

DOI:10.13275/j.cnki.lykxyj.2022.03.007

微生物菌剂对小叶杨复垦区土壤理化性质和酶活性的影响

侯晓萌¹, 孔涛^{1*}, 霍宏亮², 狄军贞³,
冯奥哲¹, 程昊天¹, 黄丽华¹

(1. 辽宁工程技术大学环境科学与工程学院, 辽宁 阜新 123000; 2. 中国农业科学院果树研究所, 辽宁 葫芦岛 125100;

3. 辽宁工程技术大学土木工程学院, 辽宁 阜新 123000)

摘要: [目的] 探索不同微生物菌剂及配施方式对土壤理化性质和酶活性的影响, 明确小叶杨与不同菌剂联合复垦技术对土壤的改良效果, 为“植物+微生物菌剂”联合复垦技术应用提供理论参考。[方法] 本研究采用丛枝菌根真菌 (AMF)、哈茨木霉菌 (TH) 和胶质芽孢杆菌 (BM) 作为修复菌剂, 并以小叶杨为复垦植被, 设置单施、混施处理进行土壤复垦。通过测定土壤理化性质和酶活性来明确菌剂配施技术对该类型区土壤的改良效果。[结果] 土壤含水量和有机质含量分别在 BM 单施与 AMF 单施处理组最高; pH 值和电导率均以 AMF + BM 混施组最高; 土壤酶活性与菌剂种类和配施方式密切相关, 各菌剂处理组的酶活性得到了显著提高, AMF + BM 处理的土壤酶综合指数最高, 为 0.84。菌剂配施促进了土壤养分和酶活性恢复, 其中, AMF + BM 处理的效果最佳, 酶恢复指数为 238.89%, 养分恢复指数为 178.15%。冗余分析显示, AMF + BM 处理改善了土壤 pH 值、全 P、过氧化氢酶、脲酶和土壤呼吸等指标。[结论] AMF 与植物根际促生菌 (PGPR) 的配施在不同程度上改善了风蚀水蚀交错区的土壤理化性质, 提高土壤酶活性; 其中, AMF + BM 处理效果最显著。

关键词: 小叶杨; 微生物菌剂; 土壤酶活性; 土壤理化性质; 恢复指数

中图分类号: S714

文献标志码: A

文章编号: 1001-1498(2022)03-0055-08

土地沙化、水土流失等土壤侵蚀问题是当今全球生态环境面临的严峻挑战, 而我国已成为土壤侵蚀问题最为严重的国家之一。2020 年统计数据示, 受水力作用侵蚀的水土流失面积为 112 万 km², 受风力作用侵蚀的水土流失面积为 157 万 km², 风力和水力侵蚀问题依然严峻^[1]。辽西北地区地域开阔, 处于半干旱牧区和半湿润农业区之间的过渡区域^[2], 在水力与风力双重侵蚀作用下, 该区气候复杂多变、自然灾害频发、土质疏松且养分匮乏, 加上人类不合理的利用, 给土壤生态环境带来巨大的负面效应, 其服务功能不断衰退, 形成“生态脆弱

带”^[3-5]。

小叶杨 (*Populus simonii* Carr) 为杨柳科, 落叶乔木, 是中国原产型深根性阔叶树种, 其根系发达, 适应性强, 抗旱、抗寒、防风固沙, 在风蚀水蚀交错区栽植较多, 是土壤修复的优选树种。植被复垦技术可以有效修复土壤生态^[6], 但风蚀水蚀交错区的土壤理化性质较差, 生态环境恶劣, 植物栽植后成活率不高, 影响复垦效果。近年来, 微生物菌剂修复凭借投入低、效果好、周期短、无二次污染等优势, 在土地复垦领域倍受关注, 应用前景广阔^[7-8]。丛枝菌根真菌 (*Arbuscular mycorrhizal fungi*,

收稿日期: 2021-12-11 修回日期: 2022-02-12

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41672247); 辽宁省“兴辽英才”青年拔尖人才计划支持项目 (XLYC1807159); 辽宁工程技术大学双一流学科创新团队建设项目 (LNTU20TD-21)

* 通讯作者: 孔涛, E-mail: kongtao2005@126.com

AMF)、哈茨木霉菌 (*Trichoderma harzianum*, TH) 和胶质芽孢杆菌 (*Bacillus mucilaginosus*, BM) 是土壤修复中常用的菌剂。AMF 能改善植物对磷、氮等养分的吸收, 增强植物抗性, 提高成活率和生长速度^[9-10]。TH 是一种有益的真菌, 具有促进植物重寄生、竞争、抗生以及提高抗病性等作用, 能将土壤中的营养转化成植物易于吸收的成分^[11]。BM 是可以分解土壤中硅酸盐矿物的异养型好氧细菌, 具有解钾、解磷作用, 并将其转化成供植物利用的有效养分, 同时可分泌生长激素和酶类等物质促进植物生长发育^[12-13]。以上菌剂均可通过提高根系吸收、固定、转化养分的能力, 促进植物生长, 改良土壤生态。单一菌剂的作用只能从某一方面提高复垦效果, 有一定的不足之处, 配施可使不同菌剂建立良性循环, 将不同效用形成合力, 大大提升复垦效应。

