

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.03.034.

全民, 杜昕鹏, 毕银丽. 露天矿排土场接种 AMF 对 3 种植物根系发育与土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持研究, 2024, 31(3): 187-194.

Quan Min, Du Xinpeng, Bi Yinli. Effects of AMF Inoculation on Root and Aggregate Stability of Three Plant Species in Open Pit Dump [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(3): 187-194.

露天矿排土场接种 AMF 对 3 种植物根系发育与土壤团聚体稳定性的影响

全民¹, 杜昕鹏², 毕银丽^{2,3}

(1. 神华准格尔能源有限责任公司, 内蒙古 鄂尔多斯 010300; 2. 中国矿业大学(北京)

煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 北京 100083; 3. 西安科技大学 西部矿山生态修复研究院, 西安 710054)

摘要: [目的] 探究丛枝菌根真菌(AMF)对植物根系和土壤团聚体稳定性的影响规律, 为露天矿排土场生态修复提供理论基础。[方法] 对复垦 3 年的紫穗槐、沙棘、柠条 3 种植物的对照和接种样地的土壤理化性质、土壤酶活性、植物根系形态、土壤团聚体稳定性等指标进行采样和测定, 并进行相关性分析。[结果] 3 种植物接种处理能够显著提高植物根系的平均直径, 接种样地是对照的 1.33~2.24 倍; 在压实土壤条件下, 菌丝可能一定程度上代替植物细根系为植物提供水分和养分, 使紫穗槐和沙棘样地接种降低了根系的总根长。接种显著提高了土壤酶活性, 增加了土壤有机质含量, 碱性磷酸酶活性最高提高了 335.62%, 脲酶活性最高提高了 44.73%, 易提取球囊霉素含量最高提高了 82.56%, 土壤有机质含量最高提高了 64.74%。接种通过增加土壤有机质含量, 提高土壤酶活性等途径, 显著增强了土壤团聚体的稳定性, 平均重量直径提高了 24.14%~34.29%, 团聚体破坏率降低了 18.25%~24.35%。[结论] 露天矿排土场接种 AMF 能够显著提高土壤生物活性, 提高养分含量, 促进植物根系发育, 从而提高土壤团聚体的稳定性。

关键词: 新成排土场; 团聚体稳定性; 根系形态特征; 土壤酶活性

中图分类号: S156

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)03-0187-08

Effects of AMF Inoculation on Root and Aggregate Stability of Three Plant Species in Open Pit Dump

Quan Min¹, Du Xinpeng², Bi Yinli^{2,3}

(1. Shenhua Group Zhungeer Energy Co., Ltd., Ordos, Inner Mongolia 010300, China; 2. Institute of Mine Ecological Restoration, China University of Mining and Technology (Beijing), Beijing 100083, China; 3. Institute of Ecological Environment Restoration in Mine Area of West China, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the effect of arbuscular mycorrhizal fungi AMF on the stability of plant roots and soil aggregates, and to provide a theoretical basis for the ecological restoration of open pit dump. [Methods] Soil physicochemical properties, soil enzyme activities, plant root morphology, soil aggregate stability and other indexes of 3 species of *Amorpha fruticosa*, *Hippophae rhamnoides*, *Caragana korshinskii* were sampled and measured in the control and inoculated plots. Correlation analysis was conducted for each index. [Results] The average root diameter of the three plants could be significantly increased by inoculation, and the inoculation plot was 1.33~2.24 times that of the control. Under the condition of compacted soil, mycelia to some extent provided water and nutrients for plants instead of fine roots, which reduced the total root length of root system. Inoculation significantly increased soil enzyme activity and soil organic matter content, alkaline phosphatase activity increased by

收稿日期: 2023-05-27

修回日期: 2023-06-23

资助项目: 国家重点研发计划项目(2022YFF1303303); 国家自然科学基金(51974326)

第一作者: 全民(1980—), 男, 内蒙古通辽人, 学士, 工程师, 主要从事矿区生态修复研究。E-mail: 863501813@qq.com

通信作者: 毕银丽(1971—), 女, 陕西米脂人, 博士, 长江学者特聘教授, 博士生导师, 主要从事矿区生态修复研究。E-mail: ylb88@126.com

http://stbcyj.paperonce.org

335.62%, urease activity increased by 44.73%, extractable balloon amycin content increased by 82.56%, soil organic matter content increased by 64.74%. By increasing soil organic matter content and soil enzyme activity, inoculation significantly enhanced the stability of soil aggregates, increased the average weight diameter by 24.14%~34.29%, and reduced the failure rate of aggregates by 18.25%~24.35%. [Conclusion] Inoculation of AMF in open pit dump can significantly improve soil biological activity, increase nutrient content, promote plant root development, and thus improve the stability of soil aggregates.

