

硅酸盐细菌 NBT 菌株解钾机理初探

盛下放 黄为|

(南京农业大学资源与环境科学学院, 南京 210095)

摘要 摇瓶条件下,对硅酸盐细菌 NBT 菌株发酵液及其代谢产物分解钾长石的作用进行了研究。结果表明,培养 48 h 的 NBT 菌株发酵液能活化钾长石中的钾、硅、铝。28℃ 振荡 10 天后的滤液中 K, SiO₂, Al₂O₃ 含量分别达 184.1、39.8 和 12.6 mg L⁻¹, 分别比灭菌发酵液中的 K, SiO₂, Al₂O₃ 含量增加 106.1%、63.1% 和 133.3%。NBT 菌株发酵液中含有大量的有机酸、氨基酸、荚膜多糖。摇瓶试验表明,三者都有较强的分解钾长石的能力,28℃ 振荡 10 天后的滤液中的 K 含量分别达 110.8、84.9 和 19.7 mg L⁻¹。另外,三者间有明显的协同作用,三者的混合液可使解钾能力提高 62.2%。三者分解钾长石的能力是通过酸溶和络合作用来实现的。

关键词 硅酸盐细菌, 解钾机理, 钾长石, 代谢产物, 酸溶和络合溶解

中图分类号 Q93, S14

近 20 年来,先进农业技术的应用使农作物获得持续高产,农田钾素携出量远大于补给量,钾素亏缺日益严重,钾已成为继 N、P 元素之后限制农作物产量和品质的第 3 种大量元素^[1]。我国钾矿资源贫乏,单靠进口无法满足当前和将来农业对钾肥的巨大需求。土壤中 90%~98% 的钾主要以作物不能直接吸收利用的矿物钾形式存在。因此,矿物钾的生物有效化是解决土壤中有效钾素亏缺的重要途径之一。一些研究表明^[2,3],硅酸盐细菌能分解钾长石、云母等铝硅酸盐类矿物,使土壤中难溶性的钾、磷、硅等元素转变为可溶性,可供植物吸收利用。但也有一些学者^[4]认为,硅酸盐细菌分解钾长石的能力很低或无分解钾长石能力。南京农业大学微生物学系分离筛选出一株溶磷、解钾能力很强的硅酸盐细菌(NBT 菌株)。试验表明,NBT 菌株能通过破坏钾长石的晶格结构使矿物中的钾释放出来^[5]。因此,筛选出解钾能力强的硅酸盐细菌并阐明其解钾机理就具有重要的理论和实际意义。目前,国内外学者对硅酸盐细菌解钾机理的认识还无定论,存在酸解^[6]、酶解^[7]、胞外多糖形成^[8]等观点。而系统、深入地研究硅酸盐细菌解钾作用及其机理的工作少见报道。为此,作者进行了本项研究,以期阐明硅酸盐细菌促生机理提供试验依据。

1 材料与方 法

1.1 培养基

以 g L⁻¹计,蔗糖 10.0, (NH₄)₂SO₄ 1.0, Na₂HPO₄ 2.0, MgSO₄·7H₂O 0.5, NaCl 0.1, 酵母膏 0.5, CaCO₃

1.0, 钾长石粉 10.0; pH 7.2。

1.2 钾长石粉的制备

钾长石(南京地质矿产研究所惠赠, 采自南京江宁县小龙山) 研磨, 过 100 目筛, 水洗去水溶性钾, 阴干。

1.3 方法

1.3.1 NBT 菌株发酵液的制备 硅酸盐细菌 NBT 菌株纯培养物 10 ml (3.15×10^8 个 ml^{-1}) 接入装有 200 ml 无菌培养基的 1 000 ml 三角瓶中, 30℃ 振荡培养 48 h, 培养物一部分离心 ($12\ 000\ \text{r}\ \text{min}^{-1}$, 15 min), 收集上清液, 用孔径 0.22 μm 的滤膜过滤, 滤液经检查无菌后, 即为除菌发酵液。另一部分静置 1 h, 除去钾长石; 取其中一部分发酵液 121℃ 灭菌 30 min, 即得灭菌发酵液; 同时制备灭菌的培养基(不加钾长石粉)。

