

# 不同条件下的硅酸盐细菌 C6X 菌株 释钾效果

毕银丽, 解文武, 李少朋, 尚海丽

中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

**摘要** 针对神东矿区采煤塌陷地土壤亏钾现象, 将石英、钾长石和伊利石 3 种黏土矿物按不同比例混合, 并以此作为供试基质, 研究在不同控水条件下, 硅酸盐细菌 C6X 菌株接种量对不同基质释钾效果的影响, 以期找到最佳条件使硅酸盐细菌 C6X 菌株能够充分发挥释钾效应, 从而使塌陷地土壤亏钾现象得到改善, 以便进一步对当地土壤进行有效合理的利用。研究结果表明, 接种硅酸盐细菌能增加基质速效钾含量; 接种量变化影响基质的释钾效果, 不同配比基质最佳接菌量均为 10%; 4 种配比基质的最佳含水量随着黏土矿物黏性的增强而依次降低, 分别为对应基质最大持水量的 120%、100%、70% 和 55%; 石英: 钾长石: 伊利石质量配比为 1:1:3 时, 硅酸盐细菌 C6X 菌株对其释钾效果最优, 可达 1.44%。因此, 土壤在含水量为 55% 时接种 10% 的硅酸盐细菌其土壤改良效果最为明显。

**关键词** 硅酸盐细菌; 黏土矿物; 释钾; 含水量; 接菌量

**中图分类号** Q935

**文献标志码** A

**doi** 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.08.002

## Potassium-dissolving effects of silicate bacteria C6X strain under different conditions

BI Yinli, XIE Wenwu, LI Shaopeng, SHANG Haili

College of Geoscience and Surveying Engineering, China University of Mining & Technology, Beijing, Beijing 100083, China

**Abstract** Potassium deficiency exists in the coal mining subsidence area of Shendong coal mine. In this study, three kinds of clay minerals (quartz, potassium feldspar and illite) were mixed in different ratios and taken as the test matrix for investigating impacts of the amount of silicate bacteria C6X strain inoculum on effects of potassium release with different matrixes under different water control conditions. The aim is to find the most reasonable conditions for silicate bacteria C6X strain to release potassium to improve potassium deficiency in the studied area. In this way, the local soil can be utilized reasonably and effectively. The results show that the silicate bacteria increased the content of available potassium in the matrix. The changes of inoculation affected the effects of potassium release of the matrix. The best inoculum sizes of different substrates were all 10%. The optimum moisture content of the four substrates decreased with enhancement of the viscosity of clay mineral, being 120%, 100%, 70% and 55% of the maximum water holding capacity of the corresponding matrix. When the mass ratio of quartz: potassium feldspar: illite was 1:1:3, the effect of potassium release on the substrates of the silicate bacteria C6X strain was the best, being 1.44%. Therefore, the corresponding soil with moisture content of 55% can be best improved with 10% of silicate bacteria inoculation.

**Keywords** silicate bacteria; clay mineral; potassium release; moisture content; inoculum size

中国是一个钾矿资源缺乏的国家, 每年的钾肥生产能力远低于消耗, 钾肥主要依赖进口, 钾肥的缺失影响中国农业

的可持续发展<sup>[1]</sup>。土壤颗粒组成中, 含钾硅酸盐类矿物含量达 60% 之多, 但能被作物生长吸收的可溶性钾仅占 2%~10%,

收稿日期: 2014-12-26; 修回日期: 2015-02-28

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC10B03)

作者简介: 毕银丽, 教授, 研究方向为矿区微生物复垦与生态重建, 电子信箱: ylb88@126.com; 解文武(共同第一作者), 硕士研究生, 研究方向为矿区生态环境治理, 电子信箱: rbke\_ww@163.com

引用格式: 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.

其余均很难从矿物形态向有效钾转化,不易被作物吸收<sup>[2,3]</sup>。在中国西部采煤塌陷区土壤缺钾现象尤为突出,煤炭开采过程中地面塌陷产生大量裂缝,塌陷区土壤水土流失问题突出,且土壤中钾元素流失严重。钾元素的缺失影响着采煤塌陷地植物的生长,减缓了矿区生物自修复能力,不利于矿区复垦和生态重建。硅酸盐细菌是一种胶质芽孢杆菌(*Bacillus mucilaginosus*),世界各地分布十分广泛,对营养条件要求不高且易于规模化培养,因而成为微生物肥料中的一种广泛应用的良好功能菌,兼具溶磷、解钾和固氮功能<sup>[4-7]</sup>。土壤中的养分(除氮素)均来自矿物的风化<sup>[8]</sup>,硅酸盐细菌可将土壤中无效态钾转化为有效态钾,供植物吸收利用<sup>[9,10]</sup>。同时其代谢产物如生长刺激素、多糖、有机酸和蛋白质等能抑制病原菌生长,改善土壤肥力,还可以促使土壤结晶构造破坏<sup>[11-13]</sup>。

