

解钾细菌对不同黏土矿物含量土壤微生物和酶活性的影响

尚海丽^{1,2}, 毕银丽^{1*}, 李少朋¹, 解文武¹

(1. 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; 2. 内蒙古科技大学矿业研究院, 内蒙古包头 014010)

摘要 [目的] 开发一种绿色经济的土壤肥料改善西北矿区退化土壤质地。[方法] 通过日光温室短期盆栽的方式, 以玉米为宿主, 解钾细菌为供试菌株, 研究解钾细菌对不同黏土矿物配比土壤中微生物数量和土壤酶活性的影响。[结果] 土壤黏土矿物含量增加能提高解钾细菌和真菌数量。当土壤黏土矿物质量分数 68%、75% 时, 解钾细菌和真菌数量分别达到最大值。解钾细菌和黏土矿物协同作用对不同土壤酶活性影响各异。解钾细菌在不同黏土矿物含量水平均显著提高酸性磷酸酶和蔗糖酶活性; 在黏土矿物质量分数 ≤ 38% 时显著提高脲酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性。土壤综合肥力水平最佳处理为黏土矿物质量分数 68% 接菌处理。[结论] 解钾细菌和黏土矿物协同有效提高土壤微生物数量, 增加酶活性, 这对综合利用解钾细菌开发矿区土壤肥力和恢复矿区生态具有重要意义。

关键词 解钾细菌; 微生物; 土壤酶活性; 黏土矿物; 主成分分析

中图分类号 S154.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)31-0124-06

The Effects of Potassium Solubilizing Bacteria on Microorganism and Enzyme Activity in Soil with Different Content of Clay Minerals

SHANG Hai-li^{1,2}, BI Yin-li¹, LI Shao-peng¹ et al (1. State Key Laboratory of Coal Resource and Safety Mining, China University of Mining & Technology (Beijing), Beijing 100083; 2. Institute of Mines Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou, Inner Mongolia 014010)

Abstract [Objective] To develop a green economic soil fertilizer for improving the quality of degraded soil in Northwest Mining Area. [Method] Potassium solubilizing bacteria (PSB) were cultured in a short-term pot in a solar greenhouse for studying the effects of PSB on microbial quantity and enzyme activities in soils with different clay mineral ratios. [Result] Soil clay mineral content was increased, which promoted the quantity of PSB and increased the number of fungi. When the clay mineral content of soil was 68% and 75%, the number of PSB and fungi reached the maximum. Synergism of PSB and clay minerals had different effects on soil enzyme activities. The activities of acid phosphatase and sucrose were significantly increased by PSB at different clay mineral content levels. The activities of urease, amylase and catalase were significantly increased when the clay mineral content was less than 38%. The best treatment level of soil comprehensive fertility level was that with clay mineral mass fraction 68% and with PSB treatment. [Conclusion] PSB and clay minerals can effectively enhance soil microbial biomass and promote enzyme activities. It is of great significance to exploit the soil fertility and restore the ecology of mining area by using PSB.

Key words Potassium solubilizing bacteria (PSB); Microorganisms; Soil enzyme activity; Clay mineral; Principal component analysis

神东煤矿位于毛乌素沙漠和黄土高原过渡地带, 气候干旱少雨, 土壤贫瘠。该地区土壤中广泛分布伊利石、钾长石等富钾矿物, 是土壤钾素的潜在来源, 这为利用解钾细菌开发该地区土壤钾肥潜力、提高土壤质量提供了可能性^[1]。因此, 研究解钾细菌对土壤质地的改良效应, 对促进微生物复垦技术在矿区土壤改良中的高效合理应用具有重要意义。

土壤微生物通常附着在黏土矿物或黏土矿物-有机质复合体表面, 黏土矿物为微生物提供养分和生命活动的场所, 同时, 土壤微生物也改造黏土矿物成分和结构^[2]。因此, 土壤黏土矿物含量和种类的变化会引起土壤微生物数量和群落结构的变化^[3-4]。

土壤酶是土壤重要组分之一, 也是土壤生物化学活动的重要参与者, 在土壤物质循环过程中起着不可忽视的作用^[5]。首先, 土壤酶与土壤微生物生命活动密切相关。赵艳等^[6]从玉米、黑麦草等植被根际土壤筛选出的 5 株胶质芽孢杆菌对黑麦草根际土壤脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶活性均产

生积极作用。土壤酶活性与土壤肥力关系密切, 它与土壤微生物共同推动土壤新陈代谢过程^[7]。研究表明, 土壤长期施用氮、磷、钾肥不但影响土壤微生物群落组成和功能多样性, 而且影响不同土壤酶的活性^[8-9]。脲酶酶促反应的产物是 NH_4^+ , 施用氮肥后 NH_4^+ 含量增加, 抑制脲酶活性中微生物诱导产物, 导致脲酶活性降低, 而施用有机肥则提高脲酶活性^[10]。

目前关于土壤酶活性的研究集中在不同耕作方式、土壤类型、微生物菌剂培养等条件对土壤酶活性的影响^[11-12]。解钾细菌和黏土矿物协同作用对土壤酶活性的影响鲜见报道。因此, 笔者就解钾细菌对矿区不同黏土矿物含量土壤中土壤微生物和酶活性的影响进行探讨, 并采用主成分分析的方法分析解钾细菌和黏土矿物协同作用对土壤综合肥力的影响, 为进一步探索解钾细菌在矿区浅埋古河道退化土壤改良中的应用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料 供试土壤由伊利石、钾长石 2 种富钾矿物与纯净河沙以不同比例混合组成人工培土(表 1)。其中, 2 种矿物分别选用河北省灵寿县天然伊利石黏土岩和钾长石矿粉, 粒径 < 0.15 mm, 纯净河沙选自北京郊区, 粒径 < 2 mm。