Keywords: new dumping site; aggregate stability; root morphological characteristics; soil enzyme activity

煤炭是我国主要能源,但是煤炭开采在促进我国经济建设和社会发展的同时也带来了一系列的生态环境问题^[1-2]。露天开采为煤炭主要的开采方式之一,在开采过程中,大面积的土地和植被遭到破坏,倒堆排放形成了大型的露天排土场^[3-4]。排土场在堆积过程中大型机械压实及无序堆放使得其土壤结构较差^[5],自然条件下,排土场土壤改良与生态恢复十分缓慢。生态工程是加速这一进程的有效途径之一,而植物修复是防止水土流失、恢复生态系统完整性最常用手段之一^[6]。丛枝菌根真菌(AMF)可以与大部分陆生植物共生,形成菌根共生体^[7],增加植物的抗逆性,改变根系形态,调节根系水力导度,帮助植物吸收养分,促进植物生长^[8-9];菌根也可以通过影响微生物群落、分泌有机化合物以及菌丝缠绕等过程来影响团聚体的形成与稳定^[10]。尤其是丛枝菌根真菌菌丝会分泌一种特异性蛋白—球囊霉素相关蛋白(GRSP)具有“超级胶水”的功能,是影响土壤团聚体形成和稳定的重要因素^[11]。钟思远等^[12]研究了南亚热带不同演替阶段土壤团聚体和微生物群落特征,结果表明 AMF 能够通过分泌 GRSP、改变土壤微生物群落、促进土壤碳固持等措施影响南亚热带森林土壤结构稳定性;吴强盛等^[13]盆栽条件下研究 AMF 对根际土壤水稳性团聚体粒级分布和稳定性中指出根系菌根侵染率显著地促进 GRSP 的含量,GRSP 主要对<1 mm 粒级水稳性团聚体产生正效应;冯固等^[14]应用三室根箱装置研究了 AMF 菌丝对沙土水稳性大团聚体形成的作用,结果表明菌根菌丝对 5~2 mm 和 2~1 mm 水稳性团聚体的形成主要是通过其分泌物粘结和菌丝网络对土壤的缠绕作用所致。

目前,关于丛枝菌根真菌对土壤团聚体稳定性影响的研究多集中在农田或草地^[15-16],露天矿排土场为新成土壤,生态修复难点是土壤结构差、养分贫瘠、生物群落结构被破坏等^[17-18],露天矿排土场人工植被接种 AMF 是否会对植物根系和土壤团聚体稳定产生影响尚不清楚,AMF 在矿区生态修复及土壤改良中的作用机理有待做进一步研究。因此,本研究以黑岱沟露天矿排土场为研究对象,野外监测 3 种植物接种

AMF 修复 4 a 后,对植物根系形态及土壤团聚体稳定性的影响,深入分析土壤团聚体稳定性、植物根系形态、土壤酶活、菌丝分泌物以及土壤理化性质间的相互作用关系,以期揭示接种 AMF 在露天煤矿排土场不同植物复垦中对土壤团聚体稳定性的影响规律,为露天矿排土场生态恢复提供理论基础。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于鄂尔多斯市准格尔旗薛家湾镇黑岱沟露天煤矿排土场(111°13′—111°20′E,39°43′—39°49′N)。属中温带半干旱大陆性气候,年均降雨量 400 mm 左右,年均蒸发量 2 000 mm 左右,降雨多集中在 7—9 月份,占全年降水量的 60%~70%,年均气温为 7.2℃,最大冻土深度为 1 490 mm,日照时长为 3 119.3 h。该区地处黄土高原鄂尔多斯台地东北部,为黄土丘陵沟壑区,土壤类型为黄绵土。自然植被为铁杆蒿(*Artemisia gmelinii*)、芨芨蒿(*Artemisia giraldii*)、长芒草(*Stipa bungeana*)和白羊草(*Bothriochloa ischaemum*)等组成的处于不同演替阶段的草本植物群落^[13]。

1.2 试验材料

试验小区位于黑岱沟露天煤矿的内排土场,试验区域为 2018 年新成排土场,共设置 6 个试验小区,其规格为长 44 m,宽 34 m,小区间隔 6 m。2018 年 4 月,分别种植 3 种植物(柠条、沙棘、紫穗槐),每种植物设置接菌和对照 2 个处理,每个小区共种植 16 行,每行 21 株,接种菌剂为 AM 真菌中的摩西管柄囊霉(*Funneliformis mosseae*, F.m),菌剂直接施加在植物根部,每株植物施加 50 g,菌剂在植物种植过程中一次性施入。各小区种植完成后,进行灌溉并达到土壤最大饱和持水量,每周 1 次,连续灌溉 1 个月。

1.3 试验设计与采样

于 2021 年 5 月在 6 个试验小区进行取样,采用 5 点取样法,即在试验小区的东、西、南、北、中各选取 1 块 1 m×1 m 的样地,共计 30 块样地,在每个样地内距离植物 30 cm 处取 0—20 cm 的原状土各 1.5 kg,装入铝盒内运回实验室,运输过程中避免挤压和扰动,

样品于室内通风阴凉处自然风干,用于土壤团聚体测量;每个样地在距离植物 30 cm 处采用根钻法取 0—20 cm 范围内植物根系,根系过 2 mm 筛洗净后使用 scan maker i800 pluse 根系扫描仪进行根系扫描;同时采用环刀法测量土壤容重,烘干法测量土壤含水率,0—20 cm 土壤混合后装入自封袋并用冰袋低温保存,带回实验室进行土壤酶活性等指标的测定。

