

不同溶岩微生物菌剂与保水剂配比对土壤养分和酶活性的影响

聂晖, 李翀, 张金池, 贾赵辉, 马仕林, 曾婧祎, 陈美玲

(南京林业大学 南方现代林业协同创新中心 江苏省水土保持与生态修复重点实验室, 江苏 南京 210037)

摘要: [目的] 探究保水剂和微生物菌剂混合添加对土壤特性的影响, 为促进矿山植被恢复提供理论依据。[方法] 在刺槐(*Robinia pseudoacacia*)盆栽土壤中加入保水剂和溶岩微生物菌剂, 保水剂浓度分别为 B_0 (0%), B_1 (0.3%), B_2 (0.5%)。微生物处理为 J_0 (不添加微生物), J_1 [添加 NL_{11} (苏云金芽孢杆菌, 细菌)], J_2 [添加 $NL_{11} + NL_1$ (嗜热一氧化碳链霉菌, 放线菌)], J_3 [添加 $NL_{11} + NL_1 + NL_{15}$ (卵形孢球托霉, 真菌)]。通过分析刺槐生长、土壤养分、有机碳和土壤酶活性等, 探究保水剂和微生物混合添加对刺槐土壤养分和酶活性的影响。[结果] ①溶岩微生物添加提高了土壤速效养分含量和土壤酶活性, 其中以 J_2 微生物处理效果最好。②土壤速效养分随着保水剂浓度增加呈现先增加后降低的趋势, 以0.3%保水剂浓度对土壤养分和酶活性促进效果最好。③以 J_2B_1 , J_3B_0 , J_2B_2 组合效果对土壤养分和酶活性促进作用较好。[结论] 土壤菌剂和保水剂添加提高了土壤养分和酶活性, 其中以 J_2B_1 , J_3B_0 , J_2B_2 的组合效果较好。

关键词: 保水剂; 微生物菌剂; 喷播基质; 土壤养分

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0107-09

中图分类号: S158

文献参数: 聂晖, 李翀, 张金池, 等. 不同溶岩微生物菌剂与保水剂配比对土壤养分和酶活性的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(4): 107-115. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.014; Nie Hui, Li Chong, Zhang Jinchi, et al. Effects of different ratios of mineral-solubilizing microbes and water-retaining agents on soil nutrients and enzyme activities [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 107-115.

Effects of Different Ratios of Mineral-solubilizing Microbes and Water-retaining Agents on Soil Nutrients and Enzyme Activities

Nie Hui, Li Chong, Zhang Jinchi, Jia Zhaohui, Ma Shilin, Zeng Jingyi, Chen Meiling

(Co-Innovation Center for the Sustainable Forestry in Southern China, Jiangsu Province Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Ecological Restoration, College of Forestry, Nanjing Forestry University, Nanjing, Jiangsu 210037, China)

Abstract: [Objective] The effects of mixed additions of a water-retaining agent and bacterial agents on soil characteristics were determined in order to provide a theoretical basis for promoting mine vegetation restoration. [Methods] Different concentrations of a water-retaining agent and mineral-solubilizing microbial agents were added to the potted soil of *Robinia pseudoacacia*. The concentrations of the water-retaining agent were: B_1 (0%), B_2 (0.3%), and B_3 (0.5%). The microbial-agent treatments were J_0 (without added microorganisms), J_1 [adding NL_{11} (*Bacillus thuringiensis*)], J_2 [adding $NL_{11} + NL_{11}$ (*Streptomyces thermocarboxyidus*)], J_3 [adding $NL_{11} + NL_1 + NL_{15}$ (*Gongronella butleri*)]. The effects of mixed additions of the water-retaining agent and microorganisms on *R. pseudoacacia* were determined by analyzing the growth, soil nutrients, soil organic carbon, and soil enzyme activity of *R. pseudoacacia*. [Results] ① The addition of microbial strains increased soil nutrient content and soil enzyme activity. The J_2 microorganism treatment performed the best. ② Readily available soil nutrients initially increased and then decreased with increasing concentration of the water-retaining agent. The greatest effect on soil nutrient and enzyme activity was observed for the 0.3%

收稿日期: 2021-12-27

修回日期: 2022-02-12

资助项目: 江苏省林业科技创新与推广项目“苏北沿海困难地造林新技术集成与示范推广”(LYKJ[2021]30); 百山祖国家公园科学研究项目(2021ZDLY01); 江苏高校优势学科建设工程资助项目(PAPD)

第一作者: 聂晖(1998—), 男(汉族), 安徽省安庆市望江县人, 硕士研究生, 研究方向为矿山修复。Email: nh1263179511@163.com。

通讯作者: 张金池(1961—), 男(汉族), 山东省安丘市人, 博士, 教授, 主要从事林业生态工程研究。Email: zhang8811@njfu.edu.cn。

water-retaining agent concentration. ③ The combinations of J_2B_1 , J_3B_0 , and J_2B_2 had the greatest effect on increasing soil nutrients and enzyme activities. [Conclusion] The addition of soil microbial agents and a water-retaining agent to the soil increased soil nutrients and enzyme activities. The combinations of J_2B_1 , J_3B_0 , and J_2B_2 had the greatest effect.

Keywords: water-retaining agent; microbial agent; spray seeding substrate; soil nutrient

中国经济迅速发展,对于矿产资源的需求大大增加,不可避免地造成了山体原生态植被破坏和水土流失,出现了大量石质边坡和裸露山体等一系列破坏山体,严重影响了人们的生活和经济的持续发展,因此,恢复和重建破坏山体的自然生态植被势在必行^[1]。目前对废弃矿山进行生态植被恢复的技术种类繁多^[2],其中客土喷播技术已被广泛应用到破坏山体生态修复中^[3]。喷播基质通常采用土壤、植物种子、保水剂、黏合剂等物质按照一定的比例混合均匀,喷射在裸露岩面上^[4]。微生物菌剂是微生物肥料的一种^[5],施用微生物菌剂可在一定程度上促进植物的生长^[6],目前有关微生物与岩石之间的相互关系主要集中于岩溶微生物对岩石的溶蚀效果以及作用机理,但是对于岩溶微生物的筛选及应用还少见报道。本研究中添加的岩溶微生物菌种均为室内试验自主筛选鉴定的菌剂,这些菌剂会大量分泌有机酸促进岩石风化^[7-8],可形成促进植物生长的优势微生物菌群,而在喷播基质中加入筛选好的微生物,结合客土喷播技术,有效提高岩壁与喷施基质界面融合性,对岩壁复绿的长期维持具有重要意义^[9]。保水剂有着很强的吸水性能、保水性能和持效性能,添加保水剂有利于植物种子的生长发育^[10]。土壤酶来自于微生物,并且与微生物活性密切相关^[11],它们参与许多重要的生物化学过程,加速土壤的新陈代谢,促进营养元素的循环^[12]。同时,土壤酶活性的高低,可以直接反映土壤生物活性和土壤生化反应强度^[13]。目前,基于已筛菌种的研究大多集中于菌种的鉴定^[14]、菌种的溶岩机制^[15]以及施用菌种对植物生长^[16-17]方面的影响,对于施用菌种后对于土壤养分与酶活性的研究还未展开。本研究以林地贫瘠土为试验材料,将经过筛选鉴定的 3 种土壤菌组合与不同浓度的保水剂施于其中,后播种经过催芽的刺槐(*Robinia pseudoacacia*)种子,生长近 1 a 后取根际土壤,通过测量各项土壤养分与酶活性指标,分析不同土壤菌与保水剂配置下林地土壤的土壤养分和酶活性,以揭示不同土壤菌与保水剂配置模式对土壤的影响机制,遴选出优势的配置,这对于将土壤菌从室内试验扩展到野外实际应用有着重大的意义,可以为野外喷播试验和岩壁复绿工程提供理论依据和技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

