

高雁琳,李钧敏,闫明.接种AMF对煤矿废弃物上高丹草根系生长及抗氧化酶系统的影响[J].江苏农业科学,2016,44(12):452-456.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.12.135

接种 AMF 对煤矿废弃物上高丹草根系生长及抗氧化酶系统的影响

高雁琳¹,李钧敏^{2,3},闫明¹

(1. 山西师范大学生命科学学院,山西临汾 041004; 2. 浙江省植物进化生态学与保护重点实验室,浙江台州 318000;
3. 台州学院生态研究所,浙江台州 318000)

摘要:采用盆栽试验方法,以高丹草为研究对象,选用摩西球囊霉(*Glomus mosseae*)和地表球囊霉(*Glomus versiforme*),分别研究单接种和混合接种对粉煤灰(S1)、煤矸石(S2)和粉煤灰与煤矸石混合物(S3)3种基质上高丹草(*Sorghum bicolor* × *S. sudanense*)根系形态及抗氧化酶系统的影响,并以正常沙土(S4)作为对照。结果表明:煤矿区废弃物基质上高丹草根系的生长受到抑制,接种AM真菌减缓了高丹草根系生长受抑制的程度,促进根长、根表面积、根体积、根生物量的显著增加;高丹草根系SOD、POD、CAT活性显著提高,MDA含量降低。AM真菌可通过调节高丹草根系形态,提高根系抗氧化酶活性,增强高丹草在煤矿废弃物复合逆境中的抗逆性,并且接种摩西球囊霉对粉煤灰以及粉煤灰和煤矸石混合基质上高丹草根系的促进作用最佳,而接种地表球囊霉更适于煤矸石基质上高丹草根系的生长。

关键词:丛枝菌根真菌(AMF);煤矿废弃物;高丹草;根系形态;抗氧化酶

中图分类号: X171.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)12-0452-05

煤矿开采对环境造成极大扰动,引发了一系列亟待解决的生态环境问题,如水土流失、土地贫瘠化、盐碱化等。采煤沉陷区是煤矿废弃地复垦的主要类型之一,其治理也是目前矿区生态修复的重大难题。充填复垦是采煤沉陷区植被重建的主要方式之一,而煤矸石和粉煤灰是目前充填复垦的主要材料^[1],然而,其具有物理结构不良、保水保肥能力差、营养元素缺乏、重金属浓度高、盐分含量过高、极端pH值以及微生物区系稀少且活性极低等许多不利因子^[2],可引起植物生长及其生理活性的降低,最终导致植被退化,因此,增强煤矿

废弃地植被抗逆性、提高植物成活率具有实际意义。丛枝菌根真菌(arbuscular mycorrhizal fungi, AMF)存在于几乎所有类型的土壤中,可以与陆地上绝大部分的高等植物物种形成互惠共生体^[3],改善植物对水分和矿质营养的吸收,增强植物对高盐度及重金属等不利因子的耐性^[4-5],提高植物存活率,促进植物生长。

目前,煤矿区AM真菌的研究,一方面集中在对煤矿区AM真菌的调查、分类以及优势AM真菌的筛选^[6-7],另一方面集中在通过接种AM真菌对煤矿区土壤进行改良(如土壤肥力、土壤酶活性^[8-9]等)以及对植物进行修复(如促进矿质营养的吸收^[10-11]和对重金属的吸收与转移^[12]等方面)。植物根系是吸收水分和养分并进行物质转化的重要器官,其生长发育及形态特征直接影响地上部的形态建成和物质积累,同时也是AM真菌侵染和最先感受煤矿废弃物不利因子复合胁迫信号的部位^[13]。AM真菌如何影响煤矿废弃物在复合逆境中植物根系的形态及抗氧化酶系统,能否促进根系的生长、

收稿日期:2015-10-08

基金项目:国家自然科学基金(编号:30800133,31270461);山西师范大学基金(编号:ZR1211)。

作者简介:高雁琳(1988—),女,山西朔州人,硕士,主要从事菌根生态学研究。E-mail:cgssayll@126.com。

通信作者:闫明,博士,副教授,硕士生导师,主要从事植被生态学研究。E-mail:mycorrhiza@sina.com。

fluorescein[J]. Reactive and Functional Polymers, 2006, 66(11): 1227-1239.

[6] 李小花,马会民,董素英,等.一种新的荧光素类荧光探针的设计合成及其在血清中组氨酸的选择性标记[J].高等化学学报,2003,24(11):1984-1986.