供试微生物为解钾细菌 C_6X , 由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室自行筛选^[13], 并经广东省微生物分析检测中心进一步分离纯化, 鉴定该菌种为 *Phyllobacterium ifriqiyense*, 属革兰氏阴性菌, 记为 C_6X 。

基金项目 国家重点研发计划项目(2016YFC0501106); 国家自然科学基金项目(51574253); 内蒙古自治区自然科学基金项目(2018MS05045); 内蒙古自治区高等学校科学研究项目(NJZY17173)。

作者简介 尚海丽(1985—), 女, 陕西延安人, 讲师, 博士, 从事矿区生态修复研究。* 通讯作者, 教授, 博士生导师, 从事微生物复垦研究。

收稿日期 2018-08-27

供试植物为玉米,玉米种子采用中国农业科学院选育的 品糯 28。

表 1 人工培土的黏土矿物组成和理化性质

Table 1 Clay mineral compositions and physicochemical characteristics of artificial soils

编号 Label	黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay minerals//%			pH	速效钾 Available potassium mg/kg	有机质 Organic matter g/kg
	伊利石 Illite	钾长石 Microcline	石英 Quartz			
1	10	8	82	9.04	67.51	1.04
2	10	15	75	9.09	94.71	1.01
3	30	8	62	9.04	106.80	1.03
4	30	15	55	9.12	137.60	1.19
5	60	8	32	9.29	172.10	1.06
6	60	15	25	9.35	200.70	1.13

1.2 试验方法 试验于 2014 年 6 月在中国矿业大学(北京)日光温室进行,供试土壤分别设置 6 种黏土矿物配比(表 1),按照土柱编号,黏土矿物在土壤中的质量分数依次为 18%、25%、38%、45%、68%和 75%。每种黏土矿物配比又设置接菌和接灭活菌 2 种处理,共 12 个处理,每种处理设 3 个重复,合计 36 个盆栽。栽种器皿采用聚氯乙烯管,规格为 10 cm(直径)×50 cm(柱高),每个土柱装土 5 kg,土壤容重 1.59 g/cm³。供试土壤经高温蒸汽灭菌并晾干,装柱浇水达到土壤最大饱和持水量,水分平衡 1 d 后播种。玉米种子用体积浓度 10%的 H₂O₂ 浸泡 10 min 消毒,去离子水清洗至干净,每个土柱播种玉米 3 株,待出苗 4 d 后间苗至 1 株,生长期 90 d,培养期间浇水量以称量法维持土壤田间持水率的 70%,为轻度干旱水平。菌液和灭活菌液于出苗后 7 d 随浇水均匀浇灌土柱,菌液量为土壤田间持水率的 10%。底肥采用 NH₄NO₃、NH₄H₂PO₄ 配制营养液,使供试土壤 N、P 浓度分别达 120、30 mg/kg。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 可培养的解钾细菌和真菌数量。培养期 90 d 结束后,采集根际新鲜土壤,过 2 mm 筛,4 ℃ 冷藏待测。采用微生物稀释平板计数法,解钾细菌选择硅酸盐细菌培养基,真菌选择孟加拉红培养基,二者均以 1 g 干土形成的菌落数计数^[14]。

1.3.2 土壤全氮、速效磷、速效钾和缓效钾。培养期 90 d 结束后,采集根际新鲜土壤,自然阴干,过 0.25 mm 筛待测。土壤全氮采用半微量开氏消煮法测定;土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提和钼锑抗显色法测定;土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提法测定;采用 1 mol/L HNO₃ 煮沸 10 min 得到酸溶性钾,减去速效钾含量即为土壤缓效钾含量^[15]。

1.3.3 土壤酶活性。培养期 90 d 结束后,采集根际新鲜土壤,过筛 4 ℃ 保存待测。过氧化氢酶采用容量法测定,以 0.3%过氧化氢为基质,以 25 mL 原始过氧化氢混合液消耗的 0.02 mol/L 高锰酸钾毫升数与 20 min 后 1 g 土壤消耗的 0.02 mol/L 高锰酸钾毫升数的差值表示;蔗糖酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 8%蔗糖为基质,37 ℃ 培养 24 h 后,在紫外分光光度计 508 nm 处比色测定产生的葡萄糖含量,以 24 h 后 1 g 土壤中葡萄糖的微克数表示;淀粉酶采用 3,5-二硝基水杨酸比色法测定,以 1%淀粉为基质,37 ℃ 培

养 24 h 后,在紫外分光光度计 508 nm 处比色测定产生的麦芽糖含量,以 24 h 后 1 g 土壤中麦芽糖的微克数表示;脲酶采用 10%尿素液为基质,37 ℃ 培养 24 h 后,在紫外分光光度计 578 nm 处比色;以 24 h 后 1 g 土壤中 NH₃-N 的微克数表示^[16]。酸性磷酸酶采用改进的 Tabatabai & Brimmer 法测定,以 1 mL/L 对硝基苯磷酸二钠为反应底物,缓冲液为 0.1 mol/L pH 5.2 醋酸缓冲液,30 ℃ 培养 1 h 后,滤液在 410 nm 处比色,以 1 h 1 g 土壤水解的对硝基苯磷酸二钠微摩尔数表示^[17]。除过氧化氢酶外,上述土壤酶活性测定均设置无基质对照和无土壤对照。