盆栽试验于 2018 年 12 月至 2019 年 11 月在江苏省南京林业大学下蜀林场温室(31°7'N, 119°12'E)内进行。温室温度保持在 18 °C~35 °C,相对湿度为 40%~80%,日光照周期为 10~14 h,中午光合光子通量密度(PPFD)约为 1 000 $\mu\text{mol}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 。

1.2 刺槐种子、保水剂和土壤

刺槐由于其根系发达,固土能力强,常用于边坡生态修复^[18]。刺槐种子购自天河苗圃公司(中国江苏)。用苗圃基质培育发芽的种子。将种子置于 60 °C 水中搅拌 5 min 左右,然后用冷水浸泡种子 24 h,之后用蒸馏水清洗种子。清洗完毕后,将种子与湿沙按 1:3 配比混合,然后放置在 20 °C 的培养箱中。之后种子用湿草片覆盖,使其发育 3~5 d,在此期间种子用 30 °C 温水喷洒使其湿润。保水剂由南京林业大学理学院提供,以丙烯酸、丙烯酰胺和腐植酸钾为原材料,采用溶液聚合法制备腐植酸基保水剂,其保水剂的吸水倍数为 821 g/g,在 0.9% 的盐水条件下吸水倍数为 81 g/g^[19]。试验中测得保水剂的 pH 值为 5.9。试验所需土壤取自南京林业大学下蜀林场,土壤类型为黄棕壤,土壤质地为黏壤土。取表土(0—20 cm),通过 2 mm 筛,并与木质纤维、有机肥、泥炭土和石粉按质量比例混合作为苗圃基质(土壤/木质纤维/有机肥/泥炭土/石粉,92:0.7:5:2:0.3)。

1.3 菌剂制备

苏云金芽孢杆菌(*Bacillus thuringiensis*, NL₁₁, 细菌),嗜热一氧化碳链霉菌(*Streptomyces thermo-carboxydus*, NL₁, 放线菌)和卵形孢球托霉(*Gongronella butleri*, NL₁₅, 真菌)均从风化白云岩周围的土壤中分离得到^[8,20]。在之前的研究中发现添加 NL₁₁, NL₁₁+NL₁₅ 和 NL₁+NL₁₁+NL₁₅ 会导致刺槐的光合系统和根系发生显著变化^[21]。将这些微生物引入液体培养基中摇瓶发酵 24 h,之后将微生物菌液引入发酵罐。在发酵的过程中,按照预定时间间隔提取微生物,测定其 OD₆₀₀ 值^[22]。当变化曲线达到峰值并开始下降时,微生物被转移到无菌塑料瓶中,并储存在冰箱中。

1.4 试验设计

试验包括 3 个保水剂处理: B_0 (0%, 0 g/每盆)、 B_1 (0.3%, 0.15 g/每盆)、 B_2 (0.5%, 0.25 g/每盆); 4 个菌剂处理: NL_{11} (J_1), $NL_{11} + NL_{15}$ (J_2), $NL_{11} + NL_{15} + NL_1$ (J_3) 以及无菌液体培养基处理 (J_0)。一共有 12 种组合处理: B_0J_0 , B_0J_1 , B_0J_2 , B_0J_3 , B_1J_0 , B_1J_1 , B_1J_2 , B_1J_3 , B_2J_0 , B_2J_1 , B_2J_2 , B_2J_3 。每个处理 5 个重复, 共 60 盆。根据之前的研究, 以 5 kg 育苗基质和 60 ml 菌液组合对植物的促生作用最好^[16]。每个盆(深 19.5 cm, 直径 29.5 cm)装有 5 kg 育苗基质, 相应浓度的保水剂和 60 ml 微生物接种物(混合微生物接种物的总量为 60 ml)。

首先在盆中填充 2/3 的混合底物, 然后将种子, 保水剂和微生物菌液加入盆中, 最后将剩下的 1/3 的底物加入到盆中。每两周浇 1 次水, 确保每盆土壤含水量达到田间持水量的 75%~80% (每盆水分状况一致)。从 2018 年 12 月到 2019 年 11 月, 在温室中培育刺槐幼苗。于 11 月将用于理化性质和酶活性测定的根区土壤放置于冰盒中, 并快速转移至冰箱中保存。从 2018 年 12 月到 2019 年 11 月, 在温室中培育刺槐幼苗。于 11 月将用于理化性质和酶活性测定的根区土壤放置于冰盒中, 并快速转移至冰箱中保存。

1.5 刺槐生长指标和土壤指标测定

本试验于 2019 年 11 月利用皮尺、游标卡尺和 LI-3000C 便携式叶面积仪 (Li-Cor Inc., USA) 分别测定株高、地径和叶面积。土样带回实验室后, 一份鲜样密封冷藏保存, 一份风干后磨碎, 过 2 mm 筛备用。土壤总碳、总硫和总氮使用元素分析仪 (Vario EL III, Elementar, 德国) 测定。土壤有效磷采取钼锑抗比色法测定^[23]。土壤速效钾测定采取火焰光度计法测定^[23]。硝态氮采用 2 mol/L KCl 浸提—紫外分光光度法测定^[23], 铵态氮采用 2 mol/L KCl 浸提—靛酚蓝比色法测定^[23]。土壤脲酶活性采取苯酸钠—次氯酸钠比色法测定^[24]。土壤酸性磷酸酶活性采用苯基磷酸二钠比色法测量^[24], 土壤蔗糖酶活性通过 3,5-二硝基水杨酸比色法测定^[24]。土壤过氧化氢酶活性采取高锰酸钾滴定法测定^[24]。土壤有机碳采用重铬酸钾氧化—分光光度法^[24]。