1.3.2 NBT 菌株发酵液中有有机酸、氨基酸和荚膜多糖的测定 500 ml 三角瓶中装 100 ml 培养基, 121℃ 20 min 高压灭菌, 冷却后将硅酸盐细菌菌悬液按 5% 接种量接入三角瓶中, 28℃ 振荡 ($180\ \text{r}\ \text{min}^{-1}$) 培养; 培养时间 0, 12, 24, 36, 48, 72, 96 h 后分析。(1) 有机酸的测定。发酵液中有有机酸的提取系用硫酸提取法^[9], 用 HPLC 法测各种有机酸含量。色谱条件: 色谱柱 ALLTMA C_{18} (150 mm \times 4.6 mm), 流动相 0.1% H_3PO_4 , 流速 0.7 $\text{ml}\ \text{min}^{-1}$, 柱温 40℃, $\text{UV}_{\lambda=214\ \text{nm}}$, 检测。(2) 氨基酸的测定。发酵液的处理用三氯醋酸法, 用 0.02 $\text{mol}\ \text{L}^{-1}$ HCl 稀释至适当的浓度上氨基酸分析仪(835—50 氨基酸分析仪) 测定。分析条件: 氨基酸分析专用阳离子交换柱(0.4 cm \times 30 cm), 柱温 62℃, 流速 0.4 $\text{ml}\ \text{min}^{-1}$, 检测器 $\text{UV}_{\lambda=254\ \text{nm}}$ 。(3) 荚膜多糖的测定。取不同培养时间的发酵液, 用丙酮法提取^[10], 提取物按文献[11] 进行纯化, 得到的荚膜多糖经干燥、压片, 用 Nicolet 170SXFT-IR 型红外光谱仪描记、红外光谱分析。

1.3.3 钾长石在不同条件下的溶解作用 称取 1.5g 钾长石粉, 放入 250 ml 三角瓶, 121℃ 灭菌 30 min, 然后按表 1 方式设灭菌培养基(CK1)、灭菌发酵液(CK2)、除菌发酵液、含菌发酵液(不加蔗糖, 加 10% 蔗糖 5 ml 和 10 ml 三组) 6 个处理。每种处理的溶液各加 50 ml, 试验设三个重复, 30℃ 振荡培养 10 天后测滤液中的钾和硅^[12]。

1.3.4 有机酸、氨基酸、荚膜多糖对钾长石的破坏 根据试验检出的有机酸种类和含量范围(33.36~291.94 $\text{mg}\ \text{L}^{-1}$) 分别配制 50, 100, 150, 200, 250, 300 $\text{mg}\ \text{L}^{-1}$ 草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸等四种有机酸系列溶液; 根据检出的氨基酸种类和含量配制氨基酸的混合液(每种氨基酸取其中间浓度); 同样配制 2.0, 4.0, 6.0, 8.0, 10.0 $\text{g}\ \text{L}^{-1}$ 5 个浓度系列的荚膜多糖溶液; 另外, 用 30% 的 H_2O_2 溶液在加热条件下分别破坏有机酸、氨基酸和荚膜多糖的结构, 配制等系列浓度的有机酸、氨基酸和荚膜多糖的水解液。称取 1.5 g 钾长石粉放入 250 ml 三角瓶中, 121℃ 30 min 灭菌, 有机酸和氨基酸溶液用过滤法除菌, 分别将有机酸、氨基酸和荚膜多糖溶液及它们的水解液加入三角瓶中, 每瓶 50 ml, 另设加等体积 0.01 $\text{mol}\ \text{L}^{-1}$ HCl 和 HNO_3 两组无机酸, 具体安排见表 2, 30℃ 振荡 ($180\ \text{r}\ \text{min}^{-1}$) 10 天后测滤液中的钾和硅, 剩下的残渣用去离子水洗, 阴干, 用于扫描电镜分析。

1.3.5 分析项目 滤液用原子吸收分光光度法测钾, 发酵液中二氧化硅的测定采用硅钼蓝比色法, 三氧化二铝的测定采用铝试剂比色法。

1.3.6 钾长石扫描电镜观察 取不同处理的钾长石残渣, 用去离子水洗涤, 阴干, 扫描电镜(日立 S-450, 工作电压 20kV) 观察钾长石表面特征, 拍照。