目前关于对硅酸盐细菌的研究大致有5个角度。1) 高效菌株的提取,是硅酸盐细菌释钾研究的前提。2) 释钾效率。连宾等<sup>[5]</sup>研究表明,硅酸盐细菌解钾作用相对量上十分明显,但绝对值有限。3) 释钾条件,诸如土壤和环境条件等。罗微等<sup>[9]</sup>关于硅酸盐细菌对矿粉和土壤的解钾作用研究表明,该菌对不同类型矿粉的解钾能力不同。池景良等<sup>[9]</sup>研究表明,硅酸盐细菌在贫钾土壤中的解钾活性更强。4) 释钾机制。许多学者<sup>[5-9,13]</sup>对此进行过研究,但认识还无定论,一般认为与细菌产生的有机酸、酶及多糖有关。5) 促生效应。目前许多学者<sup>[2-4,10]</sup>在研究硅酸盐细菌菌肥对农业生产上的作用,以探讨硅酸盐细菌代谢物对植物生长、植物病害和病原菌的抑制作用及其对植物抗逆性影响。

煤炭开采对神东矿区土地造成较大面积破坏,虽然通过施加钾肥在一定程度上能缓解煤炭开采造成的不利影响,但是其治理成本较高,难以在矿区推广应用。微生物技术由于其能耗低、成本低、无污染、方法简单和可持续性,是国内外生态环境治理领域较为倡导的方法之一。本研究通过实地取样,分析得出大柳塔采煤沉陷区的土壤主要成分为石英、钾长石和伊利石,通过在室内将3种矿物按不同比例混合,模拟矿区土壤,研究接种量改变对不同基质释钾效果的影响,以及硅酸盐细菌C6X菌株对不同含水基质释钾效果响应,从而为硅酸盐细菌在矿区复垦中的应用提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 供试菌株与矿物

硅酸盐细菌C6X菌株由本实验室分离筛选。供试矿物为石英、钾长石和伊利石,汇鑫石粉厂提供,碾碎至100目。

### 1.2 实验方法

1) 按质量将3种矿物按4种质量比(石英:钾长石:伊利石)进行混合,总质量均取20 g,4种比例分别为8:1:1,6:1:3,2:1:2,1:1:3。

2) 4种配比基质各取20 g放入培养皿,分别添加不同含水量和接种不同剂量的硅酸盐细菌,密封,无菌环境中培养7 d。7 d后拆封晾干并将各处理后的基质取出放入自封

袋。每种基质分别添加6个梯度的含水量(mL),分别为基质最大持水量与基质质量(20 g)乘积,经换算成体积后的55%、70%、85%、100%、120%、200%;每个梯度含水量接种5个梯度的硅酸盐细菌活菌(mL),分别为对应含水量体积的0%、5%、10%、15%、20%。每个处理设置3个重复、3个对照。

3) 实验所需矿物及所用工具全部采用灭菌处理,各步骤均在无菌环境中操作完成。

4) 用电感耦合等离子体(ICP)对各基质进行速效钾含量的测定。材料方法参考《土壤农化分析》<sup>[14]</sup>。

### 1.3 数据处理

数据处理采用SPSS Statistics 19.0软件分析。

### 1.4 结果计算

生物释钾量=处理速效钾含量-对照速效钾含量<sup>[15]</sup>;增量(%)=生物释钾量/对照速效钾含量×100%。

## 2 结果与分析

### 2.1 各配比不同接菌量处理对不同含水量基质中速效钾含量的影响

不同接菌量和含水量处理对不同配比基质中速效钾含量均有不同程度的影响(表1)。这表明,接种硅酸盐细菌确实具有分解黏土矿物中难溶性钾的能力;不同含水量处理条件下各配比基质中速效钾含量所表现出的明显差异表明水分对硅酸盐细菌发挥其释钾功能具有显著影响;同一接菌量条件下,不同含水量处理对基质中速效钾含量差异达显著水平,但其增量差异各有不同。这表明,含水量处理对硅酸盐细菌发挥其释钾功能的影响并不稳定,目前关于水分对硅酸盐细菌影响的研究极少且无定论,其作用机制尚待进一步研究。