1.6 统计分析

使用 Excel 2003 进行数据处理和隶属函数分析; 使用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析 (ANOVA, Duncan 检验) 以检验保水剂和菌剂处理对各项指标的影响; 利用双因素方差分析 (two-way ANOVA, Duncan 检验) 检验保水剂和菌剂处理对各项指标的

主体效应以及交互效应。使用 R 语言 (R 3.4.3) 分析土壤养分和酶活性之间的关系。柱状图使用 Origin 2015 绘制。

隶属函数的计算方法^[25]:

如果某一指标与菌剂促进效果呈正相关, 则:

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

如果某一指标与菌剂促进效果呈负相关, 则:

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

式中: X 为同一措施某一指标的测定值; X_{\max} 为保水剂和菌剂处理措施中某一指标测定值中的最大值; X_{\min} 为保水剂和菌剂处理措施中某一指标测定值中的最小值。

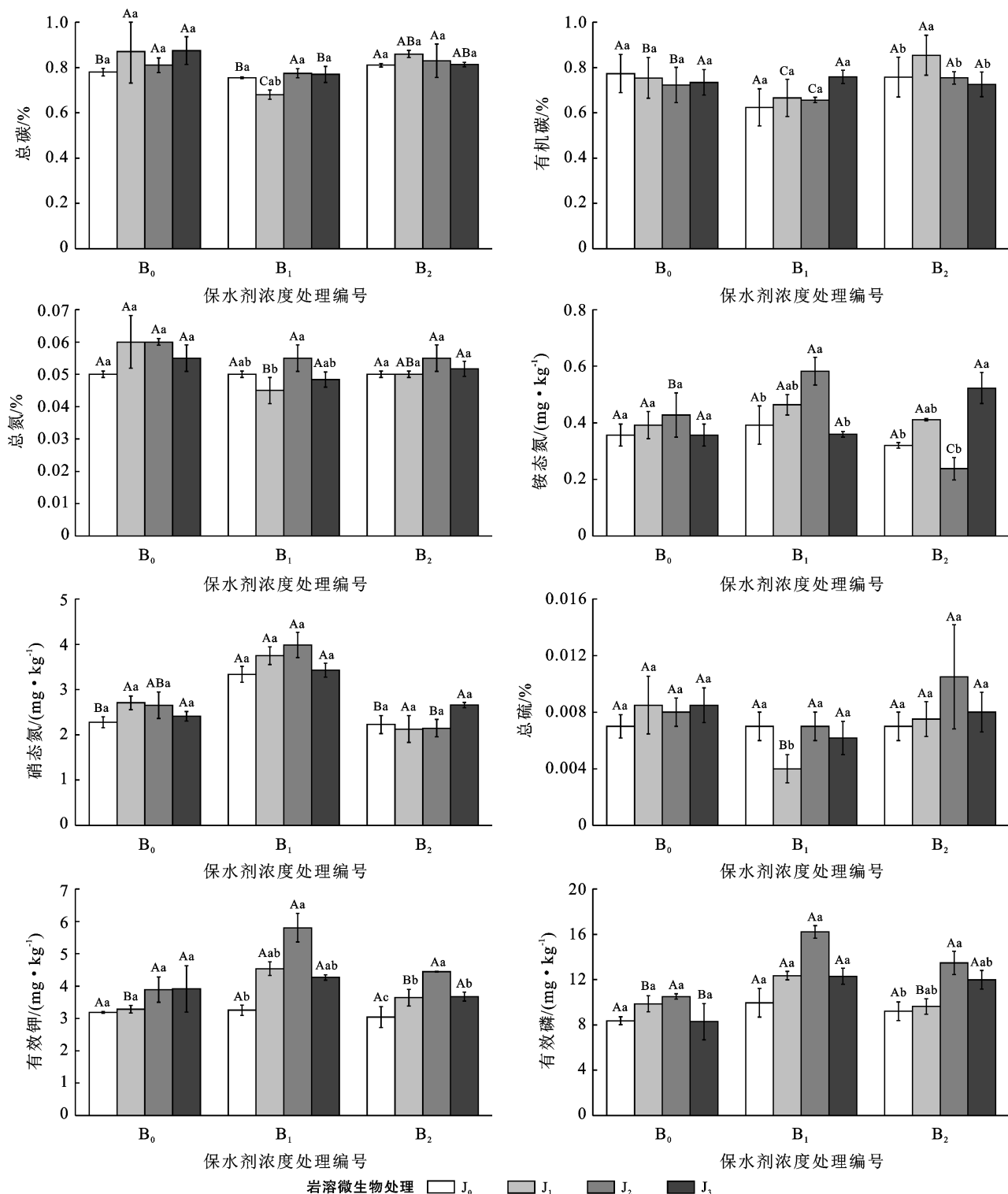
2 结果与分析

2.1 保水剂和微生物添加对刺槐土壤养分的影响

保水剂和微生物添加对刺槐根系土壤养分的影响如图 1 所示。从总体来看, 在相同保水剂处理下, 不同溶岩微生物组合促进了土壤速效养分含量。 B_2J_1 处理显著促进了土壤有机碳含量 ($p < 0.05$)。除在 B_1 保水剂处理下, J_1 处理显著降低了土壤中全硫含量外 ($p < 0.05$), 溶岩微生物处理对土壤全量养分没有显著影响。在 B_2 保水剂处理下, J_1 处理显著提高了土壤中有机碳含量 ($p < 0.05$)。 B_0, B_1 保水剂处理下, 微生物处理对有机碳含量无显著影响。在 B_1 保水剂处理下, J_2 处理显著促进了土壤中有效钾含量 ($p < 0.05$), 在 B_2 保水剂处理下, J_1, J_2, J_3 处理促进了土壤中有效钾含量。在 B_2 保水剂处理下, J_3 处理显著促进了土壤中有效磷含量 ($p < 0.05$)。在 B_1 保水剂处理下, J_2 处理显著提高了土壤中铵态氮含量 ($p < 0.05$)。在 B_2 保水剂处理下, J_3 处理显著提高了土壤中铵态氮含量 ($p < 0.05$)。土壤速效养分随保水剂浓度升高呈现先增加后降低的趋势。在 J_0 处理下, B_2 保水剂处理显著提高了土壤中全碳含量 ($p < 0.05$)。在 J_1, J_3 溶岩微生物处理下, B_2 保水剂处理显著降低了土壤中全碳含量 ($p < 0.05$)。在 J_1 溶岩微生物处理下, B_1 保水剂处理显著降低了土壤中总硫含量 ($p < 0.05$)。在 J_1 溶岩微生物处理下, B_1 保水剂处理显著降低了土壤中全氮含量 ($p < 0.05$)。在 J_1 微生物处理背景下, 土壤中有效钾、有效磷含量随着保水剂添加呈现先增加后降低的趋势 ($p < 0.05$)。在 J_3 微生物处理下, B_1, B_2 保水剂处理显著促进了土壤中有效磷含量 ($p < 0.05$)。在 J_0 微生物处理下, 土壤中硝态氮含量随着保水剂浓度先增加后降低 ($p < 0.05$)。在 J_2 微生物处理下, 保水剂添加对土壤