目前, 国内现有研究多集中于单一微生物菌剂施用对土壤复垦效果的研究, 以多类型功能菌为代表的微生物菌剂配施复垦技术在风蚀水蚀交错区的应用较少, 其对土壤理化性质和酶活性的影响尚不明确。土壤理化指标和土壤酶种类繁多, 单一指标在反应土壤质量变化上存在很大的片面性。将土壤理化指标和土壤酶活性运用加权和法计算土壤质量综合指数 (SQI) 和土壤酶指数 (SEI), 并以复垦前后土壤酶指数和土壤质量综合指数的变化率作为土壤酶恢复指数 (ERI) 和土壤养分恢复指数 (NRI), 可以客观、量化的揭示土壤的变化规律^[14]。本研究以我国人工防护林典型树种小叶杨为复垦植物, 通过比较 AMF、BM、TH 三种菌剂联合复垦后土壤酶活性和理化性质的变化, 探索不同微生物菌剂及配施方式对土壤理化性质和酶活性的影响, 明确小叶杨与不同菌剂联合复垦技术对土壤的改良效果, 为“植物 + 微生物菌剂”联合复垦技术应用提供理论参考。

1 研究区概况

研究区位于辽宁省阜新市彰武县苇子沟镇腰岭岗子村 (42°26'15" N, 122°48'38" E), 地处科尔沁沙地的东南部, 属半干旱区; 风力强且集中, 秋冬季节大风频发, 易出现沙暴天气, 平均风速 3.7~4.6 m·s⁻¹; 雨热同期且时空分布不均, 夏季降雨集中, 易形成暴雨, 年均降水量不足 550 mm, 是典

型的风蚀水蚀交错区; 该区年均气温 5.7 °C, 最高气温 35.2 °C, 最低气温 -29.5 °C, 年蒸发量 > 1 200 mm, 干燥度 1.2~2.0, 相对湿度 50%~60%。土壤风蚀与水蚀严重, 土壤类型为棕壤土, 农耕地养分含量较低; 土壤含水量 14.02%, pH 值为 6.3, 土壤有机质含量为 16.2 g·kg⁻¹, 土壤全 N、全 P 和全 K 含量分别为 1.2、0.48、57.90 g·kg⁻¹。区域内植物为典型的沙地灌草丛, 如欧李 (*Semen pruni Humilis*)、锦鸡儿 (*Parochetus communis Buch*)、羊茅 (*Festuca ovina Linn.*)、沙蓬 (*Agriophyllum squarrosum Linn.*)、差巴戈蒿 (*Artemisia halodendron Turcz.*) 等, 试验开始前已对地被植物进行人工清除。

2 研究方法

2.1 样地设置

本研究选用丛枝菌根真菌 (AMF)、哈茨木霉菌 (TH) 和胶质芽孢杆菌 (BM) 作为试验菌剂, 其中, TH、BM 购于绿陇生物, 其菌剂浓度分别为 1.0×10^{10} 、 2.0×10^{10} CFU·g⁻¹; AMF 则选用了菌根效应优良的摩西球囊霉菌 (*Glomus mosseae*), 菌种购于石河子大学, 菌种是内含真菌孢子、菌丝以及被浸染宿主植物根段等繁殖体的根际砂土混合物。试验设置菌剂单施、菌剂混施和对照 3 个试验组, 具体配置方式及菌剂施用量见表 1。试验共分 8 个处理, 每处理 3 次重复, 每次重复设为 1 个试验小区, 共计 24 个试验小区, 进行随机区组设计。每个试验小区面积为 2 m × 2 m, 每小区内种植 4 株小叶杨, 株行距均为 1.0 m × 1.0 m, 为防止小区内微生物菌剂的迁移, 各小区间设置 2 m 隔离带。于 2020 年 3 月在各小区内种植 2 年生 (地径 2~3 cm) 小叶杨, 在以定植点为中心 30 cm 处将菌剂与土壤均混后进行埋施处理, 并适时进行田间常规人工抚育管理, 保证植物生长的良好性和均一性。

2.2 样品采集

在复垦处理 90 d 后进行土壤采集, 各试验小区内采用 5 点取样法, 采 0~20 cm 土层土壤, 同区土样混合均匀, 去除覆土层可见的砂石、植物及动物残体等杂物, 迅速过 100 目 (孔径 1.5 mm) 筛后将取好的土样用封口袋密封保存于冷藏箱带回

表1 实验设计及微生物菌剂施用量

Table 1 Design of application and dosage of microbial agent in experimental

处理方式 Treatments	样品名称 Sample Description	施用量 Surueyed/(g·株 ⁻¹)
对照 Blank control	CK	—
单施 Mon-microbail	AMF	50
	BM	10
	TH	20
	AMF + BM	50 + 20
混施 Composite-microbail	AMF + TH	50 + 10
	TH + BM	10 + 20
	AMF + TH + BM	50 + 10 + 20

注: “—”表示无菌剂施用; CK=单独种植小叶杨; AMF=小叶杨+丛枝菌根真菌; BM=小叶杨+胶质芽孢杆菌; TH=小叶杨+哈茨木霉菌; AMF + BM=小叶杨+丛枝菌根真菌+胶质芽孢杆菌; AMF + TH=小叶杨+丛枝菌根真菌+哈茨木霉菌; TH + BM=小叶杨+哈茨木霉菌+胶质芽孢杆菌; AMF + TH + BM=小叶杨+丛枝菌根真+哈茨木霉菌+胶质芽孢杆菌。

Notes: “—”: No microbial agent application; CK= plant alone; AMF= plant + AMF; BM=plant + BM; TH= plant + TH; AMF + BM= plant + AMF + BM; AMF + TH= plant + AMF + TH; TH + BM= plant + TH + BM; AMF + TH + BM= plant + AMF + TH + BM.

