

解钾细菌与黏土矿物协同促进玉米生长提高土壤养分有效性

尚海丽^{1,2}, 毕银丽^{1*}, 彭苏萍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, 包头 014010)

摘要: 为了揭示解钾细菌在西北矿区浅埋古河道土壤中对植物生长和土壤养分利用的影响, 通过日光温室短期盆栽的方式, 以不同黏土矿物配比的人工培土为基质模拟古河道不同质地土壤, 以西北地区常见农作物玉米为宿主, 研究解钾细菌在人工培土基质中的微生物数量变化规律, 以及二者协同作用对玉米生长和矿质养分吸收的影响。结果表明: 1) 土壤黏土矿物含量增大有利于提高土壤解钾细菌数量, 促进微生物活性。当黏土矿物质量分数为 68%, 速效钾质量分数约 170 mg/kg 时, 解钾细菌数量最大; 2) 玉米地上部分干质量、根冠比、根系活力随黏土矿物含量增大而增大, 以解钾细菌作用下黏土矿物质量分数 68% 的玉米生长效果最佳; 3) 在解钾细菌作用下, 植物氮磷钾积累量和土壤养分利用的最佳土壤黏土矿物质量分数为 45%、68% 和 75%, 土壤钾素、氮素和磷素最大利用率分别达到 65%、53% 和 17%; 4) 解钾细菌在土壤钾素含量低时促进土壤磷素吸收, 土壤钾素过量时, 促进土壤氮磷钾的吸收, 提高土壤养分利用率。因此, 土壤黏土矿物与解钾细菌相互作用, 而且积极影响植物生长和土壤养分的吸收利用, 这对进一步探寻适合矿区浅埋古河道土壤的微生物复垦技术, 深入改良和开发矿区退化土壤具有重要意义。

关键词: 黏土矿物; 细菌; 养分; 协同作用; 玉米生长; 土壤

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.019

中图分类号: S153.6⁺1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2016)-12-0129-07

尚海丽, 毕银丽, 彭苏萍, 解文武. 解钾细菌与黏土矿物协同促进玉米生长提高土壤养分有效性[J]. 农业工程学报, 2016, 32(12): 129—135. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.019 <http://www.tcsae.org>

Shang Haili, Bi Yinli, Peng Suping, Xie Wenwu. Synergistic effect of releasing potassium bacteria and clay minerals improving maize growth and soil nutrients availability[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2016, 32(12): 129—135. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2016.12.019 <http://www.tcsae.org>

0 引言

晋陕蒙交界地风积沙覆盖区气候干旱少雨, 土壤贫瘠, 长期煤炭开采破坏土壤水分和养分运移, 造成矿区土壤急剧退化^[1]。根据矿区第四系覆盖物的地质调查, 该矿区风积沙覆盖大量第四系古河道, 由于古河道砂体赋存丰富的地下水资源, 因此成为该地区宝贵的浅层生态水资源^[2]。古河道土壤中黏土矿物含量和种类、粒度组成变化多样, 不但影响土壤水分运移, 而且深刻影响土壤微生物群落组成和数量变化, 对土壤物理化学性质和土壤演化具有深远影响^[3]。因此, 深入研究土壤黏土矿物含量与土壤微生物的作用关系及二者协同作用下的生态效应, 对浅埋古河道区的土壤开发利用和生态恢复具有重要意义。

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。钾素是植物营养的大量元素, 植物对土壤钾素的吸收利用受多种因素制约。研究表明, 黏土矿物含量对土壤钾素固定和释放起重要作用, 在长期施用钾肥过程中, 黏土矿物中钾素释放和固定能力会产生变化^[4]。植物钾素的吸收量提高, 不仅促进植物生长发育, 而且提高植物抗旱能力^[5-6]。解钾细菌是硅酸盐细菌中的一类功能性细菌, 研究结果表明, 解钾细菌对伊利石和钾长石均具有显著解钾效果, 并且释钾过程与土壤含水量和黏土矿物含量有关^[7-8]。同时, 黏土矿物含量和种类影响土壤微生物的活性和群落结构, 李仁义^[9]将高岭石、蒙脱石和针铁矿 3 种矿物按不同比例分别添加到红壤和棕壤土中, 并进行温室培养, 结果表明矿物处理使土壤微生物数量、功能多样性等发生了显著变化。解钾细菌作为一种微生物肥料, 对植物生长起促进作用, 不仅提高植物钾素的累积量, 还对氮、磷积累量有显著提高^[10]。因此, 如何利用解钾细菌有效提高矿区浅埋古河道土壤的潜在肥力, 探寻适合浅埋古河道土壤变化规律的微生物复垦方案, 是有效改良利用矿区退化土壤的重要内容之一。