中铵态氮含量呈现先上升再下降的趋势($p < 0.05$)。在相同菌剂处理条件下,土壤有机碳含量随着保水

剂浓度增加呈现先降低后增加的趋势,在 J_1, J_2 菌剂处理下,有机碳含量先降低后增加($p < 0.05$)。



注:①图中 B_0, B_1, B_2 表示 0%, 0.3%, 0.5% 保水剂浓度处理。② J_0 表示无微生物处理; J_1 表示 NL_{11} 微生物处理; J_2 表示 $NL_{11} + NL_{15}$ 微生物处理; J_3 表示 $NL_{11} + NL_{15} + NL_1$ 微生物处理。③不同小写字母表示同一保水剂处理不同微生物处理间差异显著($p < 0.05$)。不同大写字母表示同一微生物处理下不同保水剂处理间差异显著($p < 0.05$)。下同。

图 1 不同保水剂和溶岩微生物配比对刺槐土壤养分和有机碳的影响

2.2 保水剂和微生物添加对刺槐土壤酶活性的影响
刺槐土壤酶活性指标如图 2 所示。从总体来看,

在相同保水剂浓度处理下,不同溶岩微生物处理促进了土壤中酸性磷酸酶、脲酶、蔗糖酶活性。而不同保水

剂浓度对土壤酶活性有不同影响。在 B_1 , B_2 保水剂处理下, J_1 , J_2 , 和 J_3 处理显著提高了土壤酸性磷酸酶活性($p < 0.05$)。在 B_1 保水剂处理下, J_2 处理显著促进了土壤中脲酶活性($p < 0.05$)。在 B_0 保水剂处理下, J_3 处理显著促进了土壤蔗糖酶活性($p < 0.05$)。微生物处理对土壤过氧化氢酶活性没有显著影响。在 J_2 和 J_3 微生物处理下, 酸性磷酸酶活性随着保水剂浓度的增

加呈现先增加后降低的效果。在 J_3 微生物处理下, B_1 , B_2 保水剂处理显著降低了土壤中脲酶活性($p < 0.05$)。在 J_0 微生物处理下, 添加保水剂促进了土壤中蔗糖酶活性。在 J_2 微生物处理下, 蔗糖酶活性随着保水剂浓度呈现先增加后降低的趋势。而在 J_3 微生物处理下, B_1 , B_2 保水剂处理降低了土壤中蔗糖酶活性。保水剂处理对土壤过氧化氢酶活性没有显著影响。