实验室, 1份土壤4℃下保存, 用于测定含水量、土壤酶活性等; 另1份土壤样品风干后研磨, 用于测定土壤理化性质。

2.3 测定方法

2.3.1 理化性质测定 参考鲍士旦《土壤农化分析》^[15]测定土壤理化性质, 土壤含水量采用烘干法; 土壤酸碱度(pH)采用电位法, 以蒸馏水浸提土壤, 液土比为5:1; 土壤电导率(EC)采用5:1浸提法; 土壤有机质(SOM)采用低温外热重铬酸钾氧化—比色法^[16]; 土壤全氮(TN)采用凯式定氮分析仪测定; 土壤全磷(TP)、全钾(TK)、钙(Ca)、镁(Mg)采用等离子体发射光谱仪(ICP-AES)测定。

2.3.2 土壤基础呼吸测定 采用室内密闭培养, 1 mol·L⁻¹ NaOH 碱液吸收法测定^[17]。

2.3.3 土壤酶活性测定^[18] 脲酶(URE)活性采用苯酚钠比色法; 蔗糖酶(SUC)活性采用3,5-二硝基水杨酸比色法; 过氧化氢酶(CAT)活性采用高锰酸钾滴定法; 脱氢酶(DHA)活性采用TTC比色法。

2.4 土壤质量综合指数和土壤酶综合指数

在土壤中各指标测定值的基础上, 采用加权和法计算土壤质量综合指数(SQI)和土壤酶综合指数(SEI), 并将实测值转换为介于0~1之间,

实现指标标准化^[19]。SEI计算公式如下:

$$SEI = \sum_{i=1}^n W_i \times V_i$$

式中: SEI为土壤酶指数; W_i 为土壤酶*i*的权重; V_i 为酶*i*活性的隶属度值; 权重和隶属度参照许明祥等^[19]的方法计算。SQI计算公式与SEI的计算方法一致。

2.5 土壤酶活性恢复指数(ERI)和土壤养分恢复指数(NRI)

用土壤酶活性恢复指数(ERI)^[20]来评价复垦技术对土壤酶活性的影响, 以未复垦裸地为对照, 公式如下:

$$ERI = \frac{(A_R - A_D)}{A_D} \times 100\%$$

式中: A表示土壤SEI, 下标R为复垦区, D为未复垦区。

土壤养分恢复指数(NRI)^[21]以未复垦裸地对照, 计算复垦区土壤SOM、TN、TP、TK、Ca、Mg与裸地间差异, 以定量描述复垦对土壤养分的影响, 公式如下:

$$NRI = \frac{(S_R - S_D)}{S_D} \times 100\%$$

式中: S为土壤的SQI, 下标R为复垦区, D未复垦的裸地区。

2.6 数据分析与处理

数据整理、计算与作图均采用Microsoft Excel 2019进行。采用单因素方差分析(One-Way ANOVA)对不同菌剂配施处理下土壤理化性质和酶活性进行差异显著性分析; 使用“悟空”数据分析平台(<https://www.omicsolution.com/wkomics/main/>)的控件对酶活性与土壤理化因子进行冗余分析(RDA)。

3 结果与分析

3.1 不同菌剂配施下小叶杨复垦土壤的理化性质差异

表2表明: 不同处理的土壤含水量为15.60%~17.91%; 土壤pH值为6.32~6.58, 各处理土壤pH值均显著高于对照; 电导率为65.35~128.60 mS·cm⁻¹, 除AMF + BM和TH + BM处理高于对照外, 其他处理均显著低于对照; AMF处理的土壤有机质含量最高, 显著高于对照和其他处理, 较对照提高了41.3%, 其他处理与对照无显著差异;

各处理土壤的 TN 含量均高于对照, BM 处理最佳, 较对照提高了 19.1%, 但与对照差异不显著; 各处理土壤的 TK 含量均低于对照, 其中, TH、AMF + TH 和 AMF + TH + BM 处理与对照差异显著, 分别降低了 8.1%、11.2% 和 9.4%; AMF + BM 和 AMF + TH 处理的土壤 TP 含量较高, 分别比对照显著提高了 51.5% 和 53.0%; TH + BM 处

理的 Ca 含量最高, 比对照显著提高了 14.0%; AMF + BM 处理的 Mg 含量最高, 比对照显著提高了 53.6%。各菌剂处理组的 SQI 均高于对照, 其中, AMF + BM、AMF + TH + BM、BM 处理显著高于对照, 分别提高了 56.8%、36.4% 和 31.8%。总体而言, AMF + BM 处理土壤质量综合指数最优。