[7] 付川,郭劲松,祁俊生,等.长江(万州段)水体溶解性有机物的荧光光谱分析[J].长江流域资源与环境,2009,18(9):856-859.

[8] 李海峰,王庆仁,朱永官.土壤重金属测定两种前处理方法的比较[J].环境化学,2006,25(1):108-109.

[9] Sjöback R, Nygren J, Kubista M. Absorption and fluorescence properties of fluorescein[J]. Spectrochimica Acta Part A: Molecular Biomolecular Spectroscopy, 1995, 51(6): L7-L21.

[10] 赵雅萍,王军锋,陈甫华.载铁(Ⅲ)-配位体交换棉纤维素吸附剂对饮用水中砷(V)和氟联合去除的研究[J].高等学校化学学报,2003,24(4):643-647.

[11] 高洪苓,张虹,康怀萍,等. Fe(Ⅲ)与两种4-羟基吡啶二酸形成的配合物的合成与晶体结构[J].无机化学学报,2007,23(6):1099-1102.

[12] 王丽平,章明奎.不同来源重金属污染土壤中重金属的释放行为[J].环境科学研究,2007,20(4):134-138.

[13] 林建伟,王里奥,赵建夫,等.三峡库区生活垃圾的重金属污染程度评价[J].长江流域资源与环境,2005,14(1):104-108.

[14] 杨清伟,丁蔚,王图锦,等.小江回水区水体重金属污染状况调查与评价[J].重庆第二师范学院学报,2015,28(1):164-167.

提高抗氧化酶的活性、增强植物的抗逆性,目前相关研究较少。因此,本研究以高丹草为试验材料,分析了单接种和混合接种 AM 真菌对不同类型煤矿区废弃物上高丹草根系形态、根系活力和抗氧化酶活性的影响,并进一步筛选出不同类型的煤矿废弃物上高丹草接种的最适 AM 菌种,以期运用菌根技术提高煤矿区植被恢复效果提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 试验材料

菌种摩西球囊霉 (*Glomus mosseae*, BGC NM01A) 和地表球囊霉 (*Glomus versiforme*, BGC GD01C), 由北京市农林科学院植物与营养资源研究所提供, 接种剂为以高粱为宿主植物繁殖的土沙混合物, 内含被感染根段、孢子和菌丝。高丹草 [*Sorghum bicolor* (L.) Moench × *Sorghum sudanense* (Piper) Stapf, 晋草 1 号] 种子由山西省临汾市小麦研究所提供。供试基质为煤矸石 (取自山西省临汾市煤运公司煤炭转运站)、粉煤灰 (取自山西省漳泽电力临汾热电公司) 及土沙混合物 (黄土和河沙体积比为 3:1)。煤矸石过 3 mm 筛, 黄土、河沙和粉煤灰过 1 mm 筛, 经 121 °C 高温高压蒸汽灭菌 2 h, 取出放置 1 周后备用。栽培容器为棕色圆形塑料花盆 (盆口直径 18 cm × 盆底直径 14 cm × 盆高 15 cm)。

1.2 试验设计与处理

采用随机区组设计, 设定 2 个因素: 菌根和基质。菌根有 4 个水平: 不接种对照 (CK)、接种 *G. mosseae* (*G. m*)、接种 *G. versiforme* (*G. v*) 以及两者混合接种 (*G. mv*); 基质有 4 个水平: 粉煤灰、煤矸石、粉煤灰与煤矸石混合物 (体积比为 1:4) 以及沙土混合物 (体积比为 1:3), 依次编号 S1、S2、S3、S4, 供试基质基本理化性质见表 1。每个处理设 4 个重复, 共计 64 盆。2014 年 6 月 2 日挑选籽粒饱满、大小均一的种子, 置于 10% H₂O₂ 中表面消毒 10 min, 无菌水冲洗 5 次, 置于 25 °C 培养箱中的湿润纱布上催芽, 种子露白即可播种。每盆装厚度约 8 cm 的灭菌基质, 粉煤灰、煤矸石、粉煤灰与煤矸石混合物及沙土混合物的质量分别为 1 405、1 785、1 598、2 250 g, 其上覆盖灭菌沙土 800 g, 厚度约为 3 cm, 采用菌种层接法, 分别称取接种剂 *G. m*、*G. v* 以及 2 种菌剂按 1:1 比例混合均匀后的接种剂各 120 g, 将 60 g 菌剂均匀撒施在土壤表面, 放入已催芽的种子 20 粒, 在其上覆盖 60 g 菌剂, 再覆盖沙土 220 g, 厚度约为 1 cm。不接种处理采用相同方法加入 120 g 的灭菌菌剂。