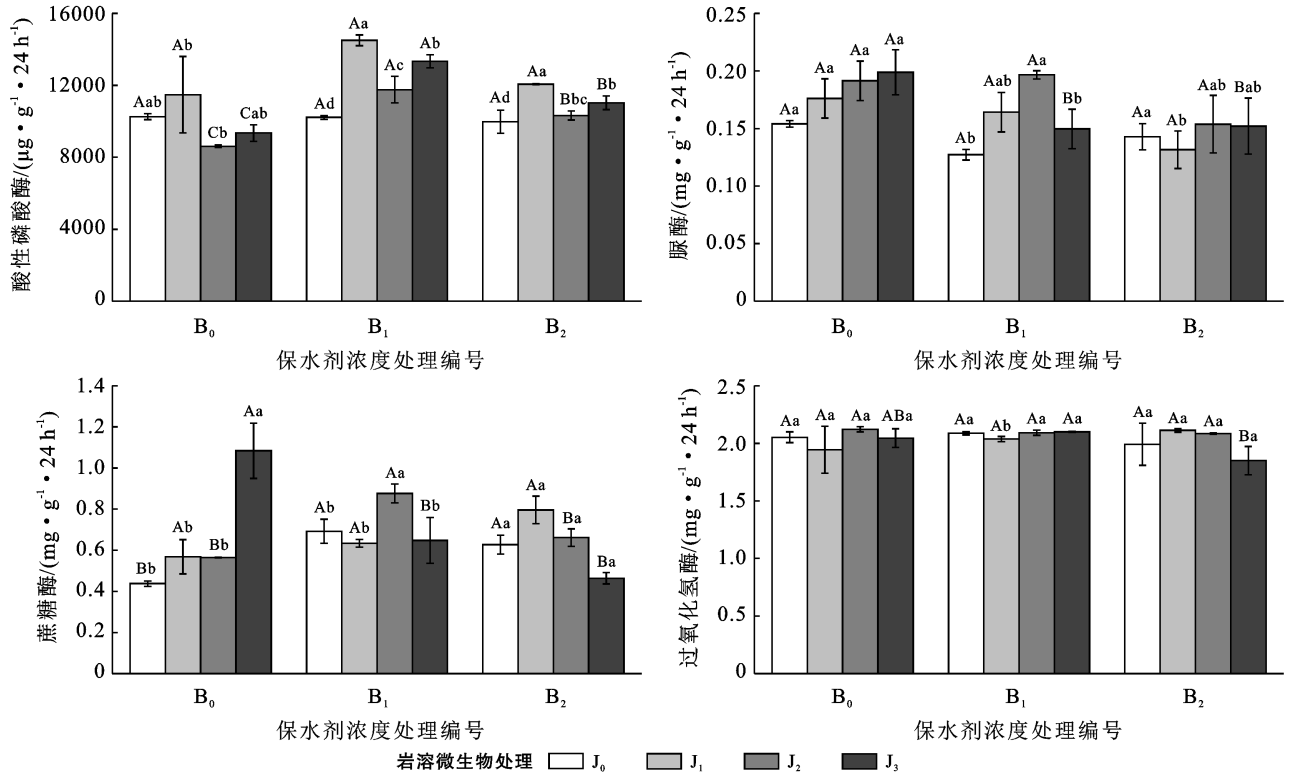


图 2 不同保水剂和溶岩微生物配比对刺槐土壤酶活性的影响

2.3 保水剂和微生物添加对刺槐生长的影响

保水剂和微生物菌剂添加对刺槐植物生长的影响如图 3 所示。从总体看,在相同保水剂处理下,添加溶岩微生物对植物的叶面积、地径、株高有着不同程度的促进。在 B_0 保水剂处理下, J_1 , J_2 处理显著提高了植物的叶面积($p < 0.05$)。在 B_1 保水剂处理下, J_1 , J_2 , J_3 菌剂处理显著提高了植物的叶面积($p < 0.05$)。不同浓度保水剂处理对刺槐地径没有显著影响。在 B_1 保水剂处理下, J_1 , J_2 菌剂处理显著提高了植物的株高($p < 0.05$),在 B_2 保水剂处理下, J_1 , J_2 和 J_3 处理显著提高了植物的株高($p < 0.05$)。在 J_2 , J_3 岩溶微生物处理下, B_1 保水剂处理显著提高了刺槐的叶面积。在 J_1 , J_2 溶岩微生物处理下, B_1 保水剂处理显著促进了刺槐的株高($p < 0.05$)。

2.4 保水剂和微生物添加对土壤养分和酶活性的影响

保水剂和溶岩微生物菌剂对土壤养分和酶活性的影响详见表 1。保水剂对土壤全碳($p < 0.01$)、全氮

($p < 0.01$)、全硫($p < 0.05$)、有效钾($p < 0.05$)、硝态氮($p < 0.01$)、脲酶($p < 0.001$)、酸性磷酸酶($p < 0.001$)有显著影响;微生物对土壤全氮($p < 0.05$)、有机碳($p < 0.001$)、有效钾($p < 0.01$)、脲酶($p < 0.001$)、酸性磷酸酶($p < 0.001$)有显著影响;保水剂与微生物菌剂的协同作用对有机碳($p < 0.001$)、有效钾($p < 0.01$)、有效磷($p < 0.01$)、铵态氮($p < 0.01$)、脲酶($p < 0.01$)、酸性磷酸酶($p < 0.05$)、蔗糖酶($p < 0.01$)有显著影响。

2.5 刺槐土壤养分与土壤酶活性之间的关系

刺槐土壤养分与土壤酶活性之间的相关性如图 4 所示。酸性磷酸酶与土壤全氮、全碳、全硫含量呈极显著负相关关系($p < 0.01$),与硝态氮呈显著正相关关系($p < 0.05$)。脲酶与铵态氮呈显著正相关关系($p < 0.05$)。有机碳与全碳,全硫呈显著正相关关系($p < 0.05$),与硝态氮呈极显著负相关关系($p < 0.01$),与铵态氮呈显著负相关关系($p < 0.05$)。

表 1 不同溶岩微生物菌剂和保水剂处理下土壤养分和酶活性的双因素方差分析

指标	保水剂		微生物菌剂		保水剂×微生物菌剂	
	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>	<i>F</i>	<i>P</i>
全碳	9.558	0.001**	1.459	0.251	1.642	0.179
全氮	7.731	0.003**	4.154	0.017*	1.731	0.157
全硫	5.679	0.01*	1.872	0.161	1.454	0.236
有机碳	1.421	0.261	12.599	0.000***	12.38	0.000***
有效钾	4.08	0.03*	6.848	0.002**	5.12	0.002**
有效磷	0.787	0.467	5.968	0.003**	5.181	0.002**
铵态氮	2.309	0.121	2.468	0.086	7.551	0.002**
硝态氮	6.249	0.007**	0.322	0.809	0.728	0.632
脲酶	13.457	0.000***	14.031	0.000***	4.306	0.004**
酸性磷酸酶	25.491	0.000***	16.236	0.000***	3.299	0.016*
蔗糖酶	0.438	0.65	1.811	0.172	4.738	0.003**
过氧化氢酶	1.289	0.294	1.586	0.219	1.959	0.112

注: *, ** 和 *** 分别表示在 p 小于 0.001, 0.01, 0.05 水平下相关性显著。

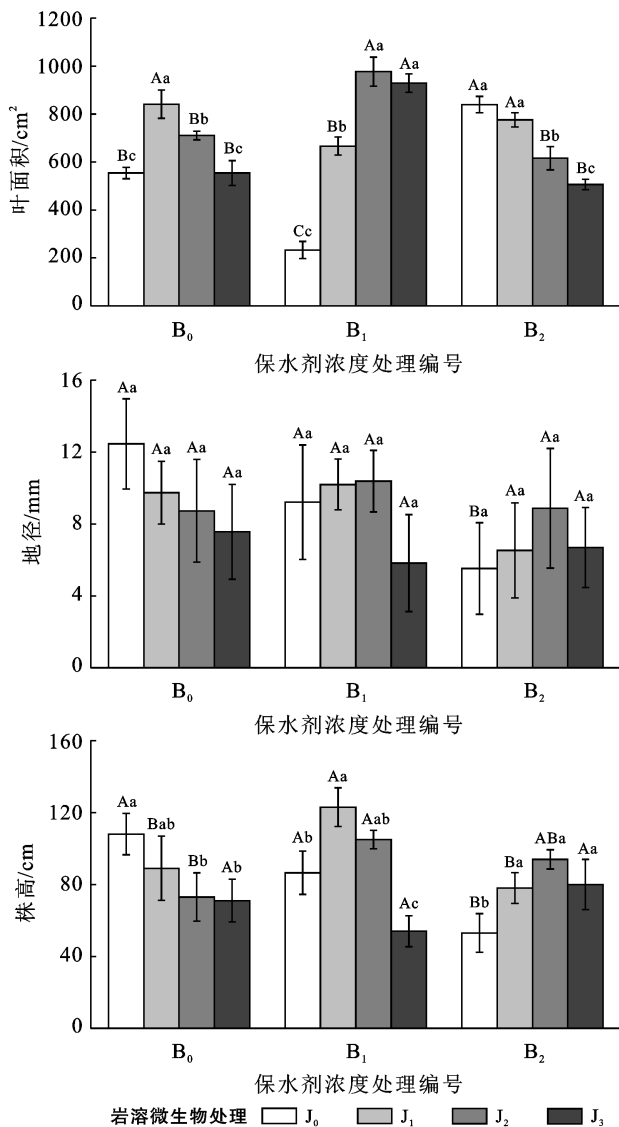
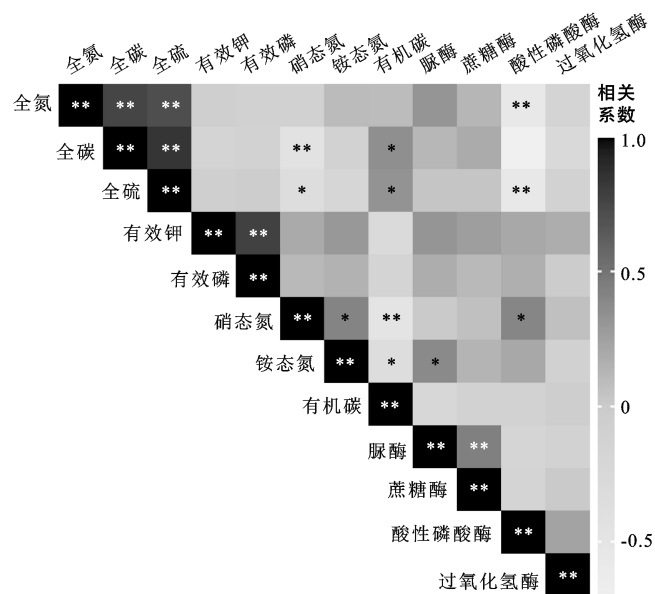