2 结果与分析

2.1 NBT 菌株发酵液对钾长石的溶解作用

培养 48 h 的硅酸盐细菌 NBT 菌株发酵液能活化钾长石中的钾、硅、铝(表 1)。除菌发

酵液、灭菌发酵液和灭菌培养基与钾长石混合振荡 10 d 后的滤液中钾含量分别达 178.8、89.3 和 11.5 mg L⁻¹。方差分析表明, 活化钾长石中钾的能力, 除菌发酵液、灭菌发酵液和灭菌培养基之间的差异达极显著水平 ($F = 4792.5 > F_{0.01} = 10.92$)。说明 NBT 菌株发酵液对钾长石具有溶解作用。除菌发酵液比灭菌发酵液与钾长石混合振荡后的滤液中钾含量增加 99.3%, 说明 NBT 菌株发酵液中除了一些理化因素外, 还有一些在高温下易被破坏的代谢物参与溶解作用。另外, 含菌发酵液、添加蔗糖含菌发酵液与除菌发酵液活化钾长石中的钾、硅、铝的能力相当, 但添加蔗糖的含菌发酵液活化钾长石的能力略强。说明在振荡过程中 NBT 菌株细胞的代谢活动可在一定程度上提高溶钾能力。从表 1 还可发现, 除菌发酵液的解钾能力是灭菌发酵液的 2 倍。因此, 对两者进行生化分析或组分分析, 将有可能更深入地揭示 NBT 菌株的解钾机理。

表 1 NBT 菌株发酵液对钾长石的分解作用

Table 1 Destruction of feldspar by fermented broth of the strain NBT

处理 Treatment	各种元素含量 Contents of elements (mg L ⁻¹)			pH	F 值 F value
	K	SiO ₂	Al ₂ O ₃		
灭菌培养基 (CK1)	11.5	9.4	0.9	7.10	
灭菌发酵液 (CK2)	89.3	24.4	5.4	6.84	4792.5* *
除菌发酵液	178.8	31.9	9.2	6.15	
含菌发酵液	180.2	34.2	9.6	6.05	
含菌发酵液+ 10% 蔗糖 5 ml	181.6	37.5	10.1	5.75	1.61
含菌发酵液+ 10% 蔗糖 10 ml	184.1	39.8	12.6	5.60	

2.2 NBT 菌株代谢产物对钾长石的溶解作用

2.2.1 有机酸对钾长石的溶解作用 发酵液中检出的 4 种有机酸对钾长石的溶解试验结果表明 (图 1), 4 种有机酸对钾长石均有不同程度的溶解作用, 且在 50~ 250 mg L⁻¹ 浓度范围内溶解钾长石的效果 (以溶液中钾、硅含量为指标) 表现为随有机酸浓度增加而提高的趋势 (草酸、柠檬酸), 各种有机酸对钾长石中钾的溶解作用分别为酒石酸 > 草酸 > 苹果酸 > 柠檬酸; 对钾长石中硅的溶解作用分别为草酸 > 柠檬酸 > 酒石酸 > 苹果酸; 用 30% H₂O₂ 破坏上述有机酸, 结果发现它们溶解钾长石的能力大大降低。说明上述有机酸能溶解钾长石, 使其中的钾、硅等元素释放出来, 而且这种作用与其特有的结构, 如一COOH 有关。

为了研究有机酸溶解钾长石的机制, 按照检测到的 4 种有机酸的含量范围 (50~ 250 mg L⁻¹), 分别配制浓度为 200 mg L⁻¹ 的草酸、酒石酸、柠檬酸、苹果酸溶液。每种有机酸溶液的 pH 值分别调到 2.5 和 7.0, 同时分别配制 pH 值为 2.5 的乙二胺四乙酸二钠溶液 (浓度为 200 mg L⁻¹) 和蒸馏水作为对照。将 1.5 g 钾长石粉 (100 目) 分别加入 50 ml 上述浓度的有机酸溶液和乙二胺四乙酸二钠溶液及蒸馏水中, 28 °C 振荡作用 10 天后, 过滤, 取滤液测其中的钾、硅、铝含量。由表 2 可以看出, 在酸性条件下 (pH 2.5) 有机酸溶解钾长石的作用大于在中性条件下 (pH 值 7.0) 有机酸对钾长石的溶解。说明, 有机酸溶解钾长石