本研究针对解钾细菌在矿区不同黏土矿物含量的古河道土壤中对植物生长和土壤养分利用的影响作用进行探讨。通过日光温室短期盆栽的方式, 以西北地区常见

收稿日期: 2015-12-14 修订日期: 2016-04-10

基金项目: 国家自然科学基金(51574253); 国家 863 计划项目(2013AA102904); 内蒙古科技大学创新基金项目(2015XYPYL04)。

作者简介: 尚海丽, 女, 陕西延安人, 讲师, 博士生, 从事矿区生态修复方面的研究。北京 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 100083。Email: 150678516@qq.com

*通信作者: 毕银丽, 女, 陕西西脂人, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事微生物复垦技术的研究。北京 中国矿业大学煤炭资源与安全开采国家重点实验室, 100083。Email: ylb88@126.com

农作物玉米为宿主,以黏土矿物不同配比的人工培土为基质,研究解钾细菌在人工培土基质中的微生物数量变化规律,以及二者协同作用对玉米生长和矿质养分的影响效果,特别是钾素的积累效果,同时研究解钾细菌对土壤养分表观利用率的调节作用,初步揭示浅埋古河道土壤与解钾细菌的协同生态效应,为深入发掘西北矿区土壤钾肥潜力,进一步探索解钾细菌在矿区浅埋古河道土壤的广泛应用提供理论依据。

1 材料和方法

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砂以不同比例混合组成(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,纯净河砂选自北京郊区,粒径 <2 mm。

表 1 供试土壤黏土矿物组成和理化性质
Table 1 Clay mineral compositions and physicochemical characteristics of test soils

编号 Label	黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay minerals/%			石英质量分数 Mass fraction of quartz/%	pH 值 pH value	速效钾 Exchangeable potassium/ (mg·kg ⁻¹)
	伊利石 Illite	钾长石 Microcline	合计 Total			
1	10	8	18	82	9.04	67.51
2	10	15	25	75	9.09	94.71
3	30	8	38	62	9.04	106.80
4	30	15	45	55	9.12	137.60
5	60	8	68	32	9.29	172.10
6	60	15	75	25	9.35	200.70

供试微生物为解钾细菌 C₆X,由中国矿业大学(北京)微生物复垦实验室自行筛选^[11],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 C₆X。

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。

1.2 试验方法

本试验于 2014 年 6 月在中国矿业大学(北京)日光温室进行。设置 6 种黏土矿物配比的供试土壤(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,记为 T 和 CK,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(直径)cm×50(柱高)cm,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 1 周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 浓度分别达到 120、30 mg/kg。

1.3 测试项目和方法

1.3.1 解钾细菌数量测定

培养期 90 d 结束后,采集根际土壤测定解钾细菌数量。采用微生物稀释平板计数法^[12],选择硅酸盐细菌培养基,以发育透明解钾圈的菌落计数。培养基配方:琼脂 15.0 g,蔗糖 5.0 g, Na₂HPO₄ 2.0 g, MgSO₄·7H₂O 0.5 g, FeCl₃ 0.005 g, CaCO₃ 0.1 g, 钾长石粉 1.0 g, 蒸馏水 1 000 mL, pH 值 7.0~7.2。

1.3.2 植物生长指标测定

培养期 90 d 结束后,分别采集不同处理的地上部分和地下部分,105 ℃烘箱杀青 30 min 后,放置 70 ℃烘箱直至烘干,分别称量记录不同处理的地上部分和地下部分干质量,并计算根冠比,即地下地上部干质量比。根系活力采用 α-萘胺法测定,以 1 h 1 g 鲜根氧化的 α-萘胺质量表示根系的氧化活力^[13]。

1.3.3 植物 N、P、K 含量测定

将上述植物地上和地下烘干样品混合、粉碎,并研磨至粒径 <0.25 mm,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮法^[14],消煮液分别使用 SPD50 半自动凯氏定氮仪(北京三品科创仪器有限公司)半微量蒸馏法定氮;Varian Vista-PRO 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES)测定磷和钾含量。

1.3.4 土壤速效钾、速效磷和碱解氮的测定

采集培养前的 6 种人工培土进行测试。土壤速效钾采用 NH₄OAc 浸提法^[14],测试仪器为 Varian Vista-PRO 型电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-AES);土壤速效磷采用 0.5 mol/L NaHCO₃ 浸提和钼锑抗显色法^[14],测试仪器为 Rigol Ultra-3660 紫外分光光度计;土壤水溶性氮(碱解氮)采用碱解扩散法测定^[14]。