实验结果表明,实验中所用的硅酸盐细菌C6X菌株具有一定的解钾能力,但其解钾量的绝对数值不大(表1)。虽然关于高解钾率的硅酸盐细菌已有报道,但其绝对解钾量仍然很小,效果有限。这与郑传进的实验结论类似<sup>[16-19]</sup>。有研究表明,将硅酸盐细菌制作菌肥,对农作物具有增产、增收效益,解钾量与供给植物钾素相比效果有限<sup>[6]</sup>。同时,不同硅酸盐细菌菌株解钾能力存在差异。盛下放等<sup>[20]</sup>从全国十几个省市45个基质中共分离得到硅酸盐细菌118株,并通过摇瓶实验表明,不同菌株的释钾能力存在差异。这与龙健等<sup>[21]</sup>认为的不同硅酸盐细菌的不同种之间对含钾矿物的分解能力可能不一致的观点相吻合。因此,今后研究重点应该是优良、高效硅酸盐细菌菌株的筛选。

### 2.2 接菌量对各配比不同含水量基质速效钾含量的影响

接菌量对4个配比不同含水量基质速效钾含量均有不同程度影响(图1)。不同接菌量处理条件下硅酸盐细菌在不同黏土矿物中释钾效果所表现出的差异是由硅酸盐细菌和黏土矿物及其次生代谢产物相互作用产生的。硅酸盐细菌分解含钾矿物的作用与其代谢活性密切相关<sup>[22]</sup>。接菌量从0依

表 1 各配比不同接菌量和含水量处理对基质中速效钾含量的影响

Table 1 Influence of different inoculum size and moisture content of different mixture ratio on the content of available potassium in the matrix

配比	含水量/%	不接菌/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	接菌 5%/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	增量/ %	接菌 10%/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	增量/%	接菌 15%/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	增量/%	接菌 20%/ (mg·kg <sup>-1</sup> )	增量/%
配比 1	55	6.91	6.96	0.74	6.99	1.10	6.93	0.34	6.92	0.18
	70	7.03	7.04	0.19	7.09	0.98	7.08	0.79	7.06	0.50
	85	7.10	7.15	0.64	7.17	0.97	7.12	0.31	7.10	0.07
	100	7.18	7.21	0.44	7.22	0.63	7.18	0.06	7.19	0.13
	120	7.22	7.26	0.60	7.27	0.72	7.23	0.09	7.23	0.15
	200	6.97	7.01	0.59	7.06	1.25	7.04	0.96	7.03	0.88
配比 2	55	10.87	10.96	0.83	11.01	1.28	10.95	0.77	10.95	0.77
	70	11.15	11.17	0.18	11.28	1.20	11.17	0.15	11.20	0.45
	85	11.25	11.27	0.24	11.38	1.19	11.33	0.77	11.33	0.77
	100	11.56	11.65	0.72	11.70	1.21	11.62	0.52	11.61	0.43
	120	11.48	11.53	0.44	11.60	1.02	11.56	0.67	11.51	0.23
	200	11.33	11.36	0.24	11.44	0.97	11.37	0.32	11.40	0.65
配比 3	55	17.45	17.52	0.44	17.68	1.32	17.66	1.24	17.59	0.82
	70	17.67	17.77	0.55	17.90	1.30	17.81	0.77	17.77	0.53
	85	17.56	17.65	0.51	17.84	1.59	17.76	1.14	17.65	0.49
	100	17.50	17.62	0.65	17.74	1.35	17.71	1.20	17.57	0.40
	120	17.42	17.51	0.55	17.65	1.36	17.58	0.92	17.51	0.55
	200	17.18	17.30	0.70	17.39	1.24	17.36	1.07	17.29	0.66
配比 4	55	21.41	21.54	0.59	21.72	1.42	21.69	1.31	21.50	0.39
	70	21.11	21.30	0.90	21.41	1.42	21.39	1.36	21.28	0.81
	85	21.19	21.32	0.63	21.48	1.38	21.46	1.29	21.44	1.21
	100	21.11	21.21	0.49	21.40	1.37	21.29	0.88	21.32	1.03
	120	21.06	21.13	0.32	21.38	1.49	21.33	1.27	21.27	0.97
	200	21.11	21.29	0.84	21.43	1.52	21.33	1.06	21.29	0.85