1.4 样品分析

土壤团聚体分组采用 O'Brien 的方法进行^[19], 5~2 mm 为大型大团聚体(LMA), 2~0.25 mm 为小型大团聚体(SMA), 0.25~0.053 mm 为游离微团聚体(MIA), <0.053 mm 为未团聚粉/黏粒组分(NA-S/C)。具体操作为:干筛法测定各粒径团聚体含量,采用 ZS-200 型电动振筛机与 5 mm, 2 mm, 0.25 mm, 0.53 mm 套筛组合,将风干样放入筛中振筛 30 min,筛分后称其重量计算质量比。土壤水稳性团聚体采用土壤团聚体仪测定,套筛选择与干筛相同,将干筛后团聚体按质量比配置 50 g,团聚体仪中振筛 30 min,收集各筛中团聚体样品至铝盒内,将铝盒置于 60℃烘箱中烘干称重。

1.5 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据整理,使用 SPSS 26 进行多重比较分析、方差分析、相关性分析。利用 Origin 2021 进行作图。平均重量直径(MWD)、土壤

团聚体分形维数(*D*)、团聚体破坏率(PDA)等相关指标计算公式如下:

$$MWD=\sum_i^n W_i X_i$$
$$PAD=(DR_{0.25}-WR_{0.25})/DR_{0.25}\times 100\%$$

式中:MWD 为团聚体平均重量直径(mm);*X_i* 为第 *i* 级团聚体平均直径(mm);*W_i* 为第 *i* 级团聚体的重量占比(%)。PAD 为土壤团聚体破坏率(%);*DR_{0.25}* 为 >0.25 mm 土壤机械稳定性团聚体含量(%);*WR_{0.25}* 为 >0.25 mm 水稳性团聚体含量(%)。

2 结果与分析

2.1 接种 AMF 对土壤团聚体稳定性的影响

3 种植物不同处理机械稳定性团聚体组成如表 1 所示,3 种植物大型大团聚体(5~2 mm, LMA) 含量表现为紫穗槐样地最高,柠条次之,沙棘最低,接菌处理显著提高了 3 种植物的 LMA 含量(*p*<0.05),幅度为 13.43%~16.82%;小型大团聚体(2~0.25 mm, SMA) 则表现为柠条含量最高,接菌处理对 SAM 含量的提升幅度为 18.49%~36.96%;3 种植物样地团聚体主要组成部分为游离微团聚体(0.25~0.053 mm, MIA),尤其是对照处理, MIA 含量占比都达到了 50%以上,3 种植物接菌处理显著提高了大团聚体的占比(*p*<0.05),说明接菌可以促进 MIA 向 LMA 和 SMA 的转化。

表 1 不同植物不同处理机械稳定性团聚体粒级组成

Table 1 Particle size composition of mechanically stable aggregates of different plants under different treatments					
样地		LMA/%	SMA/%	MI/%	NA-S/C/%
紫穗槐	对照	19.36±1.15b	21.42±1.14c	55.97±2.60b	3.25±0.51cd
	接菌	21.96±0.97a	25.97±1.48b	49.10±2.08c	2.97±0.38d
沙棘	对照	9.81±1.15e	18.94±0.79c	67.35±1.14a	3.90±0.51c
	接菌	11.46±0.75e	25.94±1.59b	58.97±1.48b	3.62±0.38cd
柠条	对照	13.66±1.15d	28.51±2.60b	52.13±1.14c	5.71±0.51a
	接菌	15.63±1.12c	33.78±1.98a	45.84±1.48d	4.75±0.38b

注:同列数据后不同小写字母表示组间在 0.05 水平差异显,下同。

不同径级水稳性团聚体组成如表 2 所示,3 种植物水稳性团聚体组成规律与机械稳定性团聚体规律相似,接菌处理可以显著提高大型水稳性团聚体含量(*p*<0.05),其中水稳性 LMA 含量紫穗槐样地、沙棘样地、柠条样地分别提高了 24.23%, 42.00%, 32.42%;水稳性 SMA 含量 3 种样地分别提高了 38.22%, 49.81%, 44.20%;相比于土壤机械稳定团聚体,接种 AMF 对水稳性团聚体的提升效果更好。3 种植物水稳性 LMA 的含量表现为紫穗槐样地最大,沙棘样地最小,紫穗槐接菌样地是沙棘接菌样地的 2.15 倍;水稳性 SMA 含量表现为柠条样地最高,是沙棘接菌的 1.32 倍。

如图 1 所示,3 种植物接种 AMF 都显著降低了团聚体破坏率(PAD)(*p*<0.05),其中紫穗槐样地降低了 27.20%,沙棘样地降低了 22.32%,柠条样地降低了 32.20%;3 种植物表现为紫穗槐接菌样地团聚体破坏率最低为 25.07%,柠条对照样地最高为 44.55%。团聚体平均重量直径(MWD)3 种植物都表现为接菌显著高于对照,增加幅度为 24.14%~34.29%,其中沙棘样地提升幅度最大,这可能是由于沙棘对照样地的 MWD 较低,导致接菌提升幅度较大,从 MWD 净增加量在 0.12~0.14 mm,说明接种 AMF 对 3 种植物土壤团聚体稳定性的影响程度相似。