图 3 不同保水剂和溶岩微生物配比对刺槐生长的影响

2.6 改良措施综合质量评价

采用模糊数学的隶属函数法,对刺槐的土壤养分

和酶活性进行综合评价,对各组合的土壤养分和酶活性的隶属函数值进行计算,取平均值。隶属函数值越大,说明该配比对土壤肥力和酶活性的促进作用越好,对不同配比的隶属函数均值进行排序。



注: * 表示在 ($p < 0.05$) 水平下显著相关, ** 表示在 ($p < 0.01$) 水平下极显著相关。

图 4 刺槐土壤养分与土壤酶活性之间相关性分析

2.6.1 溶岩微生物和保水剂处理下刺槐土壤养分和酶活性的综合评价 对保水剂和溶岩微生物处理下,刺槐土壤养分指标进行隶属函数分析(表 2),其中对土壤肥力提升效果最大的是 J_2B_1 处理, J_3B_0 和 J_2B_2 处理次之,其隶属函数均值为 0.568 4, 0.425 9 和 0.406 5,这些保水剂和菌剂配比对土壤肥力和酶活性促进作用最大。

表 2 溶岩微生物和保水剂处理下刺槐土壤指标隶属函数分析

处理	土壤养分	土壤酶活性	隶属函数值	排序
J ₀ B ₀	0.240 2	0.384 3	0.320 6	12
J ₀ B ₁	0.291 8	0.419 2	0.340 8	10
J ₀ B ₂	0.241 7	0.347 6	0.321 3	11
J ₁ B ₀	0.368 5	0.446 1	0.413 1	7
J ₁ B ₁	0.276 3	0.608 0	0.400 7	8
J ₁ B ₂	0.285 7	0.537 8	0.424 2	5
J ₂ B ₀	0.383 5	0.445 5	0.424 4	4
J ₂ B ₁	0.528 3	0.638 4	0.556 4	1
J ₂ B ₂	0.369 6	0.471 0	0.433 6	3
J ₃ B ₀	0.341 4	0.573 7	0.437 0	2
J ₃ B ₁	0.307 6	0.573 4	0.420 8	6
J ₃ B ₂	0.379 8	0.316 6	0.389 6	9

2.6.2 溶岩微生物处理下刺槐土壤养分和酶活性的综合评价 微生物处理下刺槐土壤养分和酶活性的隶属函数值分析详见表 3。溶岩微生物处理下土壤肥力指标的隶属函数平均值和排序为:J₂>J₃>J₁>J₀。说明添加溶岩微生物对土壤肥力和酶活性有促进作用,双微生物处理效果最好。

表 3 溶岩微生物处理下刺槐土壤指标隶属函数分析

微生物处理	土壤养分	土壤酶活性	隶属函数值	排序
J ₀	0.299 5	0.383 7	0.327 6	4
J ₁	0.353 7	0.530 7	0.412 7	3
J ₂	0.448 1	0.518 3	0.471 5	1
J ₃	0.378 4	0.487 9	0.414 9	2

2.6.3 保水剂处理下刺槐土壤养分和酶活性的综合评价 保水剂处理下刺槐土壤养分和酶活性的隶属函数值分析详见表 4。保水剂处理下土壤肥力指标的隶属函数平均值和排序为:B₁>B₀>B₂。说明 B₁ 保水剂处理对土壤肥力和酶活性促进作用最好。

表 4 保水剂处理下刺槐土壤指标隶属函数分析

保水剂处理	土壤养分	土壤酶活性	隶属函数值	排序
B ₀	0.367 0	0.462 4	0.398 7	2
B ₁	0.364 3	0.559 8	0.429 7	1
B ₂	0.378 1	0.418 3	0.391 5	3

3 讨论与结论

大量研究^[26]表明,土壤中微生物参与土壤中的养分循环以减少养分流失。方差分析结果表明,添加微生物菌剂能够增加土壤速效养分含量,且作用效果大于保水剂。原因可能是因为溶岩微生物能够分泌大量有机酸,促进了土壤中有效养分的释放^[27]。陈晓燕^[28],沙月霞等^[29]研究表明,施用微生物菌剂能够提

高土壤有机质、硝态氮、铵态氮等养分含量。土壤养分的增加一方面是因为微生物分解了土壤中的难溶性养分^[30],另一方面是由于保水剂可以为土壤保持更多的土壤水分,使得植物所需养分能够缓慢释放以供植物吸收利用^[31]。土壤有机碳是植物养分的重要储藏库,其缓慢释放的营养物质有利于植物的充分吸收与利用^[32]。在 0.5% 保水剂处理下,土壤有机碳在 J₁ 微生物处理下质量分数显著提高,可能是因为微生物菌剂能够改善土壤结构,影响土壤的保水,保肥等性状^[33]。土壤水分是影响作物生长的重要因素^[34]。在相同微生物处理情况下,保水剂添加对土壤中速效养分有促进作用,且随着保水剂浓度的增加呈现先增加后降低的趋势。在 0.3% 保水剂浓度下,保水剂对土壤养分促进作用更大。土壤有机碳随着保水剂浓度增加呈现先降低后增加的趋势,可能是因为 0.3% 保水剂浓度下,在一定程度上改善了土壤结构,使得微生物数量和活性提高,更多的土壤有机碳被分解,有机碳质量分数降低。而在 0.5% 保水剂浓度下,土壤酶活性降低,对有机碳的分解作用减弱,土壤有机碳含量有所增加,陈艺超^[35]的研究也有类似结论。