表 1 供试基质基本理化性质

基质	pH 值	全氮 含量 (g/kg)	全磷 含量 (g/kg)	速效氮 含量 (mg/kg)	速效磷 含量 (mg/kg)	速效钾 含量 (mg/kg)	有机质 含量 (g/kg)
S1	7.92	0.25	0.12	12.31	7.36	85.49	9.83
S2	4.73	0.31	0.18	25.70	10.36	62.35	18.72
S3	6.82	0.28	0.15	21.03	9.12	74.80	15.95
S4	6.98	0.97	0.23	73.29	10.56	124.73	26.59

1.3 测定参数和方法

2014 年 8 月 31 日收苗, 将整个植株连同花盆一起浸泡在水中, 将植株从花盆中小心取出, 洗净后, 用 WinRHIZO 根系分析仪测定根表面积、根体积和根平均直径; 用 Phillips and Hayamn^[14] 方法进行染色, 统计菌根侵染率; 将收获的植株根

系置于烘箱中, 105 °C 烘干至恒重称质量, 计算生物量。

采用 TTC 法测定根系活力; 采用 NBT 法测定 SOD 活性; 采用愈创木酚法测定 POD 活性; 采用紫外吸收法测定 CAT 活性; 采用硫代巴比妥酸法测定丙二醛 (MDA) 含量^[15]。

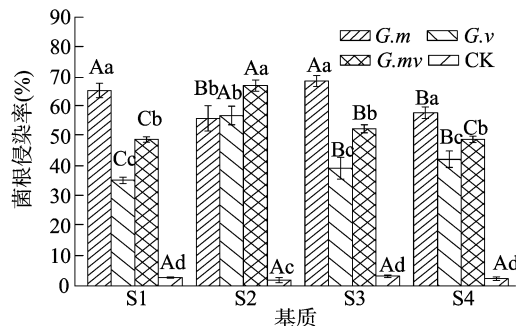
1.4 统计分析

所有试验数据用 SPSS 17.0 进行平均值和标准误差的计算, 并进行方差分析和邓肯多重比较。

2 结果与分析

2.1 接种 AM 真菌对高丹草根系菌根侵染率的影响

由图 1 可知, 4 种基质上 3 种接种处理均获得较高的菌根侵染率, 且均存在显著性差异, 未接种处理菌根侵染率极低。在基质 S1、S3 和 S4 上接种 *G. m* 处理菌根侵染率均为最高 ($P < 0.05$), 分别为 65.41%、68.59%、58.00%, 接种 *G. v* 处理菌根侵染率均较低, 分别为 35.36%、39.44%、42.39%; 而在 S2 基质上接种 *G. mv* 处理菌根侵染率显著高于其他 2 种接种处理, 为 67.14%, 接种 *G. m* 和 *G. v* 处理间菌根侵染率差异不显著。接种 *G. m* 处理基质 S1 和 S3 间菌根侵染率差异不显著, 基质 S2 和 S4 间无显著差异。接种 *G. v* 和 *G. mv* 处理基质 S2 上菌根侵染率显著高于其他基质, 未接种处理 4 种基质间菌根侵染率无显著差异。