次上升至 10% 时, 4 个配比基质中速效钾含量均呈递增趋势, 且都在接菌量 10% 时达到最高, 这表明接种硅酸盐细菌能够释放黏土矿物中难溶性钾的结论成立。接种硅酸盐细菌后菌体生长繁殖(分裂繁殖建造菌体细胞<sup>[23]</sup>)必须消耗部分可溶性钾, 而这些菌体细胞多数又黏附在固体颗粒上, 从而导致可溶性钾的量有所下降<sup>[24]</sup>。由于基质中可溶性钾含量有限, 随着接菌量的增加, 细菌本身消耗明显增大; 其次, 各配比基质中所含有的黏粒性矿物(特别是半风化的伊利石)晶格对速效钾具有一定的固定作用<sup>[15]</sup>, 4 种配比基质在接菌量达到 15% 和 20% 时, 黏粒性矿物晶格对可溶性钾的固定作用更强; 此外, 矿物对钾的选择吸附作用促使一部分可溶性钾无法被检测出来<sup>[25]</sup>。因此, 随着接菌量增加至 15% 和 20%, 基质中速效钾含量均开始有所下降; 接菌量为 15% 和 20% 两个水平

时, 速效钾含量差异并不明显, 基本趋于平稳状态。由图 1 可以看出, 4 种配比基质在 6 个梯度的含水量处理下, 其速效钾含量均在接菌量 10% 时达到最大, 因而 4 个配比均选择 10% 为最佳接菌量。

### 2.3 含水量对各配比不同接菌量基质速效钾含量的影响

基质含水量对 4 个配比不同接菌量基质速效钾含量均有不同程度的影响(图 2)。湿润或淹水条件下, 硅酸盐细菌能显著加快供试矿物的分解而释放出钾, 水分能保证硅酸盐细菌的正常生长、代谢<sup>[22]</sup>。配比 1 和配比 2 的速效钾含量随着含水量由 55% 增加至 100% 而呈逐步增长趋势, 配比 2 中速效钾含量在含水量为 100% 时达到最高, 而配比 1 在含水量为 120% 时达到最高, 之后两种配比基质中速效钾含量均开始下降。配比 3 的速效钾含量在含水量为 55%~70% 时有所提高,

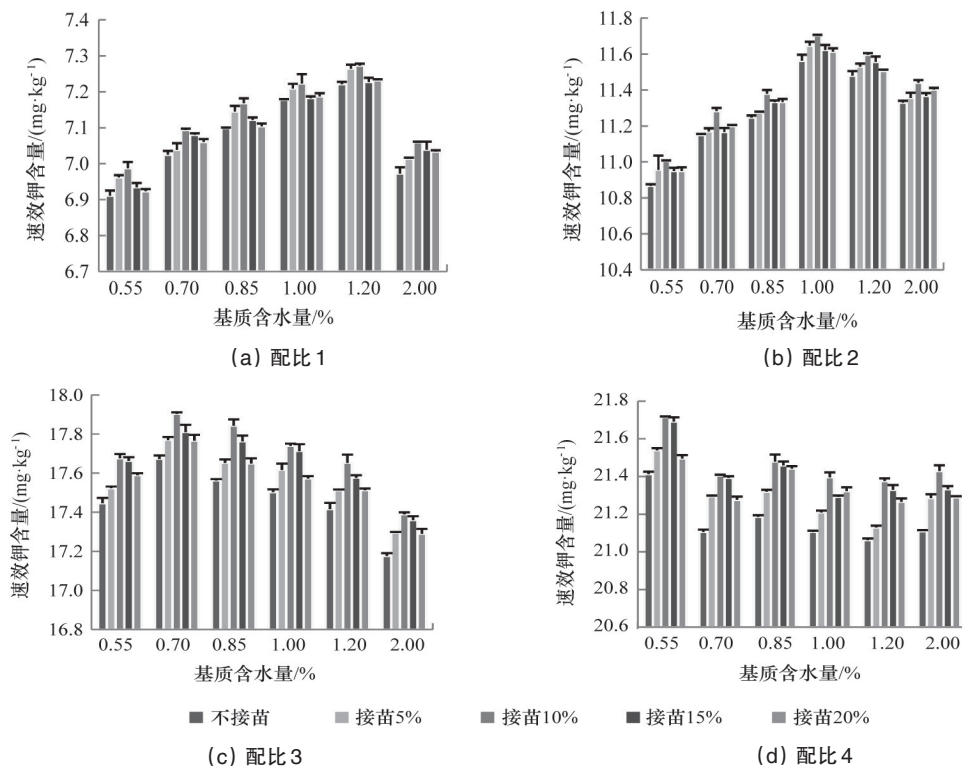


图1 接种量对各配比不同含水量基质速效钾含量的影响

Fig. 1 Influence of inoculum size on the content of available potassium in different substrates with different moisture content