1.4 数据处理 试验数据使用 SPSS 17.0 统计软件进行数据分析,采用 Duncan' 法进行差异显著性分析,显著水平设为 0.05。对土壤养分、土壤酶活性和微生物数量进行主成分分析(PCA)。

2 结果与分析

2.1 解钾细菌对不同黏土矿物含量人工培土中土壤微生物数量的影响 随着供试土壤黏土矿物含量逐渐增加,解钾细菌和真菌数量呈波动式增长,分别在接菌处理土壤黏土矿物质量分数 68%、75%时达到最大(表 2)。在土壤黏土矿物质量分数 25%、68%和 75%时,接菌处理比接灭活菌处理的解钾细菌和真菌数量高,且差异显著。在接灭活菌处理土壤黏土矿物质量分数 45%、75%时,真菌数量比其他 4 个黏土矿物含量显著增大。因此,土壤黏土矿物含量、接菌处理两因素以及二者交互作用对真菌数量和解钾细菌数量影响显著。

2.2 解钾细菌对不同黏土矿物含量人工培土中土壤养分的影响 土壤黏土矿物含量、接菌处理 2 因素以及二者交互作用对土壤全氮、速效磷、速效钾和缓效钾含量具有显著影响。土壤全氮和速效磷含量在接菌处理土壤黏土矿物质量分数 18%时最大,之后随土壤黏土矿物质量分数增大而显著下降(图 1)。土壤全氮和速效磷含量在黏土矿物质量分数 18%、68%时,接菌处理比接灭活菌处理显著增加;在黏土矿物质量分数 75%时,接灭活菌处理比接菌处理显著增加;在其他黏土矿物含量水平上接菌和接灭活菌处理无显著差异。土壤速效钾和缓效钾含量随土壤黏土矿物质量分数增加而逐渐增大,在接菌处理土壤黏土矿物质量分数 75%时均达到最大。在土壤黏土矿物质量分数 38%、45%、68%和 75% 4 个水

平上,土壤缓效钾含量接菌处理比接灭活菌处理显著增加,而速效钾含量则显著降低。

表2 不同黏土含量人工培土中解钾细菌数量和真菌数量

Table 2 Potassium solubilizing bacteria quantity and fungus quantity in artificial soils with different mass fraction of clay minerals

处理 Treat- ments	真菌 Fungus quantity// $\times 10^3$ CFU/g						解钾细菌 potassium bacteria quantity// $\times 10^6$ CFU/g					
	18%	25%	38%	45%	68%	75%	18%	25%	38%	45%	68%	75%
K	42.33± 1.76	72.67± 2.67	33.67± 1.33	100.67± 3.18	137.67± 21.11	260.33± 9.24	23.33± 0.17	43.17± 14.00	35.00± 8.08	37.67± 3.3	71.17± 7.94	51.50± 2.75
CK	24.33± 1.86	28.67± 2.40	44.33± 0.67	84.33± 8.57	55.33± 2.67	215.67± 13.72	20.00± 2.31	13.50± 3.33	27.50± 4.48	23.67± 0.93	19.83± 5.92	25.17± 4.06