1.4 数据分析

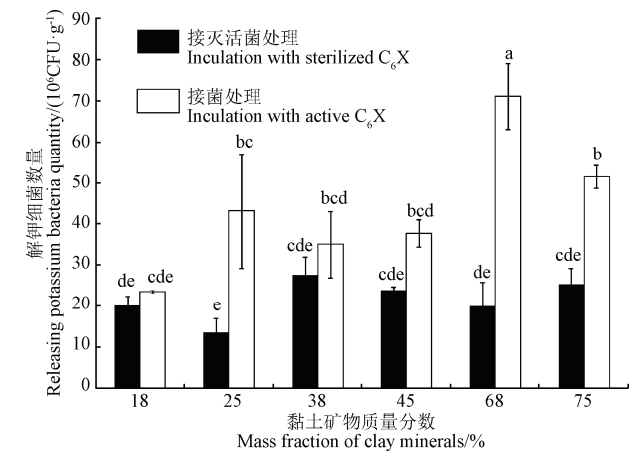
试验数据使用 SPSS 17.0 统计软件进行数据分析,采用 Duncan 法进行差异显著性分析,显著水平设为 0.05。土壤养分利用率采用表观利用率^[15]。土壤 K 素利用率为植物 K 素积累量占土壤初始速效 K 含量+菌液中钾含量的比例,%;土壤 P(N)素利用率为植物 P(N)素积累量占土壤初始速效 P(N)含量+P(N)肥含量的比例,%。其中,菌液中磷、氮含量忽略不计。

2 结果和分析

2.1 土壤黏土矿物含量对解钾细菌数量的影响

图 1 表明土壤黏土矿物含量影响解钾细菌数量。接灭活菌处理解钾细菌数量低,且不随黏土矿物含量变化而发生显著差异,表明不同试验基质初始微生物数量无显著差异。接菌处理的解钾细菌数量在黏土矿物质量分数 68%水平达到最大值(P<0.05)。在土壤黏土矿物质量分数为 25%、68%和 75%时,接菌处理解钾细菌数量显著高于接灭活菌处理(P<0.05)。这可能因为黏土矿物所含丰富矿质元素为微生物活动提供充足养分,其层状结构为微生物的生命活动提供了有利场所,因此解钾细菌

在富含黏土矿物的土壤中易于生存繁殖^[16]。而土壤黏土矿物质量分数为 75%时，解钾细菌数量出现降低趋势，可能是土壤黏土矿物含量过高，导致土壤孔隙度和通气性降低，土壤微环境缺氧，抑制了微生物的活动^[17]。因此，解钾细菌生命活动的最佳土壤黏土矿物质量分数为 68%。



注：图中不同小写字母代表差异显著 ($P<0.05$)。
Note: Different lowercase letters indicate significant difference ($P<0.05$).
图 1 不同黏土矿物含量土壤中解钾细菌数量
Fig.1 Releasing potassium bacteria Quantity in soil with different contents of clay minerals

2.2 解钾细菌与黏土矿物协同效应对玉米生长的影响

黏土矿物含量主要通过影响土壤通气性和土壤矿质元素的丰富程度影响植物生长。土壤黏土矿物含量低，通气性好，但缺乏矿质元素，不利于植物生长；土壤黏土矿物含量高，矿质元素丰富，可以为植物生长提供丰富养分，但通气性较差，限制植物生长^[18-19]。表 2 所示，接菌处理的地上部分干质量在土壤黏土矿物质量分数 45%、68%时呈最大值，根冠比在土壤黏土矿物质量分数 38%~75%均呈高值，根系活力在土壤黏土矿物质量分数 25%、38%、68%时均呈最大值。综合 3 个指标，以土壤黏土矿物质量分数 68%的接菌处理植物生长最佳。地上部分干质量除了黏土矿物质量分数 25%之外，其他黏土矿物含量水平接菌处理均显著高于接灭活菌处理 ($P<0.05$)。黏土矿物质量分数 18%、45%和 75%时，接菌处理根冠比显著高于接灭活菌处理 ($P<0.05$)。在黏土矿物质量分数 38%、68%和 75%，接菌处理比接灭活菌处理具有更强的根系活力 ($P<0.05$)。以上结果说明，当土壤黏土矿物含量低时，缺乏矿质养分，植物地上干质量较小，但是土壤通气性良好，根系发育，根系活力较高。随着黏土矿物含量增高，土壤矿质养分增加，特别是速效钾浓度增高时，植物地上干质量增加，但是土壤粘性增大，根系活力下降。当土壤黏土矿物质量分数超过 68%，土壤钾素浓度超过 170 mg/kg，则抑制植物生长。

表 2 解钾细菌与黏土矿物协同效应对玉米生长指标的影响
Table 2 Synergistic effect of releasing potassium bacteria and clay minerals on maize growth

黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay minerals/%	地上部分干质量 Dry weight of shoot/(g·株 ⁻¹)		根冠比 Root shoot ratio/%		根系活力 Root activity/(μg·g ⁻¹ ·h ⁻¹)	
	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X
18	13.06b	7.08f	12.80e	7.36f	70.15b	96.87b
25	12.11bc	11.08cd	12.81e	20.41cd	198.90a	168.20a
38	11.88bc	10.52d	26.97ab	26.41ab	191.39a	58.58bc
45	15.47a	8.37e	31.35a	22.78bc	95.72b	63.03bc
68	14.39a	11.56cd	28.15ab	24.95bc	176.87a	93.06b
75	10.45d	2.78g	27.35ab	16.02de	111.11b	13.21c

注：表中数值为 3 个重复的平均值，其后不同字母代表 5%水平上的差异显著，下同。
Notes: Values were means of three replicates, and mean followed by different letters indicates significant difference at 5% level, same below.