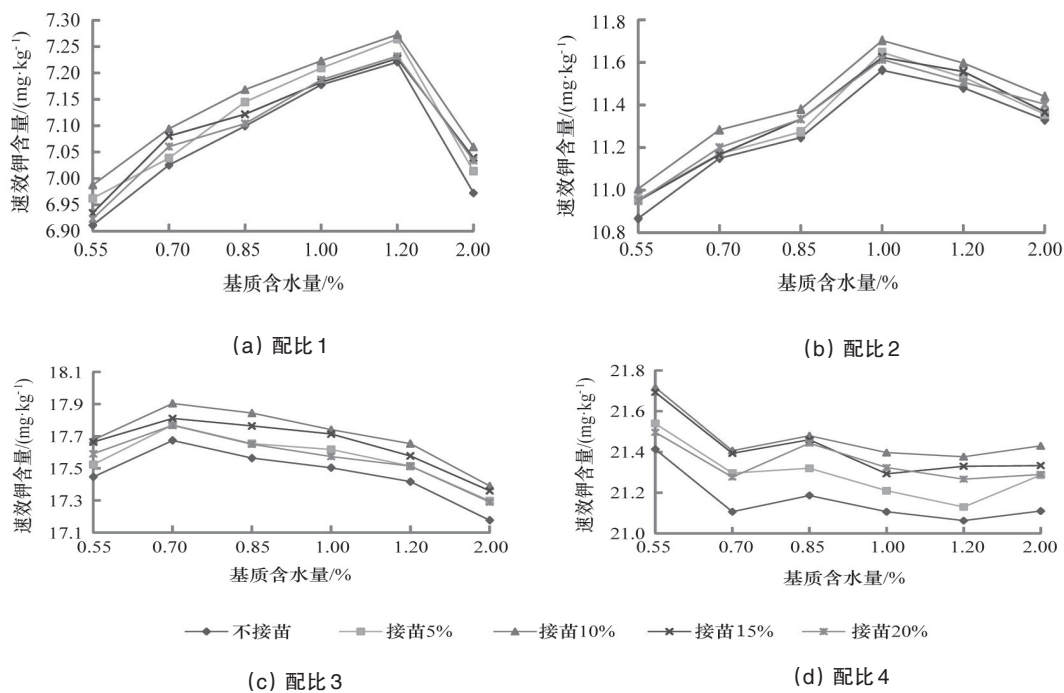


图2 含水量对各配比不同接种量基质速效钾含量的影响

Fig. 2 Influence of moisture content on the content of available potassium in different substrates with different inoculum size

之后呈现逐步下降状态;配比4中速效钾含量在含水量55%时达到最高,之后整体呈现下降趋势。速效钾含量最高时表明,此时硅酸盐细菌解钾效果最为明显,因而最佳含水量选

择速效钾含量最高时所对应含水量。由图2可以看出,4种配比基质所对应最佳含水量分别为120%、100%、70%和55%。上述分析所述最佳含水量依次降低的结论表明,随着黏土黏

性的逐步增强,硅酸盐细菌达到最佳释钾效果所需含水量依次减少。主要因为硅酸盐细菌是兼性需氧型细菌,随着黏土黏性的增强,空气通透性逐渐变差,基质的储水能力依次增强,含水量差异会影响基质中的氧气含量,良好的通风条件能够提高硅酸盐细菌对供试矿物中固态钾的释放效率<sup>[26,27]</sup>。因而4种配比基质所对应最佳含水量依次减少更适合其生长并发挥释钾效应。

#### 2.4 基质最佳配比探讨

本研究4种配比基质最佳接菌量均为10%,由不接菌与最佳接菌量条件下速效钾含量对比表明,4种配比基质所对应接菌效果依次增强,以配比1最差,配比4最好(表2),这表明硅酸盐细菌C6X菌株对不同含钾矿物表现出不同的分解能力。这与盛下放等的研究结论一致<sup>[27]</sup>。根据上述讨论所得出的4个配比最佳含水量结果,对最佳含水量条件与对应含水量不接菌时速效钾含量进行对比分析表明,4种配比基质在最佳含水量条件下所对应的接菌效果依次递增,以配比1最差,配比4最好(表3),这与从最佳接菌量角度所分析的接菌效果结论一致。因此,从2个角度综合考虑,最终选择配比4为最佳基质配比,此配比在最佳接菌量和最佳含水量条件下释钾效果均最好。大量研究表明,硅酸盐细菌对伊利石的解钾作用明显强于对钾长石的解钾作用。在多种矿物共存时,细菌会因矿物晶体结构差异而表现出明显不同的作用效果,从而对不同矿物类型进行不同程度的破坏,不同含钾矿物抗生物分解能力差异明显。伊利石为层状结构,其所含钾离子位于层状结构之间,而钾长石所含钾离子位于矿物晶格中,故伊利石更易释放钾离子<sup>[20]</sup>。此外,硅酸盐细菌还可通过增大其层间域的距离而促进钾离子的释放。