表 2 不同处理对土壤理化性质及养分影响

Table 2 Effects of different treatments on soil physicochemical properties and nutrients

样品 Sample	CK	AMF	TH	BM	AMF + BM	AMF + TH	TH + BM	AMF + TH + BM
含水量 WC/%	16.70±0.38 abc	15.60±2.49 a	16.13±0.11 a	17.91±0.54 d	16.12±0.07 a	17.43±0.07 bcd	16.32±0.18 ab	17.74±0.34 cd
酸碱度 pH	6.32±0.04 a	6.39±0.04 b	6.40±0.03 b	6.40±0.07 b	6.58±0.03 d	6.40±0.02 b	6.48±0.02 c	6.54±0.05 cd
电导率 EC/(mS·cm ⁻¹)	106.60±7.48 e	65.35±0.65 a	66.65±0.45 a	96.20±0.60 d	128.60±1.10 g	72.00±0.40 b	122.50±0.90 f	78.05±0.35 c
有机质 SOM/%	2.06±0.00 abc	2.91±0.46 d	2.07±0.04 abc	1.83±0.01 a	1.87±0.01 ab	2.18±0.04 c	2.23±0.28 c	2.09±0.07 bc
全氮 TN/(g·kg ⁻¹)	1.31±0.10 a	1.37±0.10 a	1.43±0.34 a	1.56±0.32 a	1.48±0.16 a	1.40±0.06 a	1.38±0.18 a	1.44±0.21 a
全磷 TP/(g·kg ⁻¹)	0.66±0.11 bc	0.48±0.14 a	0.58±0.00 ab	0.75±0.09 c	1.00±0.09 d	1.01±0.08 d	0.69±0.21 bc	0.80±0.18 c
全钾 TK/(g·kg ⁻¹)	61.62±3.29 d	58.39±0.40 abcd	56.60±4.26 abc	58.06±2.70 abcd	60.93±1.19 cd	54.71±6.05 a	60.01±0.56 bcd	55.81±3.90 ab
钙 Ca/(g·kg ⁻¹)	53.62±2.89 d	51.56±0.20 c	47.22±0.18 b	56.31±0.27 e	57.82±1.25 e	46.04±2.35 b	61.13±0.77 f	43.94±1.34 a
镁 Mg/(g·kg ⁻¹)	6.61±0.62 cd	5.73±0.26 bc	5.54±0.95 bc	5.69±0.55 bc	10.15±0.82 e	5.38±0.71 b	4.26±0.48 a	7.32±1.86 d
质量综合指数 SQI	0.44±0.02 a	0.52±0.01 ab	0.51±0.05 ab	0.58±0.04 b	0.69±0.07 c	0.53±0.03 ab	0.52±0.09 ab	0.60±0.05 bc

注: 表中数据为平均值±标准差, 同一行不同小写字母表示不同处理间差异显著 ($p < 0.05$)。

Notes: The data in the table are mean ± standard deviation. Different lowercase letters in the same row indicate significant differences between different treatments ($p < 0.05$).

3.2 不同菌剂配施对小叶杨复垦土壤呼吸和土壤酶活性的效应差异

图 1 表明: 所有处理均不同程度地提高了土壤呼吸, 单施 BM 处理的土壤呼吸最高, 比对照显著提高了 42.7%; 混施中 AMF + BM 和 AMF + TH 处理间土壤呼吸差异显著。

各菌剂处理的脲酶活性均显著高于对照, 其中, AMF + BM 混施处理最高, 比对照提高了 34.8% (图 1)。AMF、TH 单施和两菌混施的土壤蔗糖酶活性均显著高于对照, 其中, 单施 AMF 的效果最好, 比对照显著提高了 84.3%。单施 AMF 和 TH 处理的土壤脱氢酶活性显著高于对照, AMF 处理比对照提高了 39.7%。单施中, 仅 BM 处理的过氧化氢酶活性显著高于对照, 提高了 110.4%, 混施中 AMF + BM 处理过氧化氢酶活性

最高, 比对照显著提高了 179.2%。

各菌剂处理的土壤酶综合指数均显著提高, AMF + BM 的土壤酶指数最高, 为 0.84, 比对照提高了 1.33 倍; 其次为 BM 处理, 为 0.76, 比对照提高了 1.01 倍。除 AMF + TH 和 AMF + TH + BM 差异不显著外, 其他各处理间均差异显著。

3.3 不同菌剂配施对土壤酶活性恢复指数和土壤养分恢复指数的影响

图 2 表明: 不同菌剂配施下, 土壤酶活性恢复指数均高于对照, 单施中, BM 处理的土壤酶活性恢复指数最大, 为 206.76%, 是对照的 4.56 倍; 混施中, AMF + BM 处理的土壤酶活性恢复指数最大, 为 238.89%, 是对照的 5.27 倍, 各混施处理的土壤酶活性恢复指数高低依次为 AMF + BM > AMF + TH > AMF + TH + BM > TH + BM。