不同小写字母表示同一基质下不同处理间在 0.05 水平上差异显著, 不同大写字母表示同一处理下不同基质间在 0.05 水平上差异显著。下同

图 1 接种 AM 真菌对不同煤矿废弃物上高丹草菌根侵染率的影响

2.2 接种 AM 真菌对高丹草根系形态、生物量和根系活力的影响

4 种基质上接种 AM 真菌显著增加了植物根系活力、根长、根表面积、根体积和根生物量, 显著降低根平均直径 (图 2, $P < 0.05$)。在基质 S1 上, 3 种接种处理间根体积差异不显著, 接种 *G. v* 和 *G. mv* 处理间根长、根表面积、根生物量差异不显著, 显著低于接种 *G. m* 处理。在基质 S2 上, 接种 *G. v* 和 *G. mv* 处理间根长差异不显著, 接种 *G. v* 处理根表面积、根体积和根生物量显著高于其他接种处理。在基质 S3 和 S4 上, 接种 *G. m* 处理根长、根表面积、根体积和根生物量均显著高于其他接种处理; 基质 S4 上接种 *G. v* 和 *G. mv* 处理间根长和根体积差异不显著。基质 S1、S3 和 S4 上接种 *G. v* 和 *G. mv* 处理间根平均直径差异不显著, 但显著高于接种 *G. m* 处理; 基质 S2 上 3 种接种处理间根平均直径无显著差异。在基质 S1 和 S4 上, 接种 *G. m* 处理根系活力显著高于其他接种处理; 在基质 S2 上, 3 种接种处理间根系活力差异不显著; 在基质 S3 上接种 *G. m* 和 *G. mv* 处理间根系活力差异不显著, 显著高于