表 2 不同植物不同处理水稳性团聚体粒级组成

Table 2 Particle size composition of water-stable aggregates of different plants under different treatments					
样地		LMA/%	SMA/%	MI/%	NA-S/C/%
紫穗槐	对照	14.86±0.82b	12.92±0.77cd	66.27±2.94bc	5.95±0.58b
	接菌	18.46±1.13a	17.47±1.11b	59.40±2.42d	4.67±0.45c
沙棘	对照	6.31±0.76e	10.44±2.23d	77.65±1.49a	5.60±0.58b
	接菌	8.96±0.95d	15.64±1.71bc	69.22±1.83b	6.18±0.45b
柠条	对照	9.16±1.52d	14.32±2.23bc	65.32±1.49c	11.20±0.58a
	接菌	12.13±0.89c	20.65±1.71a	56.13±1.83d	11.09±0.45a

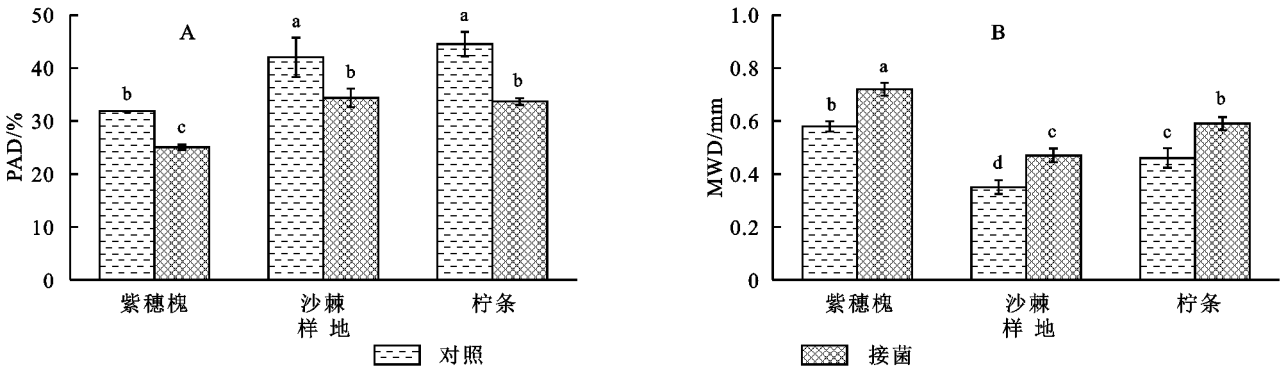


图 1 不同植物不同处理团聚体破坏率(PAD)和团聚体平均重量直径(MWD)

Fig. 1 Aggregate destruction rate (PAD) and mean weight diameter (MWD) of aggregates plants under different treatments

2.2 接种 AMF 对植物根系形态及土壤生物化学性质的影响

如表 3 所示,3 种植物总根长无明显规律,只有沙棘接菌样地显著高于对照($p<0.05$),其他 2 种植物无显著差异($p>0.05$);平均直径整体表现为接菌高于对照,且紫穗槐和柠条样地达到显著水平($p<0.05$),其

中紫穗槐接菌样地根平均直径是对照样地的 2.24 倍,柠条接菌样地是对照样地的 1.89 倍;根体积与根平均直径规律相似,而根表面积只有柠条样地接菌处理表现出了显著差异。3 种植物只有柠条在接菌之后各项根系指标均得到了显著提高,而紫穗槐和沙棘总根长在接菌之后都低于对照,根平均直径则高于对照。

表 3 不同植物不同处理根系形态结构特征

Table 3 Root morphological structure characteristics of different plants under different treatments					
样地		总根长/(mm·cm ⁻³)	平均直径/mm	根体积/(mm ³ ·cm ⁻³)	根表面积/(mm ² ·cm ⁻³)
紫穗槐	对照	23.58±3.87bc	0.55±0.02b	15.13±3.38a	61.20±5.13b
	接菌	23.41±1.19c	1.23±0.18a	130.47±46.74b	90.54±9.74b
沙棘	对照	141.32±18.00a	0.54±0.02b	43.87±3.54b	238.38±28.73b
	接菌	60.98±5.45b	0.72±0.07b	41.22±6.12ab	139.66±14.79ab
柠条	对照	31.01±5.37bc	0.64±0.06b	11.05±2.37d	55.00±5.29b
	接菌	51.92±10.97bc	1.21±0.07a	324.61±104.42b	201.09±31.29a

3 种植物土壤生物化学性质差异显著($p<0.05$)。如图 2 所示,3 种植物接种 AMF 都显著提高了土壤碱性磷酸酶活性,其中紫穗槐样地接菌是对照的 4.36 倍,沙棘样地接菌是对照的 2.36 倍,柠条样地接菌是对照的 1.44 倍;3 种植物对对照样地碱性磷酸酶活性相似,在 0.01 mol/(g FW·min)左右,说明接菌对紫穗槐样地碱性磷酸酶活性提升作用最强。脲酶活性与碱性磷酸酶活性规律相似。接菌显著提高了易提取球囊霉素(GRSP)含量,3 种植物表现为柠条样地 GRSP 含量最高,接菌提高了 28.36%;沙棘样地

接菌效果最佳,GRSP 含量提高了 82.56%。土壤有机质含量表现为紫穗槐样地高于沙棘样地高于柠条样地,接菌显著提高了 3 种植物土壤有机质含量,其中接菌紫穗槐样地土壤有机质含量最高,是对照样地的 1.65 倍。