2.3 解钾细菌与黏土矿物协同效应对玉米矿质养分的调节

在不同黏土矿物含量的土壤中，解钾细菌对植物吸收矿质养分的影响不同，且不同矿质养分的变化规律也有差异。在表 3 中，接灭活菌处理的植物氮、磷、钾积累量随黏土矿物含量增加而增大，钾素积累量在黏土矿物质量分数 68%为最大值，之后呈下降趋势。说明土壤过量钾素抑制玉米的钾素吸收。氮素、磷素积累量不仅在黏土矿物质量分数 68%呈峰值，还在 38%水平呈峰值，说明植物氮、磷元素的吸收不仅受植物钾素吸收量的影响，还和土壤黏土矿物对磷、氮的吸附作用有关^[20]。当土壤黏土矿物质量分数为 75%时，土壤钾素过量，不仅抑制玉米对钾的吸收，而且也抑制玉米对氮、磷的吸收。

表 3 接菌处理结果显示，随着黏土矿物含量增加，植物钾素积累量逐渐增大，在黏土矿物质量分数 45%时达到最大值，之后呈降低趋势，而植物氮、磷素积累量在黏土矿物质量分数 45%、68%和 75%时均显示最大值。综上，在解钾细菌作用下，植物氮素和磷素的吸收受钾素吸收量的影响显著，植物氮磷钾吸收的最佳黏土矿物质量分数为 45%、68%和 75%。对比接菌处理和接灭活菌处理结果可知，解钾细菌在贫钾（土壤黏土矿物质量分数 18%）条件下促进植物吸收土壤磷素，富钾（土壤黏土矿物质量分数 75%）条件下降低过量钾素对氮、磷的拮抗作用，缓解过量钾素对植物钾素吸收的抑制作用，有效提高植物养分吸收能力。

表 3 解钾细菌与黏土矿物协同效应对玉米矿质养分的调节

Table 3 Synergistic effect of releasing potassium bacteria and clay minerals on maize's absorption of mineral nutrition

黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay minerals/%	植物钾素积累量 Plant K accumulation/(mg·株 ⁻¹)		植物氮素积累量 Plant N accumulation/(mg·株 ⁻¹)		植物磷素积累量 Plant P accumulation/(mg·株 ⁻¹)	
	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X
18	128.63e	95.68e	209.38cde	127.55ef	15.44e	5.98g
25	184.84cd	176.08d	187.77cde	197.86cde	11.91f	9.51f
38	210.98cd	228.49c	216.00bcde	325.84a	17.14de	18.98cd
45	452.42a	224.21cd	317.22ab	164.90def	21.39bc	11.81f
68	371.37b	351.84b	256.30abcd	281.18abc	22.83ab	16.26de
75	370.15b	116.50e	238.20abcd	81.39f	25.59a	9.56f

表 4 解钾细菌与黏土矿物协同作用下的土壤养分利用率

Table 4 Synergistic effect of releasing potassium bacteria and clay minerals on soil nutrients availability

黏土矿物质量分数 Mass fraction of clay minerals/%	土壤钾素表观利用率 Apparent utilization ratio of K in soil/%		土壤氮素表观利用率 Apparent utilization ratio of N in soil/%		土壤磷素表观利用率 Apparent utilization ratio of P in soil/%	
	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X	接菌 Inoculation with active C ₆ X	接灭活菌 Inoculation with sterilized C ₆ X
18	37.08bc	27.58d	34.90cde	21.26ef	10.30e	3.98g
25	38.20bc	36.39bc	31.30cde	32.98cde	7.94f	6.34f
38	38.69bc	41.90b	36.00bcde	54.31a	11.42de	12.65cd
45	64.74a	32.09cd	52.87ab	27.48def	14.26bc	7.87f
68	42.48b	40.25b	42.72abcd	46.86abc	15.22ab	10.84de
75	36.35bc	11.44e	39.70abcd	13.57f	17.06a	6.37f