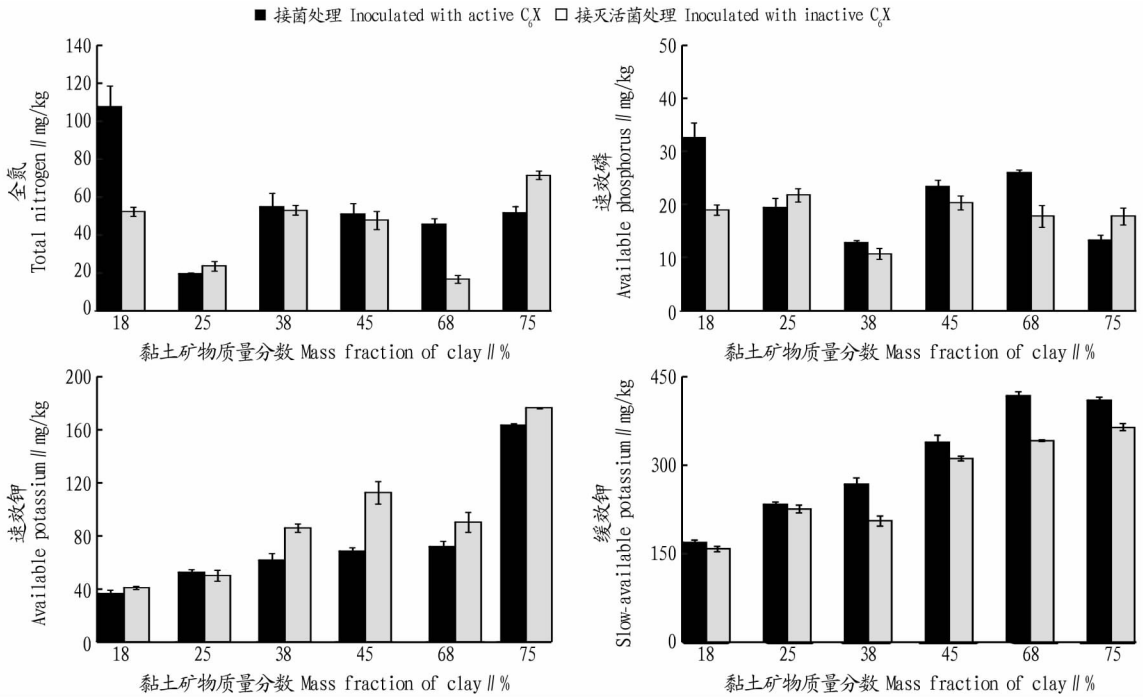


图1 不同接菌处理人工培土中土壤养分含量

Fig.1 Soil nutrients in soils with different contents of clay minerals by 2 kinds of treatments

2.3 解钾细菌对不同黏土矿物含量人工培土中土壤酶活性的影响 土壤黏土矿物含量、接菌处理 2 因素对供试土壤中脲酶、酸性磷酸酶、过氧化氢酶、淀粉酶和蔗糖酶 5 种土壤酶活性具有显著影响,土壤黏土矿物含量和接菌处理的交互作用对除脲酶外的上述 4 种土壤酶活性也具有显著影响(图 2)。无论接菌处理或接灭活菌处理,土壤脲酶和酸性磷酸酶活性在土壤黏土矿物质量分数 18% 时最大,之后随土壤黏土矿物含量增加而逐渐下降,并在土壤黏土矿物质量分数 75% 时达到最低。在土壤黏土矿物质量分数 $\leq 38\%$ 时,土壤脲酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性接菌处理显著高于接灭活菌处理,后两者在土壤黏土矿物质量分数 68% 时呈相同规律。土壤酸性磷酸酶和蔗糖酶活性在 6 个土壤黏土矿物含量水平上均显示接菌处理显著高于接灭活菌处理。土壤蔗糖酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性在接菌处理黏土矿物质量分数 18% 时为第一峰值,之后随着黏土矿物含量增加先下降后上升,土壤蔗糖酶活性在土壤黏土矿物质量分数 38% 和 45% 时达到第二峰值,土壤淀粉酶和过氧化氢酶在黏土矿物质量分数 68% 达到第二峰值,且显著高于第一峰值。

2.4 土壤酶活性和土壤养分、微生物数量等土壤肥力因子的主成分分析 将上述土壤养分、土壤酶和微生物数量等 11 个反映土壤肥力水平的变量进行主成分分析。根据土壤肥力因子的相关关系进行分类提取,得到代表土壤肥力水平的 4 个主成分。4 个主成分特征值 > 0.80 , 11 个变量的共同度接近,均在 83%~94%;方差贡献率依次为 46.245%、23.664%、12.726% 和 78.8%,累计方差贡献率为 89.800% ($> 85.000\%$) (表 3、4)。因此,提取的 4 个主成分可以较完整地反映上述 11 个土壤肥力因子的信息。

载荷值表示各个变量与有关主成分的相关系数。比较 11 个土壤肥力因子在 3 个主成分中的载荷值(表 4),第一主成分是速效磷、速效钾、脲酶、酸性磷酸酶、蔗糖酶和过氧化氢酶 6 个变量的综合反映,方差贡献率接近 50%,是反映土壤肥力的主要指标,即为土壤肥力影响主因子。第二主成分是缓效钾、淀粉酶、真菌数量和解钾细菌数量的综合反映,是土壤微生物活动代谢作用的主因子,也表明缓效钾和淀粉酶活性受土壤微生物条件的影响。第三主成分主要是全氮,另外,速效钾、蔗糖酶和真菌数量也有一定程度的反映,是土壤