土壤酶活性是表征土壤养分变化的敏感指标,对土壤养分的迁移与循环有着重要影响^[36]。方差分析结果表明,添加溶岩微生物提高了刺槐土壤中的酸性磷酸酶,脲酶活性。原因可能是微生物加速分解了土壤中的有机质,提供了酶促反应的底物^[37]。此结论在李国^[38]的研究中也有体现。保水剂对土壤酶活性也有显著影响。酸性磷酸酶活性随着保水剂浓度增加呈现先增加后降低的趋势,可能是因为适宜的保水剂浓度促进了土壤中酸性磷酸酶活性,李倩^[39]的研究中也有类似结论。在 J₃ 微生物处理背景下,0.5% 保水剂浓度处理显著降低了脲酶和蔗糖酶活性,可能是因为土壤水分含量过多时降低了土壤酶活性^[40]。在 waldrop^[41]的研究中,酶活性随着土壤水分增加而降低,而在靳振江^[42]的研究中,酶活性与土壤水分呈正相关,可见土壤水分对土壤酶活性的影响十分复杂。

土壤养分是影响植物生长的重要因素,是土壤理化性质的主要部分^[43]。大量研究表明,土壤酶活性与土壤肥力之间关系紧密^[44-45],从土壤养分与酶活性的相关性分析可以看出,土壤酸性磷酸酶与土壤养分关系最好,其次是脲酶和蔗糖酶。由于土壤酶活性与土壤养分关系密切,因此可以用酶活性表征土壤的肥力水平。本研究结果表明,各处理间指标变化比较复杂,采用单一指标对改良效果无法进行有效评价,因此采样模糊数学隶属函数分析法对土壤养分含量和酶活性进行综合评价^[46]。本研究结果表明保水剂和

微生物的添加可以增加土壤中的养分含量和酶活性。隶属函数分析表明, J_2B_1 , J_3B_0 , J_2B_2 3 种处理对刺槐土壤特性改良效果较好。只添加微生物时 J_1 , J_2 , J_3 3 种处理对刺槐土壤特性均有改良效果, 其中双微生物处理效果最好, 原因可能是接种微生物内部或接种微生物与本土微生物之间的协同与拮抗作用^[47], 例如在 Mohammad^[48] 的研究中, 多微生物接种对高粱土壤养分的促进作用大于单微生物接种; 在 Yu^[49] 的研究中, 接种 AM 真菌于未灭菌土壤中其促生效果大于灭菌土壤。而在本试验中, 造成接种微生物之间的差异可能是因为 NL_{15} 和 NL_1 的添加, 其影响机制需要进一步研究。保水剂浓度对土壤养分和酶活性有不同的效果。隶属函数分析结果表明, 0.5% 保水剂处理对土壤改良效果较差, 而 0.3% 保水剂处理对土壤改良效果较好。原因可能是不同的植物有着不同的保水剂适用量^[50-51]。适宜的保水剂浓度增加了土壤水分, 为微生物提供了适宜的生长环境, 能够促进土壤养分转化和土壤酶活性。而保水剂和菌剂对刺槐生长的影响也验证了保水剂和溶岩微生物菌剂的改土作用。在 0.3% 保水剂梯度下, J_1 , J_2 , J_3 菌剂处理对刺槐叶面积有显著促进作用; J_2 , J_3 菌剂处理对刺槐株高有显著促进作用。

综上所述, 保水剂和岩溶微生物添加能够增加土壤养分和酶活性。微生物的添加能够增加土壤中的有效磷、有效钾、铵态氮、硝态氮、有机碳含量和脲酶、蔗糖酶、酸性磷酸酶活性。只添加微生物时, 以双微生物处理促进效果最好。土壤速效养分含量随着保水剂浓度升高呈现先增加后降低的趋势。只添加保水剂时, 0.3% 浓度促进效果最好。混合施用, J_2B_1 , J_3B_0 , J_2B_2 促进效果最好。

[参 考 文 献]

- [1] 张小庆. 保水剂不同配比在岩壁复绿基质中的应用研究[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2010.
- [2] 吴和政, 郑薇. 我国矿山生态环境及生态恢复技术的现状[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(7): 46-47.
- [3] 陈波, 包志毅. 国外采石场的生态和景观恢复[J]. 水土保持学报, 2003, 17(5): 71-73.
- [4] 王丽. 岩壁复绿基质的持水性及土壤微生物活性[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2010.
- [5] 朱金英. 微生物菌剂在设施黄瓜和番茄上的应用效果研究[D]. 山东泰安: 山东农业大学, 2014.
- [6] 李恒蓉, 陈富忠, 李辉, 等. 水稻应用“富靠奇”微生物菌剂试验初报[J]. 北方水稻, 2009, 39(5): 59-61.
- [7] Wu Yanwen, Zhang Jinchi, Guo Xiaoping. An indigenous soil bacterium facilitates the mitigation of rocky desertification in carbonate mining areas [J]. Land Degradation & Development, 2017, 28(7): 2222-2233.
- [8] Wu Yanwen, Zhang Jinchi, Guo Xiaoping, et al. Isolation and characterisation of a rock solubilising fungus for application in mine-spoil reclamation [J]. European Journal of Soil Biology, 2017, 81: 76-82.
- [9] 王丽, 张金池, 梦莉, 等. 土壤菌对植被生长及喷播基质物理结构的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(2): 144-147.
- [10] 叶建军, 周明涛, 许文年. 谈喷射护坡绿化技术[J]. 水土保持研究, 2004, 11(2): 194-197.
- [11] 张翼, 曹仕明, 史俊, 等. 烟草土壤微生物与土壤酶活性分析[J]. 湖北农业科学, 2012, 51(19): 4229-4232.
- [12] Kang Yaohu, Liu Shuhui, Wan Shuqin, et al. Assessment of soil enzyme activities of saline-sodic soil under drip irrigation in the Songnen plain [J]. Paddy and Water Environment, 2013, 11(1): 87-95.
- [13] 田永强, 王敬国, 高丽红. 设施菜田土壤微生物学障碍研究进展[J]. 中国蔬菜, 2013(20): 1-9.
- [14] 吴雁雯, 张金池, 郭晓平, 等. 应用于矿山修复的高效菌株鉴定与溶岩机制: 基于增强回归树分析[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 283-293.
- [15] 王广林, 邓辉, 聂丽, 等. 卵形孢球托霉 Gongronellabutleri NL-15 对石灰岩的侵蚀机制[J]. 应用与环境生物学报, 2018, 24(2): 374-378.
- [16] 王鹰翔. 不同土壤菌配置对紫穗槐幼苗生理生态学特性的影响[D]. 江苏南京: 南京林业大学, 2017.
- [17] 王鹰翔, 张金池, 吴雁雯, 等. 喷播基质中土壤菌施用对紫穗槐幼苗光合特性和叶绿素荧光参数的影响[J]. 环境科学研究, 2017, 30(6): 902-910.
- [18] 王琳琳, 李素艳, 孙向阳, 等. 不同隔盐措施对滨海盐碱地土壤盐运移及刺槐光合特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(5): 1388-1398.
- [19] 李坤, 张金池, 王炜强, 等. 腐植酸钾—丙烯酸—丙烯酰胺保水剂的制备及吸液性能研究[J]. 化工新型材料, 2019, 47(4): 125-128.
- [20] Wu Yanwen, Zhang Jinchi, Wang Lingjian, et al. A rock-weathering bacterium isolated from rock surface and its role in ecological restoration on exposed carbonate rocks [J]. Ecological Engineering, 2017, 101: 162-169.
- [21] Li Chong, Jia Zhaohui, Yuan Yingdan, et al. Effects of mineral-solubilizing microbial strains on the mechanical responses of roots and root-reinforced soil in external-soil spray seeding substrate [J]. Science of the Total Environment, 2020, 723: 138079.
- [22] Guimarães B C M, Arends J B A, van der Ha D, et al. Microbial services and their management: Recent progresses in soil bioremediation technology [J]. Applied Soil Ecology, 2010, 46(2): 157-167.
- [23] 南京农学院. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1980.