2.4 解钾细菌与黏土矿物协同效应对土壤氮磷钾养分利用率的提高作用

土壤养分利用率反映植物吸收矿质养分的能力和土壤养分含量之间的平衡关系。表 4 中, 接灭活菌处理的土壤 N、P 利用率随着黏土矿物含量(质量分数 18%~38%)增加而增加, 在黏土矿物质量分数 38%时达到最大值, 受 K 吸收量的影响, 在 68%水平也出现峰值。而土壤 K 利用率无显著变化规律。当黏土矿物质量分数 75%时, 钾素过量, 抑制植物钾素吸收, 也抑制土壤氮、磷素的吸收, 因而土壤氮磷钾素利用率显著降低。接菌处理结果显示, 土壤 K 利用率随着黏土矿物含量增加而增大, 在黏土矿物质量分数 45%时达到最大值, 之后呈下降趋势。土壤 N 利用率在黏土矿物质量分数 45%时达到最大值, 但随着黏土矿物含量的继续增加无显著降低。土壤 P 利用率在黏土矿物质量分数 68%时达到最大值, 随着黏土矿物含量的继续增加也无显著降低。综上所述, 解钾细菌作用下土壤养分利用的最佳黏土矿物质量分数为 45%、68%和 75%, 土壤 K、N 和 P 最大利用率分别达到 65%、53%和 17%。接菌处理土壤 K、P 利用率在黏土矿物质量分数 18%、45%和 75%处均比接灭活菌处理增大, 且差异显著 ($P<0.05$); 而土壤 N 利用率在黏土矿物质量分数 38%、45%和 75%处接菌比接灭活菌处理增大, 差异显著 ($P<0.05$)。这再次印证了解钾细菌可以减弱土壤通气性差对土壤钾素利用率的抑制作用, 且显著改善过量钾素对土壤养分利用的抑制作用^[21]。

另外, 植物对土壤 P、N 的利用率与土壤钾素的变化有关, 而与土壤中磷肥和氮肥含量无明显关系, 说明植物对土壤氮磷元素的吸收能力受植物钾素积累量以及土壤钾素含量的影响显著^[16]。

3 讨论

解钾细菌对土壤 K 的释放主要通过与土壤黏土矿物相互作用, 使矿物 K 成为植物可利用的形式, 而土壤黏土矿物又为解钾细菌生命代谢活动提供养分和空间, 二者作用机制复杂^[22]。本文主要从解钾细菌数量和土壤黏土矿物含量的变化趋势上探究二者的关系。研究表明, 解钾细菌数量随土壤中不同黏土矿物含量的增加而变化, 当黏土矿物在土壤中的质量分数为 68%, 速效 K 浓度 170 mg/kg 时, 解钾细菌数量最大。解钾细菌在砂土和富黏土矿物土壤中的不同生命活力与黏土矿物本身的矿物性质密切相关, 黏土矿物所含丰富矿质元素为微生物活动提供充足养分, 其层状结构为微生物的生命活动提供了有利场^[11]。由此表明, 在古河道分布区, 由于土壤黏土矿物含量的变化, 解钾细菌的数量产生差异, 继而对植被生长、矿质养分的吸收利用产生不同程度的影响。因此, 合理利用古河道不同空间范围的土壤黏土矿物, 是有效发挥解钾细菌释 K 作用的重要方面。

在干旱贫瘠的土壤中, 玉米生长过程对水分胁迫和 K 素亏缺反映敏感, 而且玉米是西北地区广泛种植的农作物, 因此选择玉米作为宿主具有现实意义。研究结果表明, 解钾细菌和黏土矿物的协同作用对玉米生长影响显著, 玉米地上部分干质量、根冠比、根系活力随黏土矿物含量变化而变化, 解钾细菌对这 3 种生长指标的促进作用明显, 以黏土矿物质量分数 68%的玉米生长最佳。这一结果与解钾细菌数量的峰值出现在相同黏土矿物含量水平的土壤中相吻合, 说明玉米生长与解钾细菌的数量具有相关性。玉米生长受土壤通气性和土壤矿质元素的丰富程度 2 个方面的影响, 土壤微生物的活动不仅可

以促进植物对土壤有效养分的吸收, 而且有助于改善黏土矿物土壤的通气性。植物根系发育程度与植物抗旱能力有关, 根冠比值大、根系活力强的玉米抗旱能力更大^[23]。解钾细菌作用提高了玉米的根系活力和根冠比, 表明玉米的抗旱能力有所改善。

植物对氮磷钾元素的吸收积累量反映了植物的生长发育和品质产量。试验结果表明解钾细菌和黏土矿物协同作用对植物氮磷钾的吸收积累量影响显著, 以黏土矿物质量分数 45%、68%和 75%水平的植物氮磷钾素积累量最大。接灭活菌处理的试验结果说明土壤钾素浓度有阈值限制 (170 mg/kg), 超过此阈值, 不但对植物生长无促进作用, 反而产生抑制作用, 阻碍植物生长和氮磷钾素的吸收。