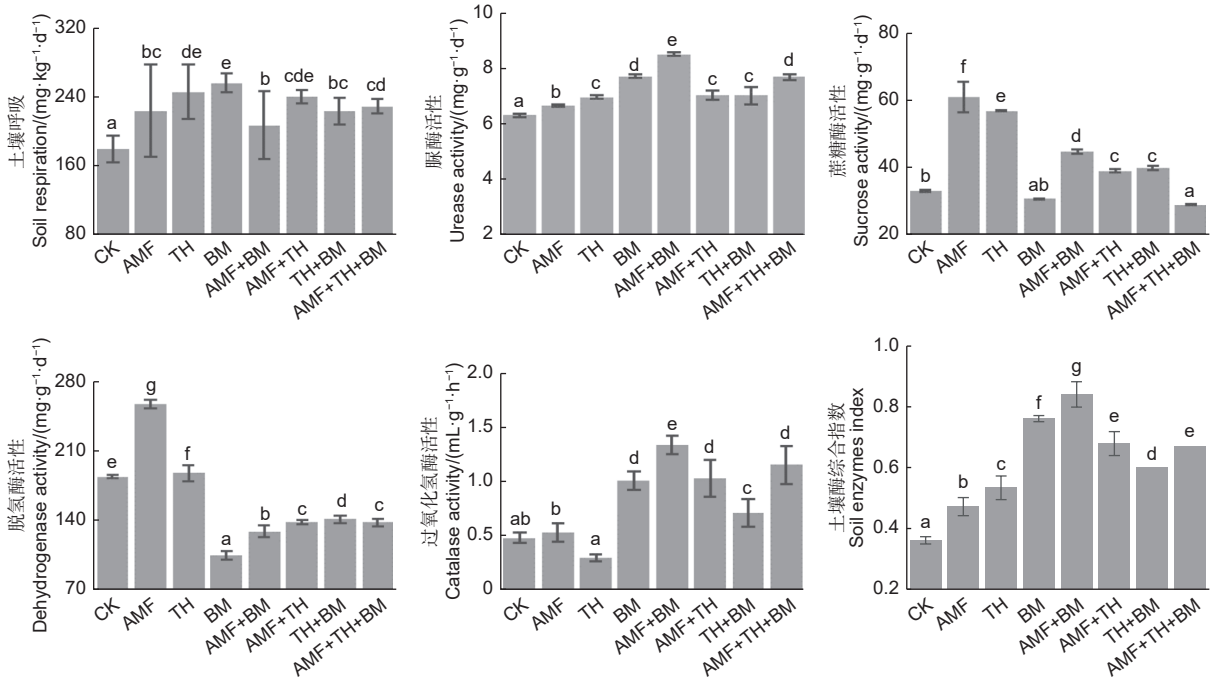


图1 不同处理对土壤呼吸及土壤酶活性的影响

Fig. 1 Effects of different treatments on soil respiration and soil enzyme activities

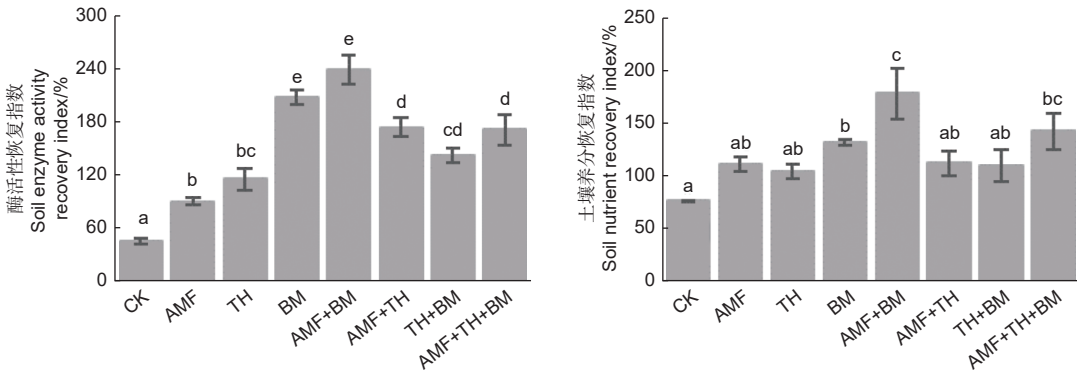


图2 不同处理对土壤酶活性恢复指数和养分恢复指数的影响

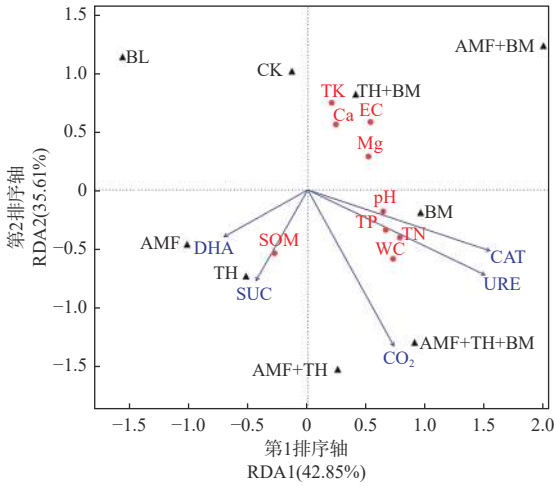
Fig. 2 Effects of different treatments on soil enzyme activity recovery index and nutrient recovery index