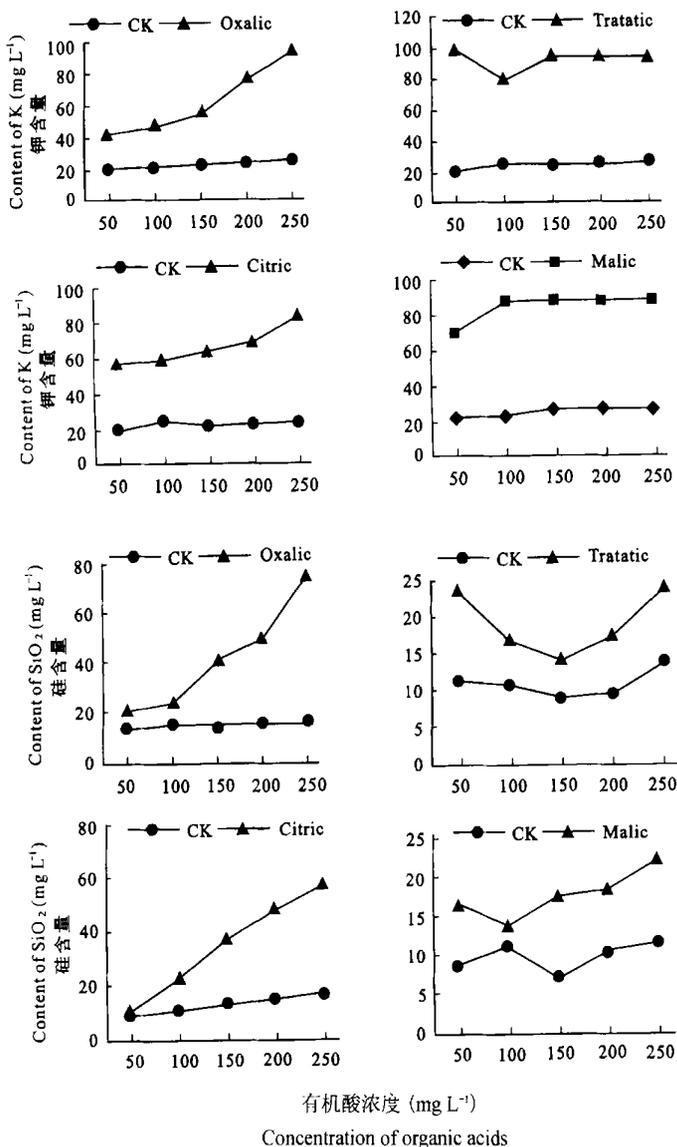


图1 有机酸对钾长石的溶解

Fig. 1 Dissolution of feldspar by organic acids

的作用既有酸溶作用,又包含有机酸的络合作用,而且络合作用也起重要作用,因为在有机酸结构受到破坏时,它们溶解钾长石的能力就减弱。由于EDTA具有很强的络合Si、Al等金属离子的能力,从而增加了这些离子的溶解性。

2.2.2 氨基酸对钾长石的溶解 氨基酸含有-COOH和-NH₂,这些基团具有络合金属离子的作用。本试验发现,氨基酸对钾长石有一定的溶解作用(表3)。28℃作用10天,溶液中钾、硅含量比CK分别增加12倍和4倍,当氨基酸结构受到破坏时,其溶解钾长石的能力大大减少。

表 2 有机酸对钾长石的溶解

Table 2 Dissolution of feldspar by organic acids

有机酸 Organic acids	溶解后溶液中元素含量 Content of elements(mg L ⁻¹)		
	K	SiO ₂	Al ₂ O ₃
草酸(pH2.5)	76.7	50.5	18.4
草酸(pH7.0)	49.8	36.7	16.4
柠檬酸(pH2.5)	68.8	48.6	16.4
柠檬酸(pH7.0)	41.4	31.9	11.1
酒石酸(pH2.5)	66.2	18.9	14.2
酒石酸(pH7.0)	29.4	11.5	10.2
苹果酸(pH2.5)	56.7	18.7	13.7
苹果酸(pH7.0)	24.7	12.6	11.4
乙二胺四乙酸二钠(pH2.5)	94.5	64.4	24.3
蒸馏水(pH2.5)	48.6	11.2	7.6