接灭活菌处理试验结果显示土壤 N、P 利用率随土壤 K 含量增加而增大, 当黏土矿物质量分数超过 68%, 速效钾浓度超过 170 mg/kg, 土壤 N、P 利用率呈下降趋势。这是因为钾素在土壤中的含量随水分、微生物活动等呈动态变化, 在 K^+ 的释放迁移过程中, 土壤中 NH_4^+ 、 $H_2PO_4^-$ 作为陪伴离子, 受 K^+ 释放和固定作用影响显著。 NH_4^+ 作为阳离子, 可以代替 K^+ , 占位黏土矿物层间电荷, $H_2PO_4^-$ 作为阴离子, 与 K^+ 无拮抗关系, 但易被黏土矿物表面吸附, 当黏土矿物含量增大, 不利于 $H_2PO_4^-$ 的释放^[16,24]。

解钾细菌对黏土矿物解钾效果显著, 影响土壤 K 的转化和植物钾素的吸收利用。而土壤 K 的吸收利用效果, 一定程度影响土壤 N 和 P 的吸收利用率, 使土壤氮磷本身含量对植物的生长所起的作用减弱^[25]。因此, 深入探索解钾细菌和黏土矿物协同对土壤 K 的释放和固定作用, 掌握植物对土壤氮磷钾素的吸收利用规律, 对进一步研究有效的微生物复垦技术, 广泛开发利用矿区退化土壤具有重要意义。

4 结 论

1) 解钾细菌数量随土壤黏土矿物含量增加, 在土壤黏土矿物质量分数 68%时达到峰值, 超过该水平, 则抑制解钾细菌生命活动, 解钾细菌数量降低。

2) 解钾细菌和黏土矿物协同作用显著促进玉米生长和养分吸收利用。在解钾细菌作用下, 黏土矿物质量分数为 68%时玉米地上部分干质量、根冠比和根系活力水平高, 玉米生长最佳; 而植物氮磷钾积累量和土壤养分利用的最佳黏土矿物质量分数为 45%、68%和 75%, 土壤 K、N 和 P 最大利用率分别达到 65%、53%和 17%。

3) 解钾细菌在土壤 K 亏缺 (土壤黏土矿物质量分数 18%) 时显著促进植物对磷的吸收, 土壤 K 过量 (土壤黏土矿物质量分数 75%) 时, 减缓土壤 K 对 N、P 的拮抗作用, 增强玉米抗逆性, 提高土壤氮磷钾的养分吸收和利用率。土壤 N、P 的吸收利用与土壤 K 含量密切相关, 与土壤 N、P 的初始含量无显著关系。

4) 解钾细菌和黏土矿物协同作用不仅显著提高玉米的生长和矿质养分, 而且影响土壤氮磷钾元素的吸收利用效率。因此, 解钾细菌在矿区退化土壤中的应用须充分考虑古河道土壤中黏土矿物含量的空间变化规律, 合

理利用土壤黏土矿物和解钾细菌的协同作用, 这对进一步建立因地制宜的微生物复垦技术, 深入改良利用矿区退化土壤具有重要意义。

[参 考 文 献]

- [1] 程东会, 王文科, 侯光才, 等. 毛乌素沙地植被与地下水关系[J]. 吉林大学学报: 地球科学版, 2012, 42(1): 184—189.
Cheng Donghui, Wang Wenke, Hou Guangcai, et al. Relationship between vegetation and groundwater in Mu Us desert[J]. Journal of Jilin University: Earth Science Edition, 2012, 42(1): 184—189. (in Chinese with English abstract)
- [2] 王长友, 郑忠友, 华召文, 等. 萨拉乌苏组含水层对杭来湾井田煤层开采影响性分析[J]. 煤炭工程, 2014, 46(12): 13—16.
Wang Changyou, Zheng Zhongyou, Hua Zhaowen, et al. Analysis on aquifer in Sala Wusu Group affected to seam mining in Hanglaiwan minefield[J]. Coal Engineering, 2014, 46(12): 13—16. (in Chinese with English abstract)
- [3] Zhou Xiaohong, Li Yimin, Zhang Jinping, et al. Diversity, abundance and community structure of ammonia-oxidizing archaea and bacteria in riparian sediment of Zhenjiang ancient canal[J]. Ecological Engineering, 2016, 90: 447—458.
- [4] 李娜, 韩晓曰, 杨劲峰, 等. 长期施肥对棕壤矿物吸附点位钾有效性及其剖面分布的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1412—1217.
Li Na, Han Xiaoyue, Yang Jinfeng, et al. Effects of long-term fertilization on the availability of K adsorbed by clay minerals and profile distribution in brown soil[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1412—1217. (in Chinese with English abstract)
- [5] Patricia Battie Laclau, Juan Sinforiano Delgado Rojas, Mathias Christin, et al. Potassium fertilization increases water-use efficiency for stem biomass production without affecting intrinsic water-use efficiency in Eucalyptus grandis plantations[J]. Forest Ecology and Management, 2016, 364: 77—89.
- [6] 侯迷红, 范富, 宋桂云, 等. 钾肥用量对甜荞麦产量和钾素利用效率的影响[J]. 物营养与肥料学报, 2013, 19(2): 340—346.
Hou Mihong, Fan Fu, Song Guiyun, et al. Effect of K application rate on yield and K use efficiency of buckwheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2013, 19(2): 340—346. (in Chinese with English abstract)
- [7] 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.
Shang Haili, Bi Yinli, Peng Suping, et al. Mechanism of potassium release from different silicate minerals by releasing K bacteria in northwest arid land, China[J]. Acta Mineralogica sinica, 2015, 35(3): 337—343. (in Chinese with English abstract)
- [8] 毕银丽, 解文武, 李少朋, 等. 不同条件下的硅酸盐细菌 C6X 菌株释钾效果[J]. 科技导报, 2015, 33(8): 18—23.