2.3 植物根系和土壤理化性质与土壤团聚体稳定性的相关性分析

将土壤理化性质,植物根系形态特征与水稳性团聚体等指标进行相关性分析,结果表明(表 3),水稳性 LMA 主要与土壤有机质、碱性磷酸酶活性、根平均直

径呈显著正相关,与土壤含水率、总根长呈显著负相关;水稳性 SMA 主要与碱性磷酸酶活性、脲酶活性、GRSP、平均直径、根体积呈显著正相关,与总根长呈显著负相关;水稳性 MIA 主要与土壤容重、碱性磷酸酶活性、脲酶活性、GRSP、平均直径、根体积呈显著正相关,与总根长呈显著负相关;水稳性 MIA 与土壤含水率总根

长显著呈正相关,与脲酶活性、GRSP、平均直径、根体积呈显著负相关。水稳性团聚体平均重量直径(MWD)与土壤有机质含量、碱性磷酸酶活性、脲酶活性、GRSP、根平均直径呈显著正相关。土壤团聚体破坏率(PAD)与土壤有机质含量、碱性磷酸酶活性、脲酶活性、根平均直径呈显著负相关。

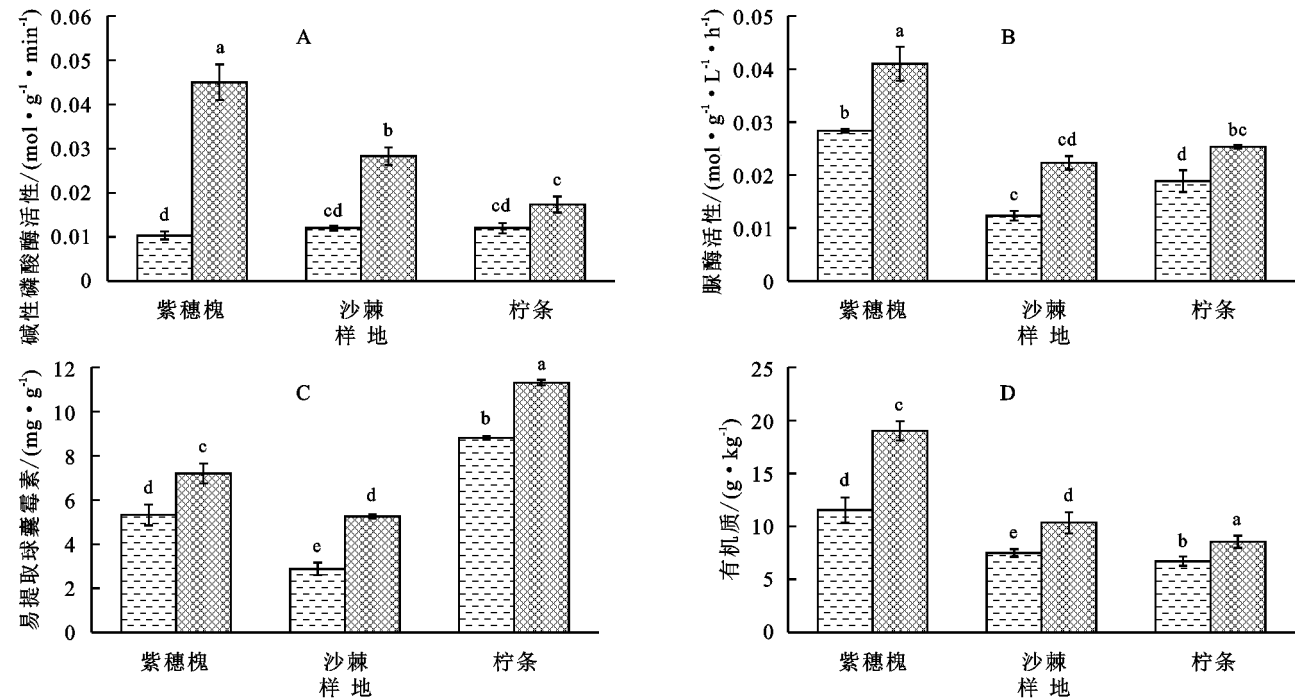


图 2 不同植物不同处理生物化学特征

Fig. 2 Biochemical characteristics of different plants under different treatments

表 3 植物根系和土壤理化性质与土壤团聚体稳定性的相关性分析

Table 3 Composition and important values of understory vegetation of Seabuckthorn under different cultivation methods

参数	有机质	容重	含水率	水稳性 LMA	水稳性 SMA	水稳性 MIA	水稳性 NA-S/C	MWD	PAD	碱性磷酸 酶活性	脲酶 活性	GRSP	总根长	平均 直径	体积	表面积
有机质	1	-0.152	-0.232	0.836 **	0.296	-0.359	-0.581 *	0.775 **	-0.810 **	0.837 **	0.890 **	-0.028	-0.415	0.529 *	0.098	-0.264
容重		1	-0.027	-0.183	-0.314	0.598 **	0.008	-0.222	0.268	-0.175	-0.231	-0.319	0.303	-0.373	-0.516 *	-0.112
含水率			1	-0.481 *	0.270	0.263	0.048	-0.303	0.054	0.191	-0.331	-0.062	0.532 *	0.140	0.226	0.631 **
水稳性 LMA				1	0.498 *	-0.621 **	-0.238	0.966 **	-0.848 **	0.604 **	0.965 **	0.311	-0.671 **	0.565 *	0.208	-0.456
水稳性 SMA					1	-0.732 **	0.442	0.704 **	-0.572 *	0.484 *	0.565 *	0.799 **	-0.479 *	0.769 **	0.606 **	-0.032
水稳性 MIA						1	-0.366	-0.705 **	0.448	-0.322	-0.616 **	-0.833 **	0.722 **	-0.726 **	-0.609 **	0.244
水稳性 NA-S/C							1	-0.072	0.402	-0.413	-0.268	0.789 **	-0.220	0.137	0.323	-0.028
MWD								1	-0.871 **	0.643 **	0.958 **	0.478 *	-0.680 **	0.684 **	0.339	-0.380
PAD									1	-0.703 **	-0.876 **	-0.126	0.392	-0.552 *	-0.261	0.164
碱性磷酸酶活性										1	0.763 **	0.086	-0.338	0.644 **	0.164	-0.131
脲酶活性											1	0.312	-0.664 **	0.668 **	0.258	-0.397
GRSP												1	-0.570 *	0.628 **	0.609 **	-0.137
总根长													1	-0.351	-0.015	0.807 **
平均直径														1	0.784 **	0.180
根体积															1	0.553 *
根表面积																1

