
- [44] Li Z G, Gong M. Improvement on determination of superoxide anion radical in plants[J]. *Acta Botanica Yunnanica*, 2005, 27(2): 211-216. [李忠光, 龚明. 植物中超氧阴离子自由基测定方法的改进[J]. *云南植物研究*, 2005, 27(2): 211-216.]
- [45] Li Y L, Ma R, Ma Y J, et al. Effects of salt and drought stresses on seeds germination and seedlings growth of *Kalidium foliatum*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2023, 31(12): 3715-3723. [李亚莉, 马瑞, 马彦军, 等. 盐旱胁迫对盐爪爪种子萌发及幼苗生长的影响[J]. *草地学报*, 2023, 31(12): 3715-3723.]
- [46] Pu Z T, Wang F, Li C, et al. Research progress of arbuscular mycorrhizal fungi affecting plant nitrogen absorption and transport[J]. *Journal of Agricultural Science and Technology*, 2024, 26(11): 171-179. [蒲

- 子天, 王菲, 李畅, 等. 丛枝菌根真菌影响植物氮素吸收和转运的研究进展[J]. 中国农业科技导报, 2024, 26(11): 171-179.]
- [47] Smith S E, Anderson I C, Smith F A. Mycorrhizal associations and phosphorus acquisition: From cells to ecosystems[J]. Annual Plant Reviews, 2015, 48:409-440.
- [48] Bowles T M, Jackson L E, Cavagnaro T R. Mycorrhizal fungi enhance plant nutrient acquisition and modulate nitrogen loss with soil water dynamics[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2018, 126:158-168.
- [49] Zhou X G, Hu Y T, Zhao T T, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth and nutrient uptake of *Leymus chinensis* under nitrogen addition[J]. Chinese Journal of Grassland, 2024, 46(5): 44-51. [周小国, 胡雨彤, 赵婷婷, 等. 氮添加下丛枝菌根真菌对羊草生长及养分吸收的影响[J]. 中国草地学报, 2024, 46 (5): 44-51.]
- [50] Wang W X, Shi J C, Xie Q J, et al. Nutrient exchange and regulation in arbuscular mycorrhizal symbiosis[J]. Molecular Plant, 2017, 10(9): 1147-1158.
- [51] Chen S C, Zhao H J, Zou C C, et al. Combined inoculation with multiple arbuscular mycorrhizal fungi improves growth, nutrient uptake and photosynthesis in cucumber seedlings[J]. Frontiers in Microbiology, 2017, 8: 2516.
- [52] Li X G, Jousset A, de Boer W, et al. Legacy of land use history determines reprogramming of plant physiology by soil microbiome[J]. The ISME Journal, 2019, 13(3): 738-751.

(责任编辑: 檀满枝)