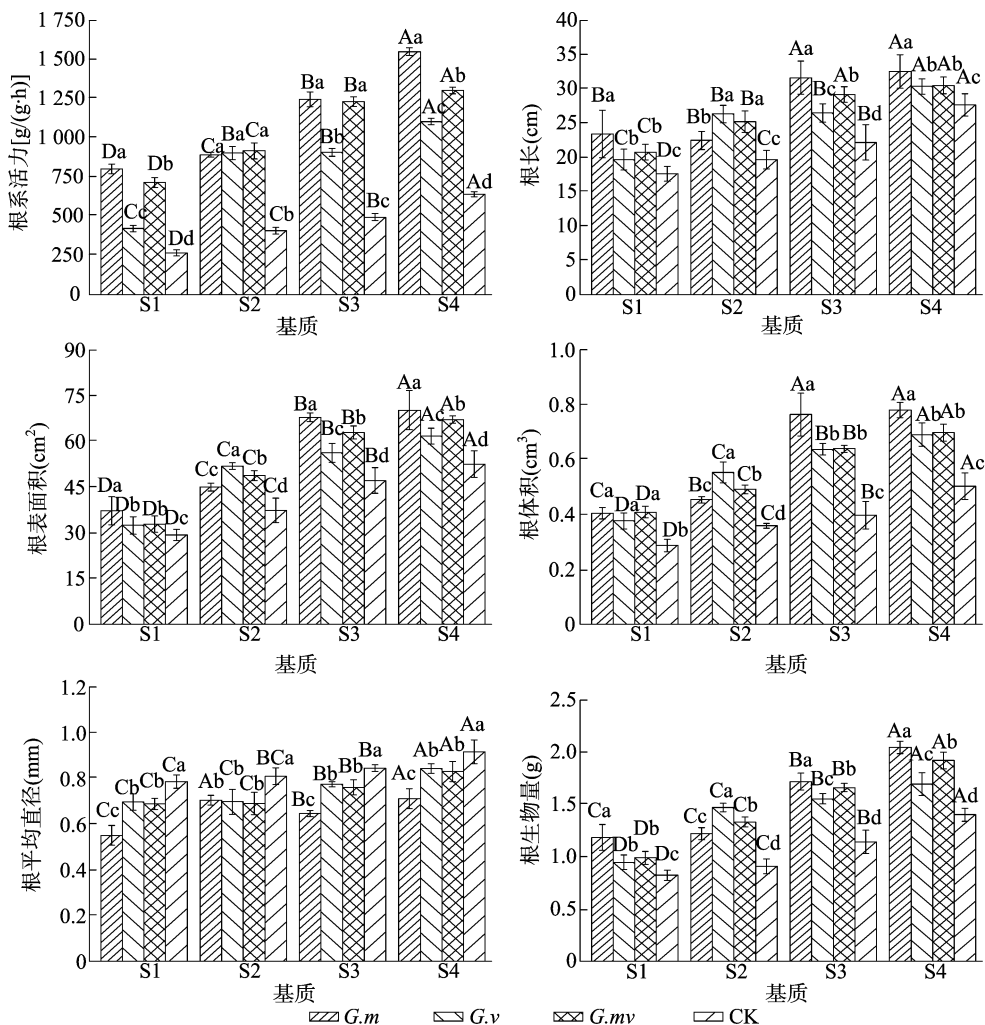


图2 接种 AM 真菌对不同煤矿废弃物基质上高丹草根系形态、生物量和根系活力的影响

接种 *G.v* 处理。基质 S4 根平均直径显著高于其他 3 种基质, 3 种矿区废弃物基质中基质 S3 上高丹草其他各指标均高于基质 S1 和 S2。

2.3 接种 AM 真菌对高丹草根系抗氧化酶和 MDA 含量的影响

从图 3 可以看出, 与未接种处理相比, 接种 AM 真菌显著提高了 SOD、POD、CAT 活性, 降低了 MDA 含量。基质 S1、S2 和 S4 上, 接种 *G.v* 和 *G.mv* 处理间 SOD、CAT 活性差异不显著; 基质 S1 和 S4 上, 两者均显著低于接种 *G.m* 处理; 在基质 S2 上两者均显著高于接种 *G.m* 处理。基质 S1 和 S3 上接种 *G.m* 处理 POD 活性显著高于其他接种处理, 接种 *G.v* 处理显著低于其他接种处理 ($P < 0.05$); 在基质 S2 和 S4 上, 接种 *G.v* 和 *G.mv* 处理间 POD 活性差异不显著。基质 S1 上, 接种 *G.m* 处理 MDA 含量显著低于其他接种处理; 在基质 S2 上, 3 种接种处理间 MDA 含量差异不显著; 在基质 S3 和 S4 上接种 *G.v* 和 *G.mv* 处理间 MDA 含量差异不显著, 显著高于接种 *G.m* 处理。3 种矿区废弃物基质上高丹草 SOD、POD、CAT 活性以及 MDA 含量显著高于基质 S4。基质 S3 上高丹草根系 SOD、POD、CAT 活性显著高于其他 2 种煤矿废弃物基质, MDA 含量显著低于其他 2 种煤矿废弃物基质。

2.4 高丹草根系抗氧化酶活性 MDA 含量与其他各指标相

关性分析

由表 2 可知, 菌根侵染率与根系活力、CAT 活性呈极显著正相关, 与根平均直径和 MDA 含量呈极显著负相关, 与根体积、根生物量呈显著正相关, 与根表面积、根长、SOD 活性和 POD 活性呈正相关, 但未达显著水平; SOD 活性和 POD 活性与根平均直径均呈显著负相关, 与其他根系参数呈正相关, 未达显著水平; CAT 活性与根系活力、根表面积和根体积呈显著正相关, 与根长和根生物量呈正相关, 未达显著水平; MDA 含量与根平均直径呈正相关, 未达显著水平, 与其他各参数呈极显著负相关。

3 讨论

本试验中, 4 种基质上 3 种接种处理均具有较高的菌根侵染率, 表明 AM 真菌与高丹草建立了良好的共生关系。4 种基质不同, 菌根侵染率以及菌种间的相互作用有差异, 这种差异可能是因为 4 种基质的 pH 值、营养成分和有机质含量以及基质类型等理化性质存在显著差异 (表 1), 菌根侵染率及菌种间的相互作用受到基质类型、pH 值、矿质营养和有机质含量等理化性质以及宿主植物等因素的综合影响。菌根与基质以及宿主植物之间存在一定的选择性, 不同菌种对不同基质的适应和生存能力以及宿主植物的亲和力不同, 从而造