表2 4种配比基质在最佳接菌量条件下接菌效果对比

Table 2 Comparison of the inoculation effect of the four substrates under optimum inoculum size

配比	最佳接菌量/%	不接菌时速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	最佳接菌量时速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	释钾率/%
配比1	10	7.068	7.134	0.93
配比2	10	11.273	11.401	1.14
配比3	10	17.463	17.701	1.36
配比4	10	21.164	21.468	1.44

表3 4种配比基质在最佳含水量条件下接菌效果对比

Table 3 Comparison of the inoculation effect of the four substrates under optimum moisture content

配比	最佳含水量/%	不接菌时速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	最佳含水量时速效钾含量/(mg·kg <sup>-1</sup> )	释钾率/%
配比1	120	7.221	7.243	0.31
配比2	100	11.563	11.630	0.58
配比3	70	17.673	17.785	0.63
配比4	55	21.413	21.572	0.74

同时,伊利石晶格中硅氧四面体片的硅原子被铝原子置换的数量更少,加之伊利石的单位晶胞的负电荷也比较小,晶层之间的叠置不规整,晶格晶层间的K<sup>+</sup>部分被Ca<sup>+</sup>、Mg<sup>+</sup>、H<sup>+</sup>等所代换<sup>[28]</sup>。因而,伊利石在风化解钾过程中更易释放钾离子。配比4中伊利石的含量最高,因而其整体释钾效果最佳。

### 3 结论

1) 接种不同剂量的硅酸盐细菌C6X菌株的确影响4种配比基质中钾元素的释放,且最佳接菌量均为10%。4种配比基质在最佳接菌量条件下的释钾率分别为0.93%、1.14%、1.36%和1.44%。

2) 不同含水量处理条件下,4种配比基质中速效钾含量随着接菌量的不同整体差异均达显著水平,最大值分别出现在含水量为120%、100%、70%和55%时,速效钾含量变化是含水量和硅酸盐细菌及黏土矿物三者共同作用的结果,因此选择上述4个含水量作为各配比基质所对应的最佳含水量,即随着黏土黏性增强,硅酸盐细菌最佳含水量逐步降低。

3) 从最佳接菌量和最佳含水量两个角度分别对4种配比基质的整体释钾效果进行分析,结果表明,两个角度所得结论基本一致,即4种配比基质释钾效果随伊利石含量的逐步增加和石英含量的逐步减少而依次增强,以配比4的释钾效果最好,即配比4为最佳配比。

4) 4种配比基质在5种不同接菌量水平和6种不同含水量水平处理条件下,最终选择释钾效果最好的配比4为最佳配比,其最佳接菌量为10%,最佳含水量为55%。硅酸盐菌剂作为微生物肥料有两个必要前提:一是筛选出高效的菌株;二是筛选出的菌株自身要对周围有良好的适应性(抗逆性)。本研究结果表明,硅酸盐细菌C6X菌株对大柳塔采煤沉陷区土壤的亏钾现象有较好的改良作用,因而采用微生物技术改良该地区土壤具有很大的可行性。但由于目前的研究只是室内条件下人为控制的结果,而应用推广至大田中其释钾效果可能会受到多种环境条件影响,如土壤肥力、温度、pH值、土壤中其他微生物作用等。因而,硅酸盐菌剂的实际应用效果带有很大不稳定性,故还需进一步研究其实际应用时的释钾效果。因而对硅酸盐细菌菌剂的使用应当十分慎重,在没有完全掌握其释钾机制和影响因素之前,还不能将其替代化学钾肥。

#### 参考文献(References)

- 钮旭光, 华秀英, 何随成. 硅酸盐细菌解钾活性的研究[J]. 土壤通报, 2005, 36(6): 136-139.  
Niu Xuguang, Hua Xiuying, He Suicheng. Studies on the potassium - dissolving ability of silicate bacteria[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(6): 136-139.
- 党雯, 郝春花, 张强, 等. 解钾菌的研究进展及其在农业生产中的应用[J]. 山西农业科学, 2014, 42(8): 921-924.  
Dang Wen, Hao Chunhua, Zhang Qiang, et al. Research progress of