- Bi Yinli, Xie Wenwu, Li Shaopeng, et al. Potassium-dissolving effects of silicate bacteria C₆X strain under different conditions[J]. Science and Technology Review, 2015, 33(8): 18—23. (in Chinese with English abstract)
- [9] 李仁义. 粘土矿物和铁氧化物对两种地带性土壤微生物多样性的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- Li Renyi. The Effect of Two Clay Minerals and Iron Oxide on Bacterial Diversity in Two Zonality Soils[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [10] Subhashini D V. Growth promotion and increased potassium uptake of tobacco by potassium-mobilizing bacterium *Frateriura aurantia* grown at different potassium levels in vertisols[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2015, 46(2): 210—220.
- [11] 毕银丽, 胡俊波, 王震, 等. 释钾菌的筛选及其对粉煤灰的释钾效应[J]. 辽宁工程技术大学学报: 自然科学版, 2010, 29(6): 1141—1144.
- Bi Yinli, Hu Junbo, Wang Zhen, et al. Potassium-dissolving bacteria isolated and their effects on release available K in coal fly ash[J]. Journal of Liaoning Technical University: Natural Science, 2010, 29(6): 1141—1144. (in Chinese with English abstract)
- [12] 土壤微生物研究会[日]. 土壤微生物实验法[M]/叶维青译.. 北京: 科学出版社, 1983: 101—105.
- [13] 王学奎, 黄见良. 植物生理生化实验原理与技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006: 215—221.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2005: 50—55, 82—93.
- [15] 刘飞, 张民, 诸葛玉平, 等. 马铃薯玉米套作下控释肥对土壤养分垂直分布及养分利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(6): 1351—1358.
- Liu Fei, Zhang Min, Zhuge Yuping, et al. Effects of controlled-release fertilizer on vertical distribution of soil nutrients and nutrient use efficiencies under potato and maize relay cropping system[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2011, 17(6): 1351—1358. (in Chinese with English abstract)
- [16] 何国斌. 土壤离子扩散与吸附/解吸微观机制的 Monte Carlo 模拟[D]. 重庆: 西南大学, 2012.
- He Guobin. Monte Carlo Simulation of the Microcosmic Mechanism of Ion Diffusion and Adsorption/desorption in Soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2012. (in Chinese with English abstract)
- [17] Geertjie Johanna Pronk, Katja Heister, Ding Guochun. Development of biogeochemical interfaces in an artificial soil incubation experiment: Aggregation and formation of organo-smineral associations[J]. Geoderma, 2012(10): 585—594.
- [18] 李少朋, 毕银丽, 陈咄圳, 等. 外源钙与丛枝菌根真菌协同对玉米生长的影响与土壤改良效应[J]. 农业工程学报, 2013, 29(1): 109—116.
- Li Shaopeng, Bi Yinli, Chen Peizhen, et al. Effects of AMF cooperating with exogenous calcium on maize growth and soil Improvement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(1): 109—116. (in Chinese with English abstract)
- [19] 祝飞华, 王益权, 石宗琳, 等. 轮耕对关中一年两熟区土壤物理性状和冬小麦根系生长的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(22): 7454—7463.
- Zhu Feihua, Wang Yiquan, Shi Zonglin, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7454—7463. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李程亮. 底泥对氮磷的吸附及投加微生物对底泥磷释放的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- Li Chengliang. The Influence of Absorption of Nitrogen and Phosphorus in Sediment and the Release of Phosphorus in Sediment After Adding Microbe[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [21] 李少朋, 毕银丽, 余海洋, 等. 模拟矿区复垦接种丛枝菌根缓解伤根对玉米生长影响[J]. 农业工程学报, 2013, 29(23): 211—216.
- Li Shaopeng, Bi Yinli, Yu Haiyang, et al. Simulation on relieving negative influence of damage roots on growth of maize by application of arbuscular mycorrhizal fungi[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(23): 211—216. (in Chinese with English abstract)
- [22] Vijay Singh Meena, B R Maurya, Jay Prakash Verma. Does a rhizospheric microorganism enhance K⁺ availability in agricultural soils?[J]. Microbiological Research, 2014, 169: 337—347.
- [23] 丁红, 张智猛, 戴良香, 等. 不同抗旱性花生品种的根系形态发育及其对于干旱胁迫的响应[J]. 生态学报, 2013, 33(17): 5169—5176.
- Ding Hong, Zhang Zhimeng, Dai Liangxiang, et al. Responses of root morphology of peanut varieties differing in drought tolerance to water-deficient stress[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(17): 5169—5176. (in Chinese with English abstract)
- [24] 何君. 沉积物钙形态分析及沮草-沉积物-上覆水体中钙-磷关系研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2013.
- He Jun. Study on the Extraction of Sediment Calcium and the Influence of Calcium on Phosphorus in the System of Potamogeton Crispus-sediment-overlying Water[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [25] 杜加银, 茹美, 倪吾钟. 减氮控磷稳钾施肥对水稻产量及养分积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 523—533.
- Du Jiayin, Ru mei, Ni Wuzhong. Effects of fertilization with reducing nitrogen, controlling phosphorus and stabilizing potassium on rice yield and nutrient accumulation[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2013, 19(3): 523—533. (in Chinese with English abstract)