- [24] 关松荫.土壤酶及其研究法[M].北京:农业出版社,1986.
- [25] 韩瑞宏,卢欣石,高桂娟,等.紫花苜蓿抗旱性主成分及隶属函数分析[J].草地学报,2006,14(2):142-146.
- [26] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [27] Bharti N, Barnawal D, Maji D, et al. Halotolerant PGPRs prevent major shifts in indigenous microbial community structure under salinity stress [J]. Microbial Ecology, 2015,70(1):196-208.
- [28] 陈晓燕,王小琳,谢先进.不同微生物菌剂对玉米产量及土壤肥力的影响[J].热带农业科学,2021,41(9):11-16.
- [29] 沙月霞,王晨曦,邢敏,等.微生物菌剂拌土对玉米农田土壤细菌群落多样性的影响[J].安徽农业科学,2021,49(5):138-142.
- [30] 沈仁芳,赵学强.土壤微生物在植物获得养分中的作用[J].生态学报,2015,35(20):6584-6591.
- [31] 李希,刘玉荣,郑袁明,等.保水剂性能及其农用安全性评价研究进展[J].环境科学,2014,35(1):394-400.
- [32] 王虎,王旭东,田宵鸿.秸秆还田对土壤有机碳不同活性组分储量及分配的影响[J].应用生态学报,2014,25(12):3491-3498.
- [33] 许剑敏.生物菌肥对矿区复垦土壤磷、有机质、微生物数量的影响[J].山西农业科学,2011,39(3):250-252.
- [34] 邹慧,高光耀,傅伯杰.干旱半干旱草地生态系统与土壤水分关系研究进展[J].生态学报,2016,36(11):3127-3136.
- [35] 陈艺超,孙保平,张建锋,等.保水剂用量对矿区紫花苜蓿生长的影响[J].中国水土保持科学,2018,16(4):124-131.
- [36] 孙波,赵其国,张桃林,等.土壤质量与持续环境(Ⅲ):土壤质量评价的生物学指标[J].土壤,1997,29(5):225-234.
- [37] 张美存,程田,多立安,等.微生物菌剂对草坪植物高羊茅生长与土壤酶活性的影响[J].生态学报,2017,37(14):4763-4769.
- [38] 李国,易强,许世武,等.微生物菌剂对新疆棉花连作障碍的消减研究[J].中国土壤与肥料,2020(1):202-207.
- [39] 李倩,巴图,刘景辉,等.保水剂施用方式对土壤酶活性及马铃薯产量的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2017,45(5):116-122.
- [40] Brockett B F T, Prescott C E, Grayston S J. Soil moisture is the major factor influencing microbial community structure and enzyme activities across seven biogeoclimatic zones in Western Canada [J]. Soil Biology and Biochemistry, 2012,44(1):9-20.
- [41] Waldrop M P, Firestone M K. Altered utilization patterns of young and old soil C by microorganisms caused by temperature shifts and N additions [J]. Biogeochemistry, 2004,67(2):235-248.
- [42] 靳振江,曾鸿鹄,李强,等.起源喀斯特溶洞湿地稻田与旱地土壤的微生物数量、生物量及土壤酶活性比较[J].环境科学,2016,37(1):335-341.
- [43] 曹慧,孙辉,杨浩,孙波,等.土壤酶活性及其对土壤质量的指示研究进展[J].应用与环境生物学报,2003,9(1):105-109.
- [44] 劳秀荣,孙伟红,王真,等.秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J].土壤学报,2003,40(4):618-623.
- [45] 孙瑞莲,赵秉强,朱鲁生,等.长期定位施肥对土壤酶活性的影响及其调控土壤肥力的作用[J].植物营养与肥料学报,2003,9(4):406-410.
- [46] 王建国,杨林章,单艳红.模糊数学在土壤质量评价中的应用研究[J].土壤学报,2001,38(2):176-183.
- [47] 李俊领,马晓寒,张豫丹,等.土壤微生物与烟草青枯病发生关系的研究进展[J].生物技术通报,2020,36(9):88-99.
- [48] Sahib M R, Pervaiz Z H, Williams M A, et al. Rhizobacterial species richness improves sorghum growth and soil nutrient synergism in a nutrient-poor greenhouse soil [J]. Scientific Reports, 2020,10:15454.
- [49] Yu Meng, Xie Wei, Zhang Xin, et al. Arbuscular mycorrhizal fungi can compensate for the loss of indigenous microbial communities to support the growth of liquorice (*glycyrrhiza uralensis fisch.*) [J]. Plants (Basel, Switzerland), 2019,9(1):E7.
- [50] 吉林.保水剂对干旱矿区土壤改良的试验研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2014.
- [51] 武毅,孙保平,张建锋,等.微生物菌肥和保水剂对干旱区土壤肥力的影响研究[C]//陕西西安:2019年中国环境科学学会科学技术年会论文集(第3卷),2019.