- silicate bacteria and its application in agricultural production[J]. Shanxi Agricultural Sciences, 2014, 42(8): 921-924.
- [3] 罗微, 谢德体, 黄昭贤, 等. 硅酸盐细菌对矿粉和土壤的解钾作用研究[J]. 西南农业大学学报, 1998, 20(1): 7-10.  
Luo Wei, Xie Deti, Huang Zhaoxian, et al. Role of silicate bacteria in releasing potassium from minerals and soils[J]. Journal of Southwest Agricultural University, 1998, 20(1): 7-10.
- [4] 薛泉宏, 李素俭, 张俊宏, 等. 液培条件下钾细菌对土壤养分的活化作用研究[J]. 西北农业大学学报, 1999, 27(2): 36-40.  
Xue Quanhong, Li Sujian, Zhang Junhong, et al. Dissolving effect of the silicate bacteria to soil nutrients[J]. The Northwest Journal of Kasetsart University, 1999, 27(2): 36-40.
- [5] 连宾, 傅平秋, 莫德明, 等. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应[J]. 矿物学报, 2002, 22(2): 179-183.  
Lian Bin, Fu Pingqiu, Mo Deming, et al. A comprehensive review of the mechanism of potassium releasing by silicate bacteria[J]. Journal of Minerals, 2002, 22(2): 179-183.
- [6] 贺积强, 李登煜, 张小平, 等. 硅酸盐细菌的研究进展[J]. 西南农业学报, 1999, 12(增1): 102-108.  
He Jiqiang, Li Dengyu, Zhang Xiaoping, et al. Research progress on silicate bacteria[J]. Southwest China Journal of Agricultural Science, 1999, 12(Suppl1): 102-108.
- [7] 谷付旗, 季秀玲, 魏云林. 土壤硅酸盐细菌的研究进展[J]. 中国微生物学杂志, 2013, 25(5): 609-611.  
Gu Fuqi, Ji Xiuling, Wei Yunlin. Research and progress on soil silicate bacteria[J]. Journal of Chinese Microecology, 2013, 25(5): 609-611.
- [8] 潘大为, 梁成华, 杜立宇. 土壤含钾矿物的释钾研究进展[J]. 土壤通报, 2005(2): 253-258.  
Pan Dawei, Liang Chenghua, Du Liyu. Progress in research on potassium release from K-bearing minerals in soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005(2): 253-258.
- [9] 池景良, 葛英华. 硅酸盐细菌解钾活性的研究[J]. 微生物学杂志, 1999, 19(2): 43-45.  
Chi Jingliang, Ge Yinghua. Study on potassium releasing activity of silicate bacteria[J]. Journal of Microbiology, 1999, 19(2): 43-45.
- [10] Monib M. Role of silicate bacteria in releasing K and Si from biotite and orthoclase[J]. Soil Biology and Conservation of the Biosphere, 1986, 2: 733-743.
- [11] 王伟, 李佳, 刘金淑, 等. 硅酸盐细菌菌株的分离及其解钾解硅活性初探[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(17): 7889-7891.  
Wang Wei, Li Jia, Liu Jinshu, et al. Isolation of the silicate bacteria strain and determination of the activity of releasing silicon and potassium[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(17): 7889-7891.
- [12] Malinovskaya I M. Leaching of silicon containing rock using bacillus mucilaginosus[J]. Microbiologicheskii Zhurnal, 1988, 50(5): 25-30.
- [13] Malinoskaya I M, Kosenko L V, Votselko S K, et al. The role of bacillus mucilageinosus polysaccharide in the destruction of silicate minerals[J]. Microbiologiya, 1990, 59(1): 70-78.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 106-108.  
Bao Shidan. Soil and agricultural chemistry analysis[M]. 3rd ed. Beijing: Chinese Agriculture Press, 2000: 106-108.
- [15] 李玉梅, 王根林, 孙彬, 等. 不同磷钾水平对硅酸盐细菌解钾溶磷能力的影响[J]. 中国农学通报, 2007, 23(5): 258-260.  
Li Yumei, Wang Genlin, Sun Bin, et al. The effects on releasing potassium and phosphors by silicate- bacteria under different contents of potassium and phosphors[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2007, 23(5): 258-260.
- [16] 郑传进, 涂国全. 硅酸盐细菌解钾能力研究[J]. 韶关学院学报: 自然科学版, 2005, 26(6): 90-92.  