全氮的主要影响因子。第四主成分是对速效磷、酸性磷酸酶和解钾细菌数量一定程度上的综合反映,是土壤磷的重要影

响因子,同时在一定程度上影响酸性磷酸酶活性和解钾细菌数量。

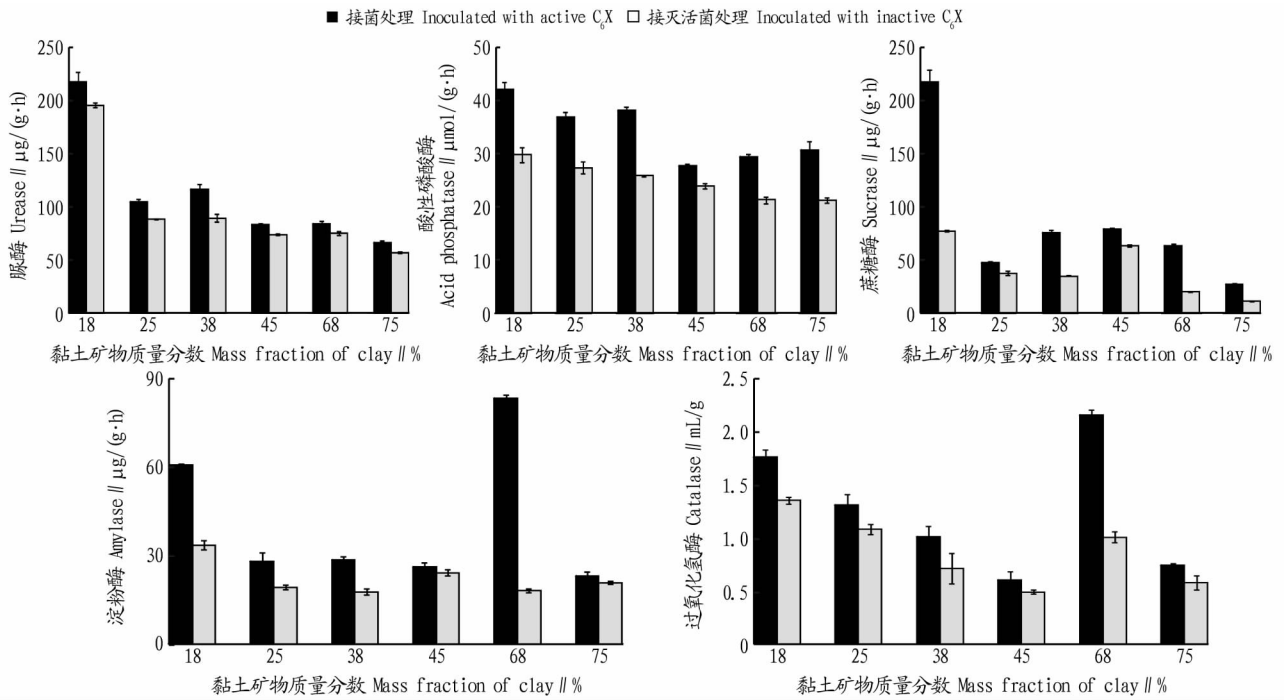


图2 不同接种处理人工培土中5种土壤酶活性

Fig. 2 Five kinds of soil enzyme activities in soils with different contents of clay minerals by two kinds of inoculation treatments

4个主成分 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 、 Y_4 与11个土壤变量构成线性组合,其中,各主成分系数为每个主成分的载荷值除以相关主成分特征值的平方根,即特征向量(表4)。表达式:

$$Y_1 = 0.199X_1 + 0.291X_2 - 0.355X_3 - 0.286X_4 + 0.400X_5 + 0.331X_6 + 0.398X_7 + 0.273X_8 + 0.313X_9 - 0.259X_{10} - 0.028X_{11} \quad (1)$$

$$Y_2 = 0.158X_1 + 0.222X_2 + 0.189X_3 + 0.425X_4 - 0.109X_5 + 0.076X_6 + 0.065X_7 + 0.444X_8 + 0.266X_9 + 0.407X_{10} + 0.503X_{11} \quad (2)$$

$$Y_3 = 0.679X_1 + 0.013X_2 + 0.382X_3 - 0.049X_4 + 0.164X_5 + 0.041X_6 + 0.283X_7 - 0.140X_8 - 0.331X_9 + 0.287X_{10} - 0.264X_{11} \quad (3)$$

$$Y_4 = 0.022X_1 - 0.635X_2 - 0.003X_3 - 0.141X_4 + 0.098X_5 + 0.620X_6 - 0.047X_7 - 0.130X_8 - 0.049X_9 + 0.097X_{10} + 0.389X_{11} \quad (4)$$

式中, X_1 为全氮; X_2 为速效磷; X_3 为速效钾; X_4 为缓效钾; X_5 为脲酶; X_6 为酸性磷酸酶; X_7 为蔗糖酶; X_8 为淀粉酶; X_9 为过氧化氢酶; X_{10} 为真菌数量; X_{11} 为解钾细菌数量。 $X_1 \sim X_{11}$ 均为标准化原始变量。

式(1)中, X_3 、 X_5 、 X_6 、 X_7 和 X_9 变量系数相当,是第一主成分的主要影响变量。第一主成分与 X_3 、 X_4 、 X_{10} 、 X_{11} 呈负相关关系,与其他土壤指标为正相关关系。式(2)中, X_4 、 X_8 、 X_{10} 和 X_{11} 变量系数相当,为主要影响变量。第二主成分仅与脲酶呈负相关关系,与其他土壤因子为正相关关系。式(3)中,第三主成分与缓效钾、过氧化氢酶、解钾细菌数量呈负相关关系,与其他土壤指标为正相关关系,主要影响变量是全

氮。式(4)中,第四主成分与全氮、脲酶、酸性磷酸酶、真菌数量和解钾细菌数量呈正相关关系,其余变量为负相关关系,主要影响变量为速效磷和酸性磷酸酶。

根据4个主成分方差贡献率构造综合评价函数:

$$F = 0.46245Y_1 + 0.23664Y_2 + 0.12726Y_3 + 0.0788Y_4 \quad (5)$$

并对土壤肥力水平进行综合排名(表5)。式(5)中, $Y_1 \sim Y_4$ 为该试验12个处理土壤未标准化原始数据的4个主成分得分, F 为土壤肥力综合得分, $Y_1 \sim Y_4$ 的系数分别为4个主成分的方差贡献率。结果表明,土壤肥力水平前三位是黏土矿物质量分数68%的接种处理、土壤黏土矿物质量分数75%的接种和接灭活菌处理。

表3 人工培土的主成分特征值

Table 3 Principal component eigenvalues of the artificial soils

主成分 Main component	特征值 Eigenvalues	变异系数 Coefficient of variation//%	累积变异系数 Cumulative coefficient of variation//%
第一主成分 1 st Component	5.087	46.245	46.245
第二主成分 2 nd Component	2.603	23.664	69.909
第三主成分 3 rd Component	1.400	12.726	82.634
第四主成分 4 th Component	0.788	7.165	89.800