表 3 氨基酸对钾长石的溶解能力

Table 3 Dissolution of feldspar by amino acids

处理 Treatment	溶液中的钾 K in solution (mg L ⁻¹)	溶液中的二氧化硅 SiO ₂ in solution (mg L ⁻¹)
钾长石+ 蒸馏水	5.4	6.7
钾长石+ 混合氨基酸	84.9	18.7
钾长石+ 混合氨基酸+ H ₂ O ₂	24.2	10.7

2.2.3 荚膜多糖对钾长石的溶解作用 准备 250 ml 三角瓶,加 1.5 g 钾长石和 50 ml 蒸馏水,灭菌(121 °C, 30 min)。分别将一定量的荚膜多糖(干燥荚膜多糖,紫外线杀菌 1h)加入 250 ml 三角瓶中,分别配制成浓度为 0.2%, 0.4%, 0.6%, 0.8% 和 1.0% 的荚膜多糖溶液。每个浓度三个重复,28 °C 振荡作用 10 天后测溶液中的钾、硅浓度。可以看出(表 4),NBT 菌株产生的荚膜多糖对钾长石有一定的破坏作用,随着荚膜多糖含量的增加,溶液中的钾、硅含量明显增加。用 30% H₂O₂ 降解多糖,结果溶解钾长石中钾、硅的能力减小。从荚膜多糖红外光谱图(图 2)可以看出,荚膜多糖除了有一些基本的多糖结构外,在 1551.0 cm⁻¹处有一—COO⁻吸收峰,荚膜多糖分子结构中含有具络合作用的官能团。这些官能团能与 Al、Si 等金属离子络合^[10],从而使溶液中的 K、Si 含量增加。

表 4 硅酸盐细菌 NBT 菌株荚膜多糖对钾长石中钾、硅活化作用

Table 4 Activation of potassium and silicon from feldspar by the capsular polysaccharide

处理 Treatment	溶液中的钾 K in solution(mg L^{-1})	溶液中的硅 Silicon in solution ($\text{SiO}_2 \text{ mg L}^{-1}$)	比对照增加的钾 Increased by(%)
钾长石+ 蒸馏水	5.4	6.7	—
荚膜多糖+ 蒸馏水	3.6	2.8	—
钾长石+ 荚膜多糖(0.2%)	11.2	10.8	24.4
钾长石+ 荚膜多糖(0.4%)	12.4	11.4	37.8
钾长石+ 荚膜多糖(0.6%)	15.6	14.4	73.3
钾长石+ 荚膜多糖(0.8%)	16.4	15.6	82.2
钾长石+ 荚膜多糖(1.0%)	21.5	18.7	138.8
钾长石+ 荚膜多糖+ H_2O_2	10.2	10.3	13.3