菌剂配施不同程度的提升了土壤养分恢复指数, 其变化范围为 104.42%~178.15%, 表明菌剂配施对土壤养分的恢复具有良好的促进作用 (图 2)。单施 AMF、BM、TH 处理的土壤养分恢复指数分别为 110.94%、104.42% 和 131.82%, 以 BM 处理的恢复效果最优; 混施中 AMF + BM 处理土壤养分恢复指数最高, 为 178.15%, 整体效果最优; 不同处理土壤养分恢复指数的变化趋势与土壤酶活性恢复指数的规律基本一致。

3.4 不同菌剂配施下小叶杨土壤因子与土壤呼吸及酶活性的冗余分析

冗余分析结果可以更好的解释不同处理对土壤

的理化性质与土壤呼吸及酶活性的影响, 并反映各指标间的相关性。图 3 显示: 前 2 个轴可以解释不同菌剂处理土壤的理化性质、土壤呼吸和酶活性关系变异 78.46% 的情况, 其中, 第 1 排序轴的解释比例为 42.85%, 第 2 排序轴为 35.61%。AMF + BM 和 TH + BM 两处理主要影响土壤 Ca、Mg、TK 含量, 三种元素含量均与电导率呈正相关。AMF 和 TH 处理有效提高了土壤有机质含量, 其含量与土壤脱氢酶和蔗糖酶活性显著相关。AMF + TH + BM、AMF + BM 和 BM 三组处理综合复垦效应较好, 主要影响 pH、TP、含水量、过氧化氢酶、脲酶和土壤呼吸 6 个指标。



注: BL 为裸地, DHA 为土壤脱氢酶, SUC 为蔗糖酶, URE 为脲酶, CAT 为过氧化氢酶。

Notes: BL: bare land; DHA: Soil dehydrogenase; SUC: sucrose; URE: Urease; CAT: Catalase.

图 3 不同处理下土壤因子与土壤呼吸及酶活性的冗余分析

Fig. 3 Redundancy analysis (RDA) of soil factors, soil respiration and enzyme activities under different treatments

4 讨论

4.1 不同菌剂处理对土壤理化性质的影响

土壤理化性质与微生物活动和酶代谢密切相关, 土壤既为微生物提供了营养物质和生存环境, 也受微生物的调控, 微生物菌剂作为土壤改良剂, 能够改善土壤的理化性质和养分状况^[22-24]。本研究中, 单施 AMF 显著提升了土壤的有机质含量, 与毕银丽等^[25]的研究结果一致。AMF 能分泌土壤球囊霉素相关蛋白, 对土壤有机碳的积累具有重要作用, 从而促进了有机质的提高^[26-27]; 而单施 AMF 会促进根系对 N、P 等元素吸收^[28], 尤其对 P 的吸收, 本研究中 AMF 处理下土壤中的 TP 含量显著低于 CK 组。吕曼曼等^[29]研究发现, 与对照相比, 木霉菌与杨树配施明显降低了土壤含水率, 本研究中得到了相似的结果。原因可能是木霉菌促进了植物对养分的吸收, 并增加土壤孔隙, 引起土壤水分散失。BM 能显著提升土壤含水率, 分解土壤矿物和岩石中的 P 和 K, 且有一定的固氮能力, 在本研究中都有所体现。三种菌剂单施处理中, BM 处理的土壤含水量、TN、TP 都最高^[30]。

4.2 不同菌剂处理对土壤酶活性的影响

AMF 和 TH 都能提高土壤脲酶和蔗糖酶活性, 表明这 2 种菌剂均能促进土壤的 C、N 循环,

促进物质周转, 这与前人研究结果一致^[31-33]。本研究中, AMF 和 TH 处理显著提高了脱氢酶活性, 表明这 2 种菌剂能够促进土壤微生物活性; 而 BM 则对土壤脲酶和过氧化氢酶影响较大, 可能是因为 BM 能促进土壤团粒的形成, 使土壤变得疏松、绵软, 好氧微生物活性增强, 进而提高了土壤过氧化氢酶活性^[13,34]。

4.3 不同菌剂配施在土壤修复中的协同作用

AMF 和植物根际促生菌 (Plant Growth-promoting rhizobacteria, PGPR) 是植物根际有益的 2 类微生物^[35-36], 其中, AMF 侵染植物根系后形成菌根共生体, 扩大根系吸收面积, 促进养分的获取, 提高抗逆性^[37]。BM 和 TH 是 PGPR 的代表菌种, 具有固氮、解磷、解钾功能, 并产生植物激素、抗生素和拮抗病原菌。已有研究表明, AMF 与 PGPR 具有协同修复土壤、促进植物营养吸收和生长的效应^[38-39]。本课题前期研究发现, 较单施 AMF 相比, AMF + TH 混施对煤矸石基质的养分、微生物量及酶活性等都具有更显著的促进作用^[40]。本研究中, AMF 与 PGPR 搭配的 AMF + BM 处理, 土壤养分恢复指数和土壤酶活性恢复指数均高于其他处理, 表明 BM 促进土壤养分的释放与 AMF 提高植物对养分的吸收形成了高效的协同机制。冗余分析也显示, AMF + BM 主要影响土壤 pH、TP、过氧化氢酶、脲酶和土壤呼吸等多个指标; 而 3 菌混施效果则低于 AMF + BM 处理, 原因可能在于 3 菌之间产生了对于基质养分的竞争或存在一定程度的拮抗作用, 对于形成本结果的机制机理有待于进一步的研究。