3 讨论

在自然界,土壤微生物和黏土矿物相互作用,影响土壤矿质养分循环和生物化学过程,在土壤长期演化过程中具有重要意义^[2]。虽然平板计数法结果仅代表土壤微生物总数的1%,但该部分微生物,特别是可培养的细菌和真菌,不但与土壤酶、土壤呼吸活动有关,而且代表了与土壤养分循环

具有密切关系的大部分土壤微生物^[17]。土壤黏土矿物可以为微生物提供生命活动所需的丰富营养元素,其层状结构为

微生物提供活动场所^[18]。因此,真菌数量、解钾细菌数量分别在土壤黏土矿物质量分数为75%、68%时达到最大值。在

表4 人工培土的主成分特征向量

Table 4 Principal component eigenvectors of the artificial soils

因素 Factors	公因子方差 Communality	第一主成分 1 st Component	荷载值 Loading capacity	第二主成分 2 nd Component	荷载值 Loading capacity	第三主成分 3 rd Component	荷载值 Loading capacity	第四主成分 4 th Component	荷载值 Loading capacity
X ₁	0.912	0.199	0.448	0.158	0.255	0.679	0.804	0.022	0.020
X ₂	0.877	0.291	0.656	0.222	0.359	0.013	0.016	-0.635	-0.564
X ₃	0.939	-0.355	-0.801	0.189	0.304	0.382	0.452	-0.003	-0.003
X ₄	0.905	-0.286	-0.644	0.425	0.686	-0.049	-0.057	-0.141	-0.125
X ₅	0.890	0.400	0.902	-0.109	-0.175	0.164	0.194	0.098	0.087
X ₆	0.878	0.331	0.746	0.076	0.123	0.041	0.049	0.620	0.551
X ₇	0.930	0.398	0.897	0.065	0.105	0.283	0.335	-0.047	-0.042
X ₈	0.933	0.273	0.616	0.444	0.717	-0.140	-0.165	-0.130	-0.115
X ₉	0.837	0.313	0.706	0.266	0.428	-0.331	-0.391	-0.049	-0.043
X ₁₀	0.896	-0.259	-0.584	0.407	0.657	0.287	0.340	0.097	0.086
X ₁₁	0.880	-0.028	-0.063	0.503	0.812	-0.264	-0.312	0.389	0.345

注: X₁ 为全氮; X₂ 为速效磷; X₃ 为速效钾; X₄ 为缓效钾; X₅ 为脲酶; X₆ 为酸性磷酸酶; X₇ 为蔗糖酶; X₈ 为淀粉酶; X₉ 为过氧化氢酶; X₁₀ 为真菌数量; X₁₁ 为解钾细菌数量

Note: X₁. Total nitrogen; X₂. Available phosphorus; X₃. Available potassium; X₄. Slowly available potassium; X₅. Urease; X₆. Acid phosphatase; X₇. Sucrase; X₈. Amylase; X₉. Catalase; X₁₀. Fungus quantity; X₁₁. Potassium Solubilizing Bacteria quantity

表5 人工培土土壤肥力综合打分和排序

Table 5 Soil fertility comprehensive evaluation score and ranks in artificial soils

黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay//%	处理 Treatments	分数 Score	排序 Rank
18	K	0.045	6
	CK	-1.315	12
25	K	-1.025	9
	CK	-1.054	10
38	K	-1.055	11
	CK	-0.976	8
45	K	0.401	4
	CK	0.347	5
68	K	1.761	1
	CK	-0.277	7
75	K	1.448	3
	CK	1.698	2

土壤黏土矿物质量分数25%时,虽然黏土矿物含量少,营养条件贫乏,但土壤透气性好,土壤微环境中空气、水分流动畅通,为需氧型微生物提供了富氧环境,解钾细菌和真菌数量显著升高^[19]。试验结果显示,当土壤中伊利石含量相同时,钾长石含量高(15%)的土壤更利于真菌的生长,说明真菌在富钾长石的土壤中易于生长,也证实了钾长石在风化作用中对真菌基因上调、代谢通道活化起重要作用,从而促进真菌数量增加^[20]。另外,接菌处理不但影响土壤中解钾细菌数量,而且影响真菌数量。这是由于细菌和真菌具有复杂的相互作用机制,如细菌产生的挥发物质影响真菌基因表达,细菌附着在真菌孢子和菌丝中,互相促进代谢活动,对土壤农业和生态具有重要意义^[21]。

土壤酶活性是反映土壤肥力水平的重要指标,与土壤微生物共同推动土壤新陈代谢过程,比土壤物理化学指标更能灵敏地反映土壤退化程度和土壤质量的改变^[22]。土壤酶活

性受多种土壤因素的影响,如水分、温度、pH、土壤养分含量、土壤微生物、有机质等^[23]。

脲酶活性在不同耕作条件下变化灵敏,说明土壤通气条件显著影响脲酶活性^[24]。土壤微生物活动只有在通气条件良好的土壤环境中显著促进脲酶活性。因此,在土壤黏土矿物质量分数18%时,土壤通气性良好,脲酶活性最大;随黏土矿物含量增加,土壤通气性降低,土壤中空气和水分循环不畅,抑制脲酶活性。在黏土矿物质量分数 $\leq 38\%$ 时,脲酶活性接菌处理显著高于接灭活菌处理。研究表明,根系分泌物可以为土壤酶提供可利用的有机物质,植物根系生根能力与过氧化物酶活性成正比^[25]。而该研究中解钾细菌的促脲酶活性作用与很多促脲酶活性细菌不同,可能是解钾细菌通过促进植物生长,植物根系向土壤提供酶类物质而实现的^[26]。