注: ** 在 0.01 级别(双尾),相关性显著; * 在 0.05 级别(双尾),相关性显著。

3 讨论

3.1 不同植物接种 AMF 对植物根系形态的影响

露天矿排土场土壤为新成土壤^[18],与未扰动土壤相比,紧实度高、持水能力低、入渗速度慢^[20]。根系是支撑植物生长的主要器官,土壤压实后,土壤容重增加,根系会通过改变自身形态结构来适应环境的变化,研究表明,压实土壤根系长度、根系表面积和根系平均直径都会不同程度下降^[21],接种丛枝菌根真菌(AMF)能够改善根系结构^[22],但在本研究中,接种 AMF 显著降低了紫穗槐和沙棘的总根长,这是可能由于在压实土壤中,细根系穿透在土壤中的发育空间受到限制,真菌菌丝能够在土壤中形成庞大的菌丝网络,它能代替植物细根系吸收土壤养分和水分^[23],导致植物细根系发育减少,Olsson 在研究中也得出过相似的结论^[24],同时,接菌显著提高了 3 种植物根系的平均直径,这也成为了总根长降低的原因之一,根系平均直径是衡量根系吸收能力的重要指标^[25],在压实土壤环境中,根系在土壤中的吸收范围被限制,而菌丝却能够充当植物的细根系延伸到根系无法到达的土壤区域,因此,接种 AMF 会增大植物在土壤中的吸收范围^[26],一方面,更加充足的养分作为植物根系生长提供养分使根径增大,另一方面,植物根系为接受来自菌丝的营养输送而自身做出根系形态的改变^[23]。

3.2 不同植物接种 AMF 对土壤团聚体稳定性的影响

本研究中,接种 AMF 显著提高了土壤有机质含量、碱性磷酸酶活性、脲酶活性和 GRSP 含量,这与前人的研究结果一致^[27-29]。有机质被称为土壤中的“胶结物质”,它一方面可以粘结土壤颗粒,另一方面能够增加团聚体疏水性,降低闭塞空气对团聚体的破坏^[30],本研究中,土壤有机质与水稳性团聚体平均重量直径呈显著正相关,与团聚体破坏率呈显著负相关,这与前人的研究结果一致^[31],但是从水稳性团聚体粒径看,只有水稳性 LMA 含量与土壤有机质含量呈显著正相关,说明有机质较大团聚体的作用较强。碱性磷酸酶活性和脲酶活性与水稳性 LMA 和 SMA 都具有显著相关性,这是由于土壤酶活性一定程度上代表了土壤微生物活性以及植物根系活性,而土壤微生物和土壤根系分泌物是影响土壤团聚体形成的重要因素^[32-33]。GRSP 与水稳性 SMA、水稳性 NA-S/C 和 MWD 呈显著正相关,与 PAD 呈显著负相关,说明 GRSP 能显著提高团聚体的稳定性,这与前人的研究结果一致^[34]。

4 结论

(1) 3 种植物接菌样地根系平均直径是对照样地的 1.33~2.24 倍;紫穗槐和沙棘样地接菌降低了根系的总根长。

(2) 接菌显著提高了土壤酶活性,增加了土壤有机质含量,碱性磷酸酶活性最高提高了 335.62%,脲酶活性最高提高了 44.73%,易提取球囊霉素含量提高了 82.56%,土壤有机质含量提高了 64.74%。

(3) 接菌通过增加土壤有机质含量,提高土壤酶活性等途径,显著提高了土壤团聚体稳定性,其中平均重量直径提高了 24.14%~34.29%,团聚体破坏率降低了 18.25%~24.35%。

参考文献(References):