5 结论

菌剂单施处理中, BM 显著提高了土壤含水量, AMF 显著提高了土壤有机质含量; BM 和 TH 单施显著提高了土壤呼吸, 并高于对照; AMF、TH 单施显著提高了土壤蔗糖酶、脱氢酶活性。混施处理中, AMF + BM 主要影响土壤 pH、TP、过氧化氢酶、脲酶和土壤呼吸等指标。总体而言, AMF 与 PGPR 的配施形成了良好的协同效应, 以 AMF + BM 效果最佳, 显著提升了土壤酶活性恢复指数和土壤养分恢复指数, 且不同处理下土壤养分恢复指数的变化趋势与土壤酶活性恢复指数的规律基本一致, 说明微生物双菌剂配施的联合效用显著提升了风蚀水蚀交错区的土壤复垦效果。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国水利部[R]. 中国水土保持公报, 2020: 3-5.
- [2] 吴祥云, 张黎, 丁玉荣, 等. 科尔沁沙地农牧交错带土地利用方式对土壤特性的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(4): 116-119.
- [3] 李旭亮, 杨礼箫, 田伟, 等. 中国北方农牧交错带土地利用/覆盖变化研究综述[J]. 应用生态学报, 2018, 29(10): 3487-3495.
- [4] 邓娇娇, 朱文旭, 张岩, 等. 辽西北风沙区不同人工林土壤真菌群落结构及功能特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(1): 44-54.
- [5] Song G, Yu C, Tian M, *et al.* The Ecological Vulnerability Evaluation in Southwestern Mountain Region of China Based on GIS and AHP Method[J]. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2(6): 465-475.
- [6] Jia P, Liang J L, Yang S X, *et al.* Plant diversity enhances the reclamation of degraded lands by stimulating plant-soil feedbacks[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2020, 57(7): 1258-1270.
- [7] 宋伟, 徐新创, 陈百明, 等. 土地整理区生物-理化改良技术研究综述[J]. 中国农学通报, 2011, 27(17): 229-233.
- [8] Herzberger A J, Meiners S J, Towey J B, *et al.* Plant-microbe interactions change along a tallgrass prairie restoration chronosequence[J]. *Restoration Ecology*, 2015, 23(3): 220-227.
- [9] 林宇岚, 李正响, 吴斐, 等. 不同品种油茶根际丛枝菌根真菌群落结构特征[J]. 林业科学研究, 2020, 33(5): 163-169.
- [10] Zhu Y G, Miller R M. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems[J]. *Trends in Plant Science*, 2003, 8(9): 407-409.
- [11] 尤佳琪, 吴明德, 李国庆. 木霉在植物病害生物防治中的应用及作用机制[J]. 中国生物防治学报, 2019, 35(6): 966-976.
- [12] 田稼, 吴小杰, 孙超, 等. 胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*)的研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 15-22.
- [13] 赵胤, 龙月, 潘远智, 等. 蜀葵-胶质芽孢杆菌联合修复土壤镉污染[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(5): 1026-1033.
- [14] 曹光球, 费裕狮, 路锦, 等. 林下植被不同管理措施培育杉木大径材林分土壤酶活性差异及质量评价[J]. 林业科学研究, 2020, 33(3): 76-84.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 王冬梅. 土壤理化分析实验指导[M]. 北京: 中国林业出版社, 2002.
- [17] Lazzaro A, Schulin R, Widmer F, *et al.* Changes in lead availability affect bacterial community structure but not basal respiration in a microcosm study with forest soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, 371(1-3): 110-124.
- [18] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [19] 许明祥, 刘国彬, 赵允格. 黄土丘陵区土壤质量评价指标研究[J]. 应用生态学报, 2005, 16(10): 1843-1848.
- [20] Zhang Z S, Dong X J, Liu Y B, *et al.* Soil oxidases recovered faster than hydrolases in a 50-year chronosequence of desert revegetation[J]. *Plant and Soil*, 2012, 358(1-2): 275-287.
- [21] 高丽倩, 赵允格, 许明祥, 等. 生物土壤结皮演替对土壤生态化学计量特征的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(2): 678-688.
- [22] 罗俊, 林兆里, 李诗燕, 等. 不同土壤改良措施对机械压实酸化蔗地土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(4): 596-613.
- [23] Jala S, Goyal D. Fly ash as a soil ameliorant for improving crop production — a review[J]. *Bioresource Technology*, 2006, 97(9): 1136-1147.
- [24] 赵京京, 王超群, 董玉红, 等. 细菌肥料对湿地松幼龄林生长及土壤性质的影响[J]. 林业科学研究, 2019, 32(1): 153-159.
- [25] 毕银丽, 张延旭, 江彬, 等. 水分胁迫下AM真菌与解磷细菌协同对玉米生长及土壤肥力的影响[J]. 煤炭学报, 2019, 44(12): 3655-3661.
- [26] 裘浪, 毕银丽, 江彬, 等. 覆膜与接种AM真菌对半干旱区玉米根际土壤理化性质的影响[J]. 菌物学报, 2017, 36(7): 904-913.
- [27] 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 & Soil*, 2002, 238(2): 325-333.
- [28] Veresoglou S D, Chen B, Rillig M C. Arbuscular mycorrhiza and soil nitrogen cycling[J]. *Soil Biology & Biochemistry*, 2012, 46(1): 53-62.
- [29] 吕曼曼, 刘志华, 王慧, 等. 棘孢木霉对杨树苗栽培土壤理化性质及养分的影响[J]. 植物研究, 2015, 35(2): 289-296.
- [30] 梅小乐, 白昕冉, 郑春丽, 等. 利用富钾板岩与胶质芽孢杆菌制备土壤修复剂的配施研究[J]. 矿产综合利用, 2020(5): 130-135, 17.
- [31] 段雪娇. 微生物菌剂对水稻土壤微生物数量及酶活性的影响[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015: 18-19.
- [32] 温苗, 施松梅, 罗协, 等. 不同树龄桑园丛枝菌根侵染、球囊霉素土层分布及与土壤因子的关系[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5): 1138-1146.
- [33] 宋梦琪, 杨克军, 张翼飞, 等. 木霉菌对玉米灌浆期土壤酶活性和土壤养分及产量的影响[J]. 黑龙江农业科学, 2020(7): 34-39.
- [34] 宋健, 刘伟峰, 魏喜喜, 等. 枣专用微生物菌剂对干旱区骏枣园土壤养分及土壤酶活性的影响[J]. 西南农业学报, 2021, 34(7): 1472-1479.
- [35] 戴梅, 王洪娟, 殷元元, 等. 丛枝菌根真菌与根围促生细菌相互作用的效应与机制[J]. 生态学报, 2008, 28(6): 2854-2860.
- [36] 李海燕, 刘润进, 束环瑞, 等. Chib1和PAL5基因在AM真菌*Glomus fasciculatus*诱导大豆抗线虫病防御反应中的作用(英文)[J]. 菌物学报, 2005(3): 385-393.
- [37] Attia M, Awad N. Assessment the impact of certain growth promoting rhizobacteria strains on symbiotic effectiveness of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. *Egyptian Journal of Microbiology*, 2003, 38(1): 75-88.
- [38] Requena N, Perez-Solis E, Azcon-Aguilar C, *et al.* Management of Indigenous Plant-Microbe Symbioses Aids Restoration