磷酸酶包括酸性和碱性磷酸酶,与土壤微生物关系密切。在利于微生物生长的条件下,微生物分泌释放的磷酸酶活性比土壤游离磷酸酶活性大^[27]。该试验结果表明,土壤酸性磷酸酶活性接菌处理显著高于接灭活菌处理,解钾细菌的代谢活动显著促进土壤酸性磷酸酶活性。研究表明,土壤黏粒含量抑制酸性磷酸酶活性,这种抑制作用表现为有机-黏土矿物表面对磷酸酶的吸附作用,黏粒盐基交换量与抑制作用成正比^[28]。因此,该研究中随黏土矿物含量增加,酸性磷酸酶活性呈下降趋势。酸性磷酸酶酶促反应产物为正磷酸盐,参与土壤有机磷的转化,对土壤磷有效性具有重要作用。在土壤基质贫磷时,酸性磷酸酶活性随磷含量增加而增强;土壤基质富磷时,酸性磷酸酶活性受到抑制^[29]。该试验基质为贫磷条件,在黏土矿物质量分数18%时,接菌处理土壤酸性磷酸酶活性最大,产生更多的 HPO_4^{2-} ,土壤速效磷含量也达到最大值。

蔗糖酶和淀粉酶是参与土壤磷循环的重要酶类。在土壤通气良好时,糖类水解酶促反应彻底迅速^[30],因此,在土

壤黏土矿物质量分数 18% 时,土壤通气条件好,蔗糖酶和淀粉酶活性极高。该试验结果表明,在不同黏土矿物含量水平中,解钾细菌显著提高蔗糖酶活性。这也证明蔗糖酶活性是绝大多数微生物所固有的,与土壤微生物数量有直接关系。研究表明,蓝藻细菌和酸杆菌等细菌可以分泌胞外酶,分解土壤有机残余物,促进包括蔗糖酶在内的多种土壤酶活性^[31]。

土壤过氧化氢酶主要作用是破坏对生物体有毒的过氧化氢,提高生物体对环境的抗逆性^[32]。该试验结果表明,土壤过氧化氢酶活性与淀粉酶活性的变化趋势一致。这说明过氧化氢酶活性同样受土壤通气条件、玉米生长水平的影响。在黏土矿物质量分数 $\leq 38\%$ 时,土壤通气良好的条件下,微生物的酶促作用显著,淀粉酶和过氧化氢酶活性接菌处理显著高于接灭活菌处理^[31]。

4 结论

土壤黏土矿物含量增加,促进解钾细菌和真菌数量增加。解钾细菌和真菌数量分别在接菌处理黏土矿物质量分数 68%、75% 时达到最大值。

解钾细菌和黏土矿物协同作用对不同土壤养分和土壤酶活性的影响作用不同。在黏土矿物质量分数 $> 38\%$ 时,解钾细菌显著提高土壤缓效钾含量。在黏土矿物质量分数 $\leq 38\%$ 时,解钾细菌显著提高脲酶、淀粉酶和过氧化氢酶活性。解钾细菌在不同黏土矿物含量水平上显著提高酸性磷酸酶和蔗糖酶活性。土壤综合肥力水平最佳的土壤处理为黏土矿物质量分数 68% 接菌处理。

总之,解钾细菌对不同黏土矿物含量土壤肥力改良作用显著不同。因此,进一步探究土壤微生物和黏土矿物的协同生态效应,对合理利用微生物复垦技术改良矿区古河道覆盖区退化土壤具有指导意义。