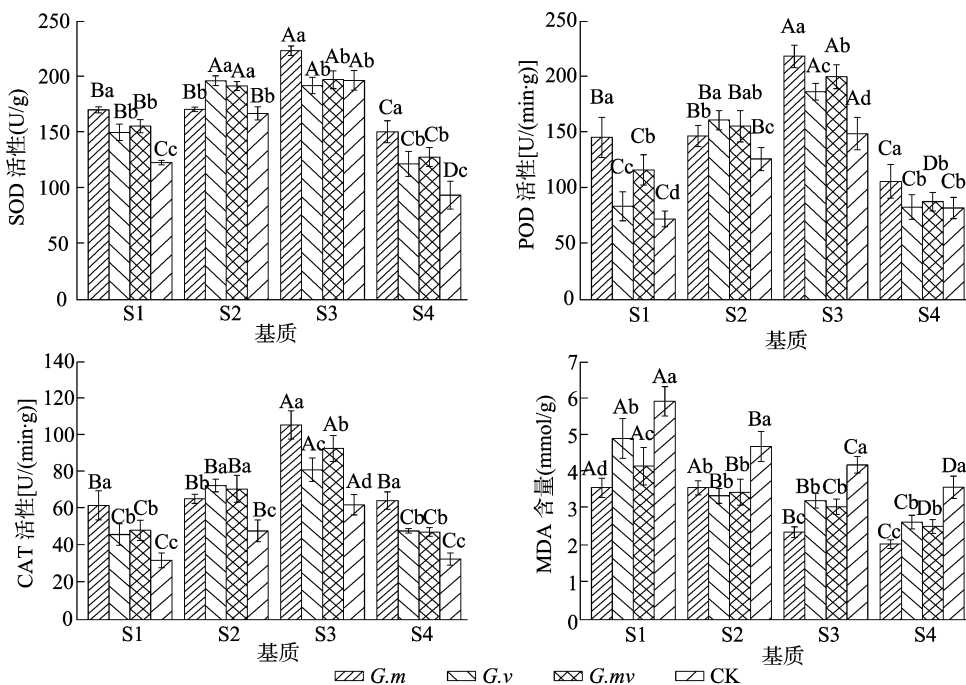


图3 接种 AM 真菌对不同煤矿废弃物上高丹草根系抗氧化酶活性和 MDA 含量的影响

表 2 高丹草根系抗氧化酶和 MDA 含量与其他各指标的相关系数

项目	菌根侵染率	根系活力	根表面积	根体积	根长	根平均直径	根生物量
菌根侵染率	1	0.716 **	0.401	0.532 *	0.492	-0.732 **	0.502 *
SOD 活性	0.452	0.197	0.157	0.159	0.076	-0.519 *	0.068
POD 活性	0.468	0.324	0.317	0.308	0.261	-0.418 *	0.220
CAT 活性	0.625 **	0.554 *	0.522 *	0.542 *	0.475	-0.453	0.449
MDA 含量	-0.645 **	-0.945 **	-0.911 **	-0.930 **	-0.947 **	0.086	-0.937 **

注：“*”代表在 0.05 水平显著相关，“**”表示在 0.01 水平显著相关。

成 AM 真菌的侵染率以及菌种之间的相互作用不同^[16]。

在土壤逆境胁迫条件下,植物最先感受逆境胁迫的器官是根系。重金属、盐碱以及养分缺乏等胁迫条件均会抑制植物根系生长^[17-19]。本试验结果表明,煤矿废弃物基质上高丹草根系生长受到抑制,接种 AM 真菌显著增加了根长、根表面积、根体积,提高了根系活力,从而影响根系生物量,这与张中锋等研究结果^[18]以及相关性分析结果一致。表明在煤矿废弃物复合逆境中 AM 真菌可能通过一定的途径调整高丹草根系代谢途径和方向,改变碳同化产物的分配比例和方向,进而改变根系形态和分布,增加了高丹草根系与土壤的接触面积,促进了高丹草根系对水分和养分的吸收以及碳水化合物向根系的积累和分配,从而维持其功能行为,提高了高丹草对煤矿废弃物复合逆境胁迫的抗性。此外,AMF 可诱导高丹草根系产生更多生长素,且 AMF 孢子自身含有的微量生长素也可转移到高丹草根系中,促进根系生长发育。在煤矿废弃物复合逆境中接种 AM 真菌高丹草根平均直径显著降低,相关性分析表明菌根侵染率与根平均直径呈极显著负相关,说明 AM 真菌可能诱导高丹草根系更细小,使其易从煤矿废弃物中吸收更多的水分和养分。一般认为,AM 真菌对宿主植物侵染率越高,对促进植物生长的可能性也就越大^[20]。本试验中基质 S1、S3 和 S4 均符合这一规律,这与赵仁鑫等的研究结果^[2,21]一致;然而在基质 S2 上,混合接种处理对高丹草的侵染率较其他接种处理高,但对高丹草根系生长的促进效果反

而低于接种 *G. v* 处理,这与 Bi 等的研究结果^[22]相似。这表明菌根对宿主植物的作用不完全由侵染率决定,可能与由于煤矿废弃物基质类型、条件以及菌种的适应性不同,造成菌根共生关系中成本-收益不平衡有关。4 种基质上高丹草根系生长表现为 S4 > S3 > S2 > S1,这与王辉等的研究结果^[23]相似,说明与粉煤灰相比,高丹草更适合在煤矸石上生长,粉煤灰和煤矸石按一定比例混合可对粉煤灰和煤矸石的理化性质起到一定的改良作用。