Synergistic effect of releasing potassium bacteria and clay minerals improving maize growth and soil nutrients availability

Shang Haili^{1,2}, Bi Yinli^{1*}, Peng Suping¹, Xie Wenwu¹

(1. State Key Laboratory of Coal Resources and Safe Mining, China University of Mining and Technology, Beijing 100083, China;

2. Research Institute of Mining Engineering, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou 014010, China)

Abstract: Widely distributed shallow-buried paleochannels sand-bodies are valuable reservoirs of shallow water resource in the coal mining area. It is located in the transition zone between Maowusu desert and Loess Plateau, in which ecological environment is fragile and vulnerable to damage. It is necessary to rationally develop and utilize soil in shallow-buried paleochannels for ecological restoration in the mining area of northwest china. In order to reveal the effects of releasing potassium bacteria on plant growth and soil nutrients utilization in the shallow-buried paleochannels in the Northwest Mining area, the study was performed by short-term pot cultures in heliogreenhouse with maize in artificial soils, which simulated the soils with different contents of clay minerals in paleochannels. Test artificial soils were composed of quartz and 2 kinds of potassium-rich clay minerals, including feldspar and illite which are common minerals in the soil of northwest mining area. The test artificial soils were treated with 6 levels of clay minerals, which followed by 18%, 25%, 38%, 45%, 68% and 75% mass fractions of clay minerals in soils. Each level of clay minerals treated with inoculation with active C₆X or sterilized C₆X. The C₆X was the tested strains of releasing potassium bacteria *Phyllobacterium ifriqiyense* isolated from the garden soil in Beijing Suburbs by microbial reclamation laboratory in China University of Mining and Technology. We investigated the relationship between the releasing potassium bacteria quantity and the artificial soils with 6 different kinds of clay minerals ratios, and their synergistic effect on the growth of maize including dry weight of shoot, root shoot ratio and root activity, mineral nutrients of maize and apparent utilization ratios of nitrogen, phosphorus and potassium in soil. The results showed: 1) The quantity of releasing potassium bacteria was increased with increase in the clay minerals contents in soil. Releasing potassium bacteria quantity reached the peak value when the mass fraction of clay minerals in soil was 68% and concentration of exchangeable potassium in soil was 170 mg/kg, which was followed by decline of releasing potassium bacteria quantity at the mass fraction of clay minerals of 75%; 2) Maize dry weight of shoot, root shoot ratio, root activity were increased following the increase of clay minerals contents. When the mass fraction of clay minerals was 68% with inoculation with active C₆X, the 3 indexes of maize growth reached maximum value; 3) The optimum mass fractions of clay minerals in soils with active C₆X inoculation were 45%, 68% and 75% for accumulations of maize nitrogen, phosphorus and potassium and soil nutrients availability. The maximum apparent utilization ratios of soil potassium, nitrogen and phosphorus were 65%, 53% and 17%, respectively; 4) Releasing potassium bacteria promoted the absorption of phosphorus in the case of soil potassium deficiency (the mass fraction of clay minerals was 18%), while it promoted the absorption of nutrients in maize and use efficiency of nitrogen, phosphorus and potassium in the case that soil potassium exceeded (the mass fraction of clay minerals was 75%). The absorption and utilization of nitrogen, phosphorus and potassium in maize was closely associated with potassium content in the artificial soils, and was not significantly correlated with initial contents of nitrogen, phosphorus in the artificial soils. In sum, releasing potassium bacteria quantity was intensively influenced by the contents of clay minerals in soil. The interaction between clay minerals and releasing potassium bacteria in soil affected maize growth and nutrition uptake actively, also enhanced the utilization of mineral nutrients in soil. It provides useful information for exploring suitable microbial reclamation technology and improving degraded soil in mining area in northwest China.

Keywords: clay minerals; bacteria; nutrient; synergistic effect; maize growth; soils