Zheng Chuanjin, Tu Guoquan. Study on the potassium dissolving ability of silicate bacteria[J]. Journal of Shaoguan University: Natural Science Edition, 2005, 26(6): 90-92.
- [17] 李新新, 高新新, 陈星, 等. 一株高效解钾菌的筛选、鉴定及发酵条件的优化[J]. 土壤学报, 2014, 51(2): 381-388.  
Li Xinxin, GaoXinxin, Chen Xing, et al. Isolation and identification of an efficient strain of potassium-dissolving bacteria and optimization of its incubation condition[J]. Journal of Soil, 2014, 51(2): 381-388.
- [18] 闫华晓, 赵辉, 朱硕斐, 等. 6株硅酸盐细菌解磷解钾活性的研究[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(28): 3728-3729.  
Yan Huaxiao, Zhao Hui, Zhu Shuofei, et al. Study on abilities of 6 strains of silicate bacteria to release phosphorus and potassium[J]. Anhui Agricultural Sciences, 2009, 37(28): 3728-3729.
- [19] 何琳燕, 盛下放, 陆光祥, 等. 不同土壤中硅酸盐细菌生理生化特征及其解钾活性的研究[J]. 土壤, 2004, 36(4): 434-437.  
He Linyan, Sheng Xiafang, Lu Guangxiang, et al. Physiological and biochemical characteristics of silicate dissolving bacteria in different soils and their capacities of releasing potassium[J]. Soil, 2004, 36(4): 434-437.
- [20] 盛下放, 黄为一. 硅酸盐细菌NBT菌株释钾条件的研究[J]. 中国农业科学, 2002, 35(6): 673-677.  
Sheng Xiafang, Huang Weiyi. Study on the conditions of potassium release by strain NBT of silicate bacteria[J]. Agricultural Sciences in China, 2002, 35(6): 673-677.
- [21] 龙健, 李娟, 龙明兰, 等. 硅酸盐细菌对含钾矿粉和土壤的解钾作用研究进展[J]. 贵州师范大学学报: 自然科学版, 2000, 18(1): 79-83.  
Long Jian, Li Juan, Long Minglan, et al. Role of silicate bacteria in releasing potassium from minerals and soils[J]. Journal of Guizhou Normal University: Natural Science Edition, 2000, 18(1): 79-83.
- [22] 盛下放, 冯阳. 不同条件下硅酸盐细菌对含钾矿物分解作用的研究[J]. 土壤, 2005, 37(5): 110-112.  
Sheng Xiafang, Feng Yang. Dissolution of potassium-bearing minerals by silicate-dissolving bacteria under different conditions[J]. Soil, 2005, 37(5): 110-112.
- [23] 李凤汀, 郝正然, 杨则媛, 等. 硅酸盐细菌HM8841菌株解钾作用的研究[J]. 微生物学报, 1997, 37(1): 79-81.  
Li Fengting, Hao Zhengran, Yang Zeyuan, et al. Studies on the ability of silicate bacteria HM8841 strain dissolving potassium[J]. Journal of Microbiology, 1997, 37(1): 79-81.
- [24] 徐亮. 矿物类型对硅酸盐细菌解钾作用的影响[J]. 重庆工商大学学报: 自然科学版, 2008, 25(5): 483-485.  
Xu Liang. The effect of mineral types on the function of silicate bacteria[J]. Journal of Industrial and Commercial University of Chongqing: Natural Science Edition, 2008, 25(5): 483-485.
- [25] 胡全才, 卢朝东, Syers J K. 不同土壤对钾的选择吸附特性[J]. 土壤学报, 2002, 39(5): 707-713.  
Hu Quancai, Lu Chaodong, Syers J K. Selectivity of potassium adsorption by soils[J]. Journal of Soil, 2002, 39(5): 707-713.
- [26] 陈华癸, 陈廷伟. 钾细菌的形态、生理及其对磷钙矿物的分解能力[J]. 华中农学院学报, 1959(3): 171-174.  
Chen Huagui, Chen Tingwei. The morphology, physiology and the capacity of decomposing phosphorus calcium minerals of potassium bacteria (Abstract)[J]. Journal of Huazhong Agricultural College, 1959(3): 171-174.
- [27] 盛下放, 黄为一, 曹晓英. 硅酸盐细菌NBT菌株解钾效能及对钾的吸持作用[J]. 植物营养与肥料学报, 2001, 7(4): 459-466.  
Sheng Xiafang, Huang Weiyi, Cao Xiaoying. Dissolution of feldspar and potassium uptake by the strain NBT of silicate bacterium[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2001, 7(4): 459-466.
- [28] 何文鸣, 陈防. 硅酸盐解钾菌对含钾矿物的选择性风化机理[J]. 湖北农业科学, 2014, 53(12): 2754-2762.  
He Wenming, Chen Fang. Selective bio-weathering potassium-bearing mineral by silicate bacteria[J]. Hubei Agricultural Sciences, 2014, 53(12): 2754-2762.

(责任编辑 吴晓丽)