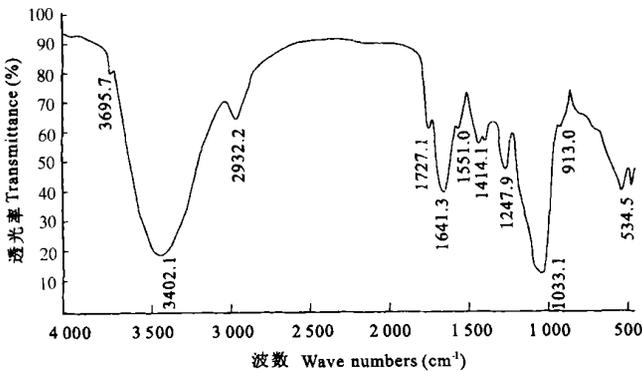


图 2 NBT 菌株荚膜多糖红外光谱图

Fig. 2 IR spectra of capsular polysaccharide

2.2.4 有机酸、氨基酸、荚膜多糖协同作用 有机酸、氨基酸、荚膜多糖在活化钾长石中钾、硅的能力上有明显的协同作用(图 3)。单独的荚膜多糖、有机酸和氨基酸能够溶解钾长石,使溶液中钾的含量分别达 19.7 mg L^{-1} 、 110.8 mg L^{-1} 和 84.9 mg L^{-1} ,溶液中硅的含量分别达 13.8 mg L^{-1} 、 64.4 mg L^{-1} 和 58.7 mg L^{-1} ,它们之间溶解钾长石的能力为:有机酸>氨基酸>荚膜多糖;荚膜多糖与氨基酸的混合物作用于钾长石,使溶液中的钾、硅含量分别达 94.4 mg L^{-1} 和 59.1 mg L^{-1} ,溶解钾的能力分别比荚膜多糖和氨基酸增加 379.2%和 11.2%,荚膜多糖与有机酸的混合物溶解钾的能力分别比荚膜多糖和有机酸溶解钾能力增加 620.8%和 28.2%,氨基酸与有机酸的混合物溶解钾能力比有机酸增加 51.2%,而氨基酸、荚膜多糖和有机酸三者的混合物,溶解钾长石的能力大大增加,溶液中钾、硅含量分别为 349.4 mg L^{-1} 和 86.1 mg L^{-1} ,分别比有机酸溶解钾长石的能力增加 215.3%和 33.7%。另外,菌株的代谢产物活化钾长石中的钾、硅的能力与其一定结构有关,用 H_2O_2

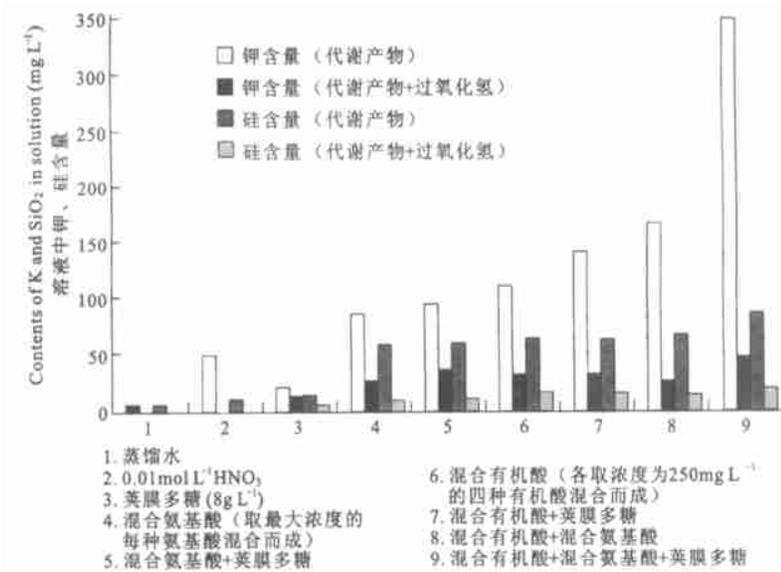


图3 不同化合物对钾长石的溶解作用

Fig. 3 Dissolution of feldspar by different compounds

破坏代谢物的结构, 它们活化钾长石的能力大大减小, 同时菌株 NBT 的代谢物对钾长石的活化主要是通过具有络合基团的有机物的络合作用, 因为 $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{HCl}$ 和 $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{HNO}_3$ (pH 均低于荚膜多糖、氨基酸和有机酸的混合物) 溶解钾长石后, 溶液中的钾、硅含量分别为 44.6 mg L^{-1} 、 36.4 mg L^{-1} 和 49.8 mg L^{-1} 、 43.8 mg L^{-1} , 远低于上述混合物作用于钾长石后溶液中钾、硅含量。扫描电镜照片也可看出(图4), 菌株 NBT 的代谢产物破坏钾长石的晶格结构的能力大于 $0.01 \text{ mol L}^{-1} \text{HNO}_3$ 对钾长石晶格结构的破坏, 而用 H_2O_2 分解 NBT 菌株代谢产物后, 其破坏钾长石晶格的能力下降。