- [1] 毕银丽.丛枝菌根真菌在煤矿区沉陷地生态修复应用研究进展[J].菌物学报,2017,36(7):800-806.
Bi Y L. Research advance of application of arbuscular mycorrhizal fungi to ecological remediation in subsided land of coal mining areas[J]. Mycosystema, 2017, 36(7):800-806.
- [2] 胡晶晶,毕银丽,龚云丽,等.接种 AM 真菌对采煤沉陷区文冠果生长及土壤特性的影响[J].水土保持学报,2018,32(5):341-345,351.
Hu J J, Bi Y L, Gong Y L, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on growth of *Xanthoceras sorbifolia* and soil properties in coal mining subsidence area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(5): 341-345, 351.
- [3] Lv X J, Wu X, Zhao Y L, et al. Drivers of spatio-temporal ecological vulnerability in an arid, coal mining region in Western China [J]. Ecological Indicators, 2019, 106:105475.
- [4] Ramani R V. Surface mining Technology: Progress and Prospects[J]. Procedia Engineering, 2012, 46:9-21.
- [5] 毕银丽,彭苏萍,杜善周.西部干旱半干旱露天煤矿生态重构技术难点及发展方向[J].煤炭学报,2021,46(5): 1355-1364.
Bi Y L, Peng S P, Du S Z. Technological difficulties and future directions of ecological reconstruction in open pit coal mine of the arid and semi-arid areas of Western China[J]. Journal of China Coal Society, 2021, 46(5): 1355-1364.
- [6] Nunez-Mir G C, Iannone B V, Curtis K, et al. Evaluating the evolution of forest restoration research in a changing world: A 'big literature' review[J]. New Forests, 2015, 46(5/6):669-682.

- [7] Steidinger B S, Crowther T W, Liang J, et al. Climatic controls of decomposition drive the global biogeography of forest-tree symbioses[J]. *Nature*, 2019, 569(7756): 404-408.
- [8] Lei C, Booker F L, Cong T, et al. Arbuscular Mycorrhizal Fungi increase organic carbon decomposition under elevated CO₂[J]. *Science*, 2012, 337(6098): 1084-1087.
- [9] Watts-Williams S J, Cagnano T R. Nutrient interactions and arbuscular mycorrhizas: a meta-analysis of a mycorrhiza-defective mutant and wild-type tomato genotype pair[J]. *Plant & Soil*, 2014, 384(1/2): 79-92.
- [10] Rillig M C, Mummey D L. Mycorrhizas and soil structure[J]. *New Phytologist*, 2006, 171(1): 41-53.
- [11] Rillig M C, Wright S F, Eviner V T. The role of arbuscular mycorrhizal fungi and glomalin in soil aggregation: comparing effects of five plant species[J]. *Plant and Soil*, 2002, 238: 325-333.
- [12] 钟思远, 张静, 褚国伟, 等. 南亚热带森林丛枝菌根真菌与土壤结构的关系[J]. *生态科学*, 2018, 37(5): 16-24.
- Zhong S Y, Zhang J, Chu G W, et al. Soil aggregate composition and Its relationship with arbuscular mycorrhizal fungi in different restoration stages on severely eroded lands[J]. *Ecological Science*, 2018, 37(5): 16-24.
- [13] 吴强盛, 袁芳英, 费永俊, 等. 菌根真菌对白三叶根际团聚体稳定性、球囊霉素相关土壤蛋白和糖类物质的影响[J]. *草业学报*, 2014, 23(4): 269-275.
- Wu Q S, Yuan F Y, Fei Y J, et al. Effects of arbuscular fungi on aggregate stability, GRSP, and carbohydrates of white clover[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2014, 23(4): 269-275.
- [14] 冯固, 张玉凤, 李晓林. 丛枝菌根真菌的外生菌丝对土壤水稳性团聚体形成的影响[J]. *水土保持学报*, 2001, 15(4): 99-102.
- Feng G, Zhang Y F, Li X L. Effect of external hyphae of arbuscular mycorrhizal plant on water-stable aggregates in sandy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2001, 15(4): 99-102.
- [15] Rillig M C, Maestre F T, Lamit L J. Microsite differences in fungal hyphal length, glomalin, and soil aggregate stability in semiarid Mediterranean steppes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2003, 35(9): 1257-1260.
- [16] Spohn M, Giani L. Impacts of land use change on soil aggregation and aggregate stabilizing compounds as dependent on time[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2011, 43(5): 1081-1088.
- [17] 速欢, 王文龙, 康宏亮, 等. 露天矿排土场平台一边坡系统侵蚀形态及径流产沙特征[J]. *应用生态学报*, 2020, 31(9): 3194-3206.
- Su H, Wang W L, Kang H L, et al. Erosion morphology and the characteristics of runoff and sediment yielding in platform-slope system of opencast coal mine[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2020, 31(9): 3194-3206.
- [18] 肖栋, 毕银丽, 于立安, 等. 神华宝日希勒露天矿排土场生态修复中物种引种的关键气候因素[J]. *华南师范大学学报: 自然科学版*, 2021, 53(3): 73-82.
- Xiao D, Bi Y L, Yu L A, et al. Key climate factors in species introduction for ecological reconstruction of the dump site of Shenhua Baorixile open-pit mining[J]. *Journal of South China Normal University (Natural Science Edition)*, 2021, 53(3): 73-82.
- [19] O'Brien S L, Jastrow J D. Physical and chemical protection in hierarchical soil aggregates regulates soil carbon and nitrogen recovery in restored perennial grasslands[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 61: 1-13.
- [20] Palumbo A V, McCarthy J F, Amonette J E, et al. Prospects for enhancing carbon sequestration and reclamation of degraded lands with fossil-fuel combustion by-products[J]. *Advance in Environmental Research*, 2004, 8(3/4): 425-438.
- [21] 李毅杰, 梁强, 董文斌, 等. 土壤压实对宿根甘蔗出苗及根系形成的影响[J]. *西南农业学报*, 2017, 30(9): 2041-2047.
- Li Y J, Liang Q, Dong W B, et al. Effect of mechanical compaction on seedling emergence and roots formation of ratoon sugarcane[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2017, 30(9): 2041-2047.
- [22] 蒲子天, 张林, 张弛, 等. 丛枝菌根真菌与植物共生影响植物水分状态的研究进展[J]. *土壤*, 2022, 54(5): 882-889.
- Pu Z T, Zhang L, Zhang C, et al. Research progress of arbuscular mycorrhizal fungi and plant symbiosis affecting plant water regime[J]. *Soils*, 2022, 54(5): 882-889.
- [23] 储薇, 郭信来, 张晨, 等. 丛枝菌根真菌—植物—根际微生物互作研究进展与展望[J]. *中国生态农业学报*, 2022, 30(11): 1709-1721.
- Chu W, Guo X L, Zhang C, et al. Research progress and future directions of arbuscular mycorrhizal fungi-plant rhizosphere microbial interaction[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2022, 30(11): 1709-1721.
- [24] Olsson P A, Baath E, Jakobsen I. Phosphorus effects on the mycelium and storage structures of an arbuscular mycorrhizal fungus as studied in the soil and roots by analysis of fatty acid signatures[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, 63(9): 3531-3538.