参考文献

- [1] 尚海丽,毕银丽,彭苏萍,等.解钾细菌对西北干旱地区不同硅酸盐矿物的解钾效应研究[J].矿物学报,2015,35(3)337-343.
- [2] MUELLER B. Experimental interactions between clay minerals and bacteria: A review[J]. Pedosphere, 2015, 25(6): 799-810.
- [3] SIMONSSON M, ANDERSSON S, ANDRIST-RANGEL Y, et al. Potassium release and fixation as a function of fertilizer application rate and soil parent material[J]. Geoderma, 2007, 140(1): 188-198.
- [4] STEINBACH A, SCHULZ S, GIEBLER J, et al. Clay minerals and metal oxides strongly influence the structure of alkane-degrading microbial communities during soil maturation[J]. The ISME Journal, 2015, 9: 1687-1691.
- [5] ZHANG Y L, CHEN L J, CHEN X H, et al. Response of soil enzyme activity to long-term restoration of desertified land[J]. Catena, 2015, 133: 64-70.
- [6] 赵艳, 张晓波. 施用胶质芽胞杆菌菌剂对黑麦草根际土壤脲酶、磷酸酶及过氧化氢酶活性的影响[J]. 微生物学杂志, 2010, 31(6): 49-52.
- [7] LING N, SUN Y M, MA J H, et al. Response of the bacterial diversity and soil enzyme activity in particle-size fractions of Mollisol after different fertilization in a long-term experiment[J]. Biology & fertility of soils, 2014, 50(6): 901-911.
- [8] CHEN X F, LI Z P, LIU M, et al. Microbial community and functional diversity associated with different aggregate fractions of a paddy soil fertilized with organic manure and/or NPK fertilizer for 20 years[J]. Journal of soils and sediments, 2015, 15(2): 292-301.
- [9] NIEWIADOMSKA A, BARŁÓG P, BOROWIAK K, et al. The effect of sulphur and potassium fertilization on the nitrogenase and microbial activity in soil under broad bean (*Vicia faba* L.) cultivation[J]. Fresenius environmental bulletin, 2015, 24: 723-732.
- [10] HAMIDO S A, KPOMBLEKOU-A K. Cover crop and tillage effects on soil enzyme activities following tomato[J]. Soil and tillage research, 2009, 105(2): 269-274.
- [11] HU R, WANG X P, ZHANG Y F, et al. Insight into the influence of sand-stabilizing shrubs on soil enzyme activity in a temperate desert[J]. Catena, 2016, 137: 526-535.
- [12] DING N, GUO H C, KUPPER J V, et al. Shoot specific fungal endophytes alter soil phosphorus (P) fractions and potential acid phosphatase activity but do not increase P uptake in tall fescue[J]. Palnt soil, 2016, 401(1/2): 291-305.
- [13] 胡俊波, 毕银丽, 张海. 不同释钾菌对粉煤灰的生态效应[J]. 环境工程学报, 2009, 3(6): 1109-1112.
- [14] OLSEN R A, BAKKEN L R. Viability of soil bacteria: Optimization of plate-counting technique and comparison between total counts and plate counts within different size groups[J]. Microbial ecology, 1987, 13(1): 59-74.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 50-55, 82-93.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 275-276, 278-280, 294-297, 323.
- [17] TABATABAI M A. Soil enzymes [M]//WEAVER R W, ANGLE J S, BOTTOMLEY P S. Methods of soil analysis. Part 2: Microbiological and biochemical properties. Madison, WI: SSSA, 1994: 775-833.
- [18] MEENA V S, MAURYA B R, VERMA J P. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils? [J]. Microbiological research, 2014, 169(5/6): 337-347.
- [19] DONG H L. Clay-microbe interactions and implications for environmental mitigation[J]. Elements, 2012, 8(2): 113-118.
- [20] WANG W Y, LIAN B, PAN L. An RNA-sequencing study of the genes and metabolic pathways involved in *Aspergillus niger* weathering of potassium feldspar[J]. Geomicrobiology journal, 2015, 32(8): 689-700.
- [21] MIRANSARI M. Interactions between arbuscular mycorrhizal fungi and soil bacteria[J]. Applied microbiology & biotechnology, 2011, 89(4): 917-930.
- [22] PAZ-FERREIRO J, FU S L. Biological indices for soil quality evaluation: Perspectives and limitations [J]. Land degradation and development, 2016, 27(1): 14-25.
- [23] BURNS R G, DEFOREST J L, MARXSEN J, et al. Soil enzymes in a changing environment: Current knowledge and future directions [J]. Soil biology and biochemistry, 2013, 58: 216-234.
- [24] QIN S P, HU C S, WANG Y Y, et al. Tillage effects on intracellular and extracellular soil urease activities determined by an improved chloroform fumigation method[J]. Soil science, 2010, 175(11): 568-572.
- [25] KOSE K, ERDAL S, KAYA O, et al. Comparative evaluation of oxidative enzyme activities during adventitious rooting in the cuttings of grapevine rootstocks[J]. Journal of the science of food and agriculture, 2011, 91(4): 738-741.
- [26] WEN F, ZHANG Z X, HE Y Q, et al. Synergism between urea and urease-positive bacteria in controlling root-knot nematodes[J]. European journal of plant pathology, 2015, 141(1): 179-191.
- [27] VAN AARLE I M, PLASSARD C. Spatial distribution of phosphatase activity associated with ectomycorrhizal plants is related to soil type[J]. Soil biology and biochemistry, 2010, 42(2): 324-330.
- [28] KEDI B, ABADIE J, SEI J, et al. Diversity of adsorption affinity and catalytic activity of fungal phosphatases adsorbed on some tropical soils[J]. Soil biology and biochemistry, 2013, 56: 13-20.
- [29] HOFMANN K, HEUCK C, SPOHN M. Phosphorus resorption by young beech trees and soil phosphatase activity as dependent on phosphorus availability[J]. Oecologia, 2016, 181(2): 369-379.
- [30] TRASAR-CEPEDA C, LEIRÓS M C, GIL-SOTRES F. Hydrolytic enzyme activities in agricultural and forest soils: Some implications for their use as indicators of soil quality[J]. Soil biology and biochemistry, 2008, 40(9): 2146-2155.
- [31] ZHANG W, ZHANG G S, LIU G X, et al. Bacterial diversity and distribution in the southeast edge of the tengger desert and their correlation with soil enzyme activities [J]. Journal of environmental sciences, 2012, 24(11): 2004-2011.
- [32] BUCKOVA M, GODOCIKOVA J, ZAMOCKY M, et al. Screening of bacterial isolates from polluted soils exhibiting catalase and peroxidase activity and diversity of their responses to oxidative stress[J]. Current microbiology, 2010, 61(4): 241-247.