3 讨论

硅酸盐细菌能释放由硅酸盐组成的岩石矿物中的磷、钾、硅等元素, 直接供给植物生长利用, 同时亦具有固氮功能^[13]。这为挖掘土壤潜在肥力, 发展可持续农业提供了诱人的前景。硅酸盐细菌 NBT 菌株在以钾长石为惟一钾源的培养基中能形成丰厚的大荚膜, 同时 NBT 菌株能合成并分泌草酸、柠檬酸、酒石酸以及多种氨基酸到发酵液中, 这些细胞代谢物分子均含有具络合作用的官能团, 它们能与矿物中的硅、铝等离子发生络合作用, 使矿物分解并释放出钾、硅。陈廷伟、陈华葵等^[7]的研究表明菌体与矿石紧密接触是硅酸盐细菌分解磷钾矿石的必要条件, 硅酸盐细菌的荚膜多糖紧紧包绕着矿物, NBT 菌株合成并分泌的草酸、柠檬酸、酒石酸以及多种氨基酸等在矿石表面的浓度很高, 从而大大加强了硅酸盐细菌对矿物的分解能力, 这一点为本试验结果所证实。有机酸、氨基酸和荚膜多糖的混合物分解钾长石的能力明显高于这几种化合物单独分解钾长石的能力。在酸性条件下 (pH 2.5) 有机酸溶解钾长石的作用大于在中性条件下 (pH 值 7.0) 有机酸对钾长石的