- [25] 荣俊冬, 凡莉莉, 陈礼光, 等. 不同施氮模式和施氮量对福建柏幼苗生物量分配和根系生长的影响[J]. 林业科学, 2020, 56(7): 175-184.
- Rong J D, Fan L L, Chen L G, et al. Impacts on biomass allocation and root growth of *Fokienia hodginsii* seedlings of different patterns and quantities of nitrogen application[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2020, 56(7): 175-184.
- [26] 高文礼, 陈晓楠, 伊力努尔·艾力, 等. 干旱及复水条件下接种 AMF 和根瘤菌对疏叶骆驼刺根系生长的影响[J]. 西北植物学报, 2022, 42(7): 1189-1197.
- Gao W L, Chen X N, Yiliner · Aili, et al. Effect of double inoculation of AMF and rhizobia on root growth of *Alhagi sparsifolia* under drought and rehydration conditions[J]. *Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica*, 2022, 42(7): 1189-1197.
- [27] 刘圆圆, 张丽, 王硕, 等. 氮和土著 AMF 对黄瓜间作土壤酶活性及氮利用的影响[J]. 菌物学报, 2019, 38(11): 1965-1975.
- Liu Y Y, Zhang L, Wang S, et al. Effects of nitrogen and inoculation of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi on soil enzyme activity and nitrogen utilization of cucumber under intercropping conditions[J]. *Mycosystema*, 2019, 38(11): 1965-1975.
- [28] 肖敏, 凌婉婷, 高彦征, 等. 丛枝菌根对菲芘污染土壤中几种酶活性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(5): 919-924.
- Xiao M, Ling W T, Gao Y Z. Effects of arbuscular mycorrhizae on enzymes in contaminated soils by phenanthrene and pyrene[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(5): 919-924.
- [29] 雷卉, 王久照, 谭嫣, 等. 减量施肥和接种 AMF 对盆栽柑桔生长及土壤酶活性的影响[J]. 中国南方果树, 2019, 48(2): 11-14, 17.
- Lei H, Wang J Z, Tan Y, et al. Effects of reduced fertilization and AMF inoculation on growth of potted citrus and soil enzyme activities[J]. *South China Fruits*, 2019, 48(2): 11-14, 17.
- [30] 张琪, 方海兰, 史志华, 等. 侵蚀条件下土壤性质对团聚体稳定性影响的研究进展[J]. 林业科学, 2007, 43(1): 77-82.
- Zhang Q, Fang H L, Shi Z H, et al. Advances in influence factors of aggregate stability under Erosion[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(1): 77-82.
- [31] 秦笠, 王宁, 陈佳敏, 等. 不同恢复方式铁杆蒿群落土壤有机质和团聚体特征[J]. 生态学杂志, 2023, 42(6): 1348-1354.
- Qin L, Wang N, Chen J M, et al. Characteristics of soil organic matter and aggregates in *Artemisia sacrorum* community with different restoration types[J]. *Chinese Journal Ecology*, 2023, 42(6): 1348-1354.
- [32] 周颖, 李朝桢, 郑昕, 等. 贵州野生白及土壤物理性质与酶活性及相关性特征[J]. 西南农业学报, 2022, 35(2): 336-342.
- Zhou Y, Li C Z, Zheng T, et al. Physical properties, enzyme activity and correlation of soil for wild *Bletilla striata* in Guizhou[J]. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 2022, 35(2): 336-342.
- [33] 董心亮, 王金涛, 田柳, 等. 盐渍化土壤团聚体和微生物与有机质关系研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2023, 31(3): 364-372.
- Dong X L, Wang J T, Tian L, et al. Review of relationships between soil aggregates, microorganisms and soil organic matter in salt-affected soil[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(3): 364-372.
- [34] 夏梓泰, 赵吉霞, 李永梅, 等. 周年轮作休耕模式对土壤球囊霉素和团聚体稳定性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(1): 99-106.
- Xia Z T, Zhao J X, Li Y M, et al. Effect of annual rotation and fallow pattern on the soil glomalin and aggregate stability[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(1): 99-106.