of Desertified Ecosystems[J]. Applied & Environmental Microbiology, 2001, 67(2): 495-495.

rhizal efficiency under Zn-toxicity[J]. Chemosphere, 2006, 62(9): 1523-1533.

[39] Vivas A, Biro B, Ruiz-Lozano J, et al. Two bacterial strains isolated from a Zn-polluted soil enhance plant growth and mycor-

[40] 孔 涛, 梁 冰, 那冰静, 等. 木霉菌协助丛枝菌根真菌对煤矸石分解和绿化的促进效果[J]. 煤炭转化, 2018, 41(6): 58-65.

Effects of Microbial Agents on Soil Physical and Chemical Properties and Enzyme Activities in *Populus simonii* Reclamation Area

HOU Xiao-meng¹, KONG Tao¹, HUO Hong-liang², DI Jun-zhen³,
FENG Ao-zhe¹, CHENG Hao-tian¹, HUANG Li-hua¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, Liaoning, China;

2. Research Institute of Pomology, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xingcheng 125100, Liaoning, China;

3. School of Civil Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

Abstract: [Objective] To clarify the effect of microbial agents and their application on the restoration of wind and water erosion areas in the reclamation of poplar, and provide a theoretical basis for the soil restoration in wind and water erosion areas. [Method] *Arbuscular mycorrhizal fungi* (AMF), *Trichoderma harzianum*(TH), and *Bacillus mucilaginosus* were used(BM) as microbial inoculum for remediation. *Populus simonii* was used as reclaimed vegetation. One or mixed microbial Agents were fertilized for soil reclamation were set up in this study. The improvement effect of microbial agents on soil in this type area were determined by measuring soil physicochemical properties and enzyme activities. [Result] The result showed that the Soil water content (WC) and Soil organic matter content (SOC) were the highest using single biofertilizer of BM and AMF treatment, respectively. The pH and conductivity (EC) under the AMF + BM mixed treatments were the highest. Soil enzyme activities were closely related to the types of microbial agents and application methods. The enzyme activities of each biofertilizer treatment had been improved, and the Soil enzyme index (SEI) of AMF + BM treatment was 0.84, which was the highest. The microbial agents promoted the recovery of soil nutrients and improved enzyme activities. Among all treatments, AMF + BM treatment had the best effect, with enzyme recovery index (ERI) of 238.89% and Nutrient recovery index (NRI) of 178.15%. Redundancy Analysis (RDA) analysis showed AMF + BM treatment improved soil pH, TP, Catalase (CAT), Urease (URE), and Soil respiration indexes. [Conclusion] Combined application of AMF and PGPR improves soil physicochemical properties and soil enzyme activities in the water-wind erosion crisscross region. Among them, the mixed microbial-agents of AMF + BM has the best effect.

Keywords: *Populus simonii*; microbial agents; soil enzyme activity; soil physicochemical properties; recovery index

(责任编辑: 徐玉秀)