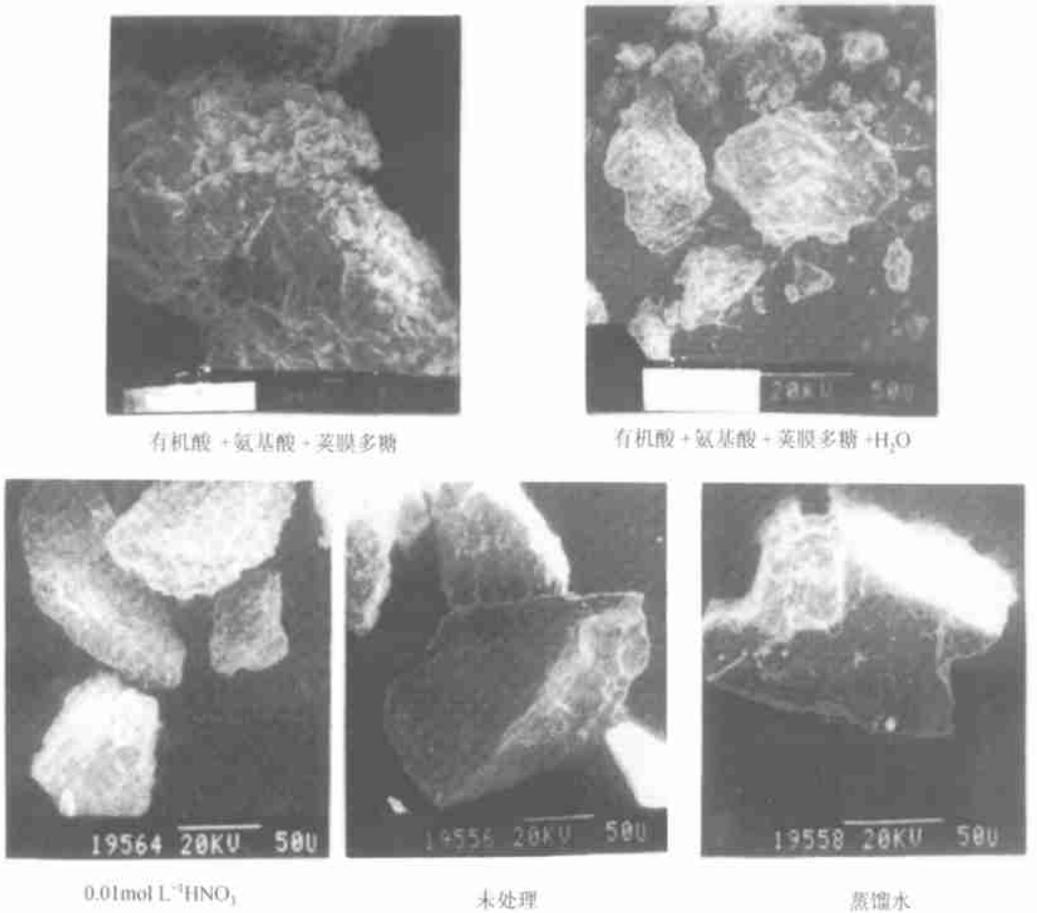


图 4 不同化合物处理的钾长石扫描电镜照片

Fig. 4 Scanning electronic photograph of feldspar treated by different compounds

溶解。说明,有机酸溶解钾长石的作用既有酸溶作用,又包含有机酸的络合作用,而且络合作用也起重要作用,因为在有机酸结构受到破坏时,它们溶解钾长石的能力就减弱。荚膜多糖能通过提供质子和与溶液中的离子形成复合物来提高分解矿物的能力^[14]。可以认为,硅酸盐细菌NBT菌株分解钾长石的作用是其产生的代谢产物共同作用的结果。随着分子生物学技术的不断发展,可望在基因水平上更深入地阐明硅酸盐细菌解钾机理,更好地利用硅酸盐细菌促进作物生长、提高作物产量、改善作物品质和环境条件等方面的作用。

参 考 文 献

1. 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. 西北农业大学学报,1999, 2: 33~ 37
2. 李元芳. 硅酸盐细菌肥料的特性和作用. 土壤肥料, 1994, 4: 48~ 49
3. Monib M, Zahra M K, Abdel et Al S I. Role of silicate bacteria in releasing K and Si from biblite and orthoclase. Soil Biology and Conservation of the Biosphere, 1984, 2: 733~ 743

4. 马麟祥, 叶维青. 硅酸盐细菌的研究初步结果. 微生物, 1960, 4: 176~ 179
5. 盛下放, 黄为一, 殷永娴. 硅酸盐菌剂的应用效果及其解钾作用的初步研究. 南京农业大学学报, 2000, 1: 43~ 46
6. M. 亚历山大. 土壤微生物学导论. 北京: 科学出版社, 1983. 236~ 238
7. 陈廷伟, 陈华葵. 钾细菌的形态生理及其对磷钾矿物的分解能力. 微生物, 1960, 2: 104~ 112
8. Friedrich S, Platonova N P, Karavaiko G I. Chemical and microbiological solubilization of silicates. Acta Biotechnologica, 1991, 3: 187~ 196
9. 周惠民. 苏打盐渍土中有机酸的提取方法. 土壤学报, 1965(3): 325~ 328
10. 杨钟琪. 3型肺炎球菌多糖的物理化学和免疫化学特性. 国外医学(生物制品分册), 1982, 5(6): 261
11. 阮国瑞, 范子文, 张雪萍. 艰难梭菌荚膜多糖的提纯和分析. 中国微生物学杂志, 1993, (4): 48~ 50
12. 中国科学院南京土壤研究所编. 土壤理化分析. 北京: 科学出版社, 1985
13. 贺积强, 李登煜, 张小平, 等. 硅酸盐细菌的研究进展. 西南农业学报, 1999, 12: 102~ 108
14. Welch S A, Barker W W, Banfield J F. Microbial extracellular polysaccharides and plagioclase dissolution. Geochimica et Cosmochimica Acta, 1999, 63(9): 1405~ 1419

MECHANISM OF POTASSIUM RELEASE FROM FELDSPAR AFFECTED BY THE STRAIN NBT OF SILICATE BACTERIUM

Sheng Xirfang Huang Weiyi

(College of Resources and Environmental Sciences, Nanjing Agric. Univ., Nanjing 210095)

Summary

The study on dissolution of potassium from feldspar powder by fermented broth and the metabolites of the strain NBT was carried out in shake flask. The results showed that K, Si, Al from feldspar was activated by fermented broth cultured for 48 hours. The contents of K, SiO₂, and Al₂O₃ in the fermented broth were 184.1, 39.8 and 12.6 mg L⁻¹ respectively after shaking with feldspar in it at 28 °C for 10 days and were 106.1%, 63.1% and 133.3% respectively over that the control of sterilized fermented broth; In addition, a lot of organic, ammonia acids and capsular polysaccharide were detected in the fermented broth. The shake flask study showed that the metabolites had the potential of dissolving the feldspar and the contents of K in the solution were 110.8 mg L⁻¹ for organic acids, 84.9 mg L⁻¹ for ammonia acids and 19.7 mg L⁻¹ for capsular polysaccharide. The effect of K release was increased by 62.2% by the mixed metabolites. The dissolution of feldspar was through the acid-dissolution action and chelation of the metabolites.

Key words Silicate bacterium, Mechanism of potassium release, Feldspar, Metabolites