研究表明,正常情况下,植物细胞内自由基的产生与清除处于动态平衡状态,逆境胁迫下(如重金属、盐碱以及养分缺乏等)该平衡受到破坏,导致植物体内活性氧、自由基大量积累,引发膜脂过氧化作用,细胞膜系统受损,膜脂过氧化产物 MDA 积累,对植物造成严重伤害^[19]。本试验中,3 种煤矿废弃物基质上高丹草根系中 MDA 含量显著高于正常基质,接种 AM 真菌显著降低了根系中 MDA 含量,这与谢翔宇等的研究结果^[19,24]一致。表明煤矿废弃物复合逆境中高丹草根系活性氧含量增加,导致膜脂过氧化程度加剧,接种 AMF 可减缓该逆境下高丹草根系中膜脂过氧化程度,减轻细胞膜系统损伤。在逆境胁迫下,SOD、POD 和 CAT 是植物的重要保护酶类。植物体内存在一个由 SOD、POD 和 CAT 等组成的活性氧自由基清除系统,正常环境下,SOD、POD、CAT 及其他保护物质能够维持植物体内 ROS 的产生和清除处于动态平衡状态,从而降低 ROS 对植物细胞膜结构造成伤害的可能性^[19]。

本试验发现,3 种煤矿废弃物基质上高丹草根系 SOD、POD、CAT 活性均高于正常基质,说明高丹草根系感受到煤矿废弃物基质不利因子的胁迫信号时,由于自身的应激能力,可通过提高根系抗氧化酶活性来适应煤矿废弃物的不良环境,郭绍霞等也发现了类似结果^[25]。接种 AM 真菌显著提高了煤矿废弃物上高丹草根系中 SOD、POD 和 CAT 的活性,相关性分析结果证明了这一点。说明在煤矿废弃物复合逆境中接种 AMF 可能促进了 3 种酶在 mRNA 水平上的表达^[26],增加了高丹草根系抗氧化酶活性,增强了根系中自由基的清除能力,降低了 MDA 含量,从而减轻了煤矿废弃物不利因子对高丹草造成的膜伤害,增强其抗逆性。相关性分析显示,高丹草根长、根表面积、根体积和根生物量与根系抗氧化酶活性呈正相关关系,与 MDA 含量呈负相关,表明 AM 真菌可通过改善高丹草根系酶促反应系统,提高根系抗氧化酶活性,降低膜脂过氧化程度,来缓解煤矿废弃物不利因子对高丹草根系的复合胁迫,影响其根系生长发育,提高其对该复合逆境的抗逆性。

4 结论

3 种煤矿废弃物基质上,高丹草根系生长受到抑制,根系形态指标和生物量显著降低,MDA 含量增加,由于高丹草自身对煤矿废弃物基质不利因子的应激能力,根系抗氧化酶活性显著增加。AM 真菌很好地侵染了高丹草根系,接种 AM 真菌显著提高了高丹草的根系活力,增加了根长、根表面积、根体积和根生物量,诱导高丹草根系保护酶(SOD、POD 和 CAT)活性提高,降低了膜脂过氧化产物 MDA 含量,从而缓解了煤矿废弃物基质的不利因子对根系造成的损伤,维持高丹草的正常生长,提高其在煤矿废弃物复合逆境中的抗逆性,并且接种 *G. m* 对粉煤灰以及粉煤灰和煤矸石混合基质上高丹草根系的促进作用最佳,而接种 *G. v* 更适于煤矸石基质上高丹草根系的生长。因此,在煤矿区废弃地生态恢复中,为更好地发挥菌根的作用,应针对不同类型煤矿废弃地接种不同的 AM 真菌,在一定程度上可解决矿区废弃地植被生长受胁迫和易退化等问题,提高植被恢复效果。

参考文献:

- [1] 袁宵梅,李光,陈永胜. 浅析煤矿开采对环境的影响及对策[J]. 煤矿开采,2008,13(6):33-35.
- [2] 赵仁鑫,郭伟,付瑞英,等. 丛枝菌根真菌在不同类型煤矸石山植被恢复中的作用[J]. 环境科学,2013,34(11):4447-4454.
- [3] Smith S E, Read D J. Mycorrhizal symbiosis [M]. London: Academic Press, 2008:31-35.
- [4] Estrada B, Aroca R, Barea J M, et al. Native arbuscular mycorrhizal fungi isolated from a saline habitat improved maize antioxidant systems and plant tolerance to salinity [J]. Plant Science, 2013, 201/202: 42-51.
- [5] 刘润进,李晓林. 丛枝菌根及其应用[M]. 北京:科学出版社, 2000:125-128.
- [6] 杜涛. 煤炭开采对植物根际微环境影响规律及生态修复效应[D]. 北京:中国矿业大学,2013:12.
- [7] 于森. 采煤沉陷区生态演替规律及菌根修复作用与后效研究[D]. 北京:中国矿业大学,2014:15-17.
- [8] Qian K M, Wang L P, Yin N N. Effects of AMF on soil enzyme activity and carbon sequestration capacity in reclaimed mine soil[J]. International Journal of Mining Science and Technology, 2012, 22(4): 553-557.
- [9] Li S P, Bi Y L, Kong W P, et al. Effects of the arbuscular mycorrhizal fungi on environmental phytoremediation in coal mine areas [J]. Environmental Science, 2013, 34(11):4455-4459.
- [10] Channabasava A, Lakshman H C, Muthukumar T. Fly ash mycorrhizoremediation through *Paspalum scrobiculatum* L. inoculated with *Rhizophagus fasciculatus* [J]. Comptes Rendus Biologies, 2015, 338(1):29-39.
- [11] Guo W, Zhao R, Fu R, et al. Contribution of arbuscular mycorrhizal fungi to the development of maize (*Zea mays* L.) grown in three types of coal mine spoils [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2014, 21(5):3592-3603.
- [12] Zhao R Z, Guo W, Bi N, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi affect the growth, nutrient uptake and water status of maize (*Zea mays* L.) grown in two types of coal mine spoils under drought stress [J]. Applied Soil Ecology, 2015, 88:41-49.
- [13] 李杰,杨萍,颀建明,等. 2,4-表油菜素内酯对低温胁迫下辣椒幼苗根系生长及抗氧化酶系统的影响[J]. 核农学报, 2015, 29(5):1001-1008.
- [14] Phillips J M, Hayman D S. Improved procedures for clearing root 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.
- [15] 高俊凤. 植物生理学试验指导[M]. 北京:高等教育出版社, 2006:77-79.
- [16] 毕银丽,吴福勇,柳博会. AM 真菌在煤矿废弃物中生态适应性的初步研究[J]. 菌物学报,2005,24(4):570-575.
- [17] Duan L, Sebastian J, Dinnyen J R. Salt-stress regulation of root system growth and architecture in *Arabidopsis* seedlings [J]. Methods in Molecular Biology, 2015, 1242:105-122.
- [18] 张中峰,张金池,黄玉清,等. 水分胁迫和接种菌根真菌对青冈栎根系形态的影响[J]. 生态学杂志,2015,34(5):1198-1204.
- [19] 谢翔宇,翁铂森,赵素贞,等. Cd 胁迫下接种丛枝菌根真菌对秋茄幼苗生长与抗氧化酶系统的影响[J]. 厦门大学学报:自然科学版,2013,52(2):244-253.
- [20] Hallett P D, Feeney D S, Bengough A G, et al. Disentangling the impact of AM fungi versus roots on soil structure and water transport [J]. Plant Soil, 2009, 314(1):183-196.
- [21] 邹英宁,吴强盛,李艳,等. 丛枝菌根真菌对枳根系形态和蔗糖、葡萄糖含量的影响[J]. 应用生态学报,2014,25(4):1125-1129.
- [22] Bi Y L, Li X L, Christie X L, et al. Growth and nutrient uptake of arbuscular mycorrhizal maize in different depths of soil overlying coal fly ash [J]. Chemosphere, 2003, 50(6):863-869.
- [23] 王辉,卞正富,马昌忠,等. 采煤废弃物对作物生长的影响[J]. 农业环境科学学报,2005,24(增刊1):209-211.
- [24] 王明元,夏仁学. 缺铁和过量重碳酸盐胁迫下丛枝菌根真菌对枳活性氧代谢的影响[J]. 广西植物,2010,30(5):661-665.
- [25] 郭绍霞,陈丹明,刘润进. 盐水胁迫下接种 AM 真菌对牡丹幼苗抗氧化酶活性的影响[J]. 园艺学报,2010,37(11):1796-1802.
- [26] 刘爱荣,陈双臣,刘燕英,等. 丛枝菌根真菌对低温下黄瓜幼苗光合生理和抗氧化酶活性的影响[J]. 生态学报,2011,31(12):3497-3503.