

黑曲霉-矿物聚集体的形成及其分泌的多糖特性

胡婕¹, 连宾^{2*}, 郁建平¹, 胡星¹

¹贵州大学生命科学学院, 贵阳 550025

²中国科学院地球化学研究所, 环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550002

摘要:【目的】为深入理解黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 对含钾矿粉的风化作用, 研究在旋转发酵方式下形成的黑曲霉-矿物聚集体及其多糖, 并分析它们在含钾矿粉风化过程中的作用。【方法】采用不同组合培养基, 研究黑曲霉-矿物聚集体的形成和形貌; 联合紫外-可见分光光谱 (UV-Vis)、傅立叶变换红外光谱 (FT-IR)、气相色谱 (GC)、电子扫描显微镜 (SEM)、X 射线能谱仪 (EDS) 等分析手段研究黑曲霉-矿物聚集体形成前后微环境中多糖的变化以及这种改变对风化产生的意义。【结果】黑曲霉菌丝与矿粉在多糖等代谢产物帮助下, 通过相互缠绕、吸附、粘合等作用形成黑曲霉-矿物聚集体, 聚集体形成前后多糖浓度和多糖结构均发生显著改变。【结论】含钾矿粉诱导黑曲霉多糖结构发生明显变化并且浓度增大, 这种改变可促进多糖对矿物颗粒的吸附, 有助于螯合金属离子和吸附水分子, 从而为真菌有效利用矿物营养提供有利的微环境。

关键词: 聚集体, 多糖, 黑曲霉, 风化作用, 微环境, 含钾矿粉

中图分类号: Q935 **文献标识码:** A **文章编号:** 0001-6209 (2011)06-0756-08

微生物风化矿物岩石获得各种所需矿质元素导致元素的迁移和转化是自然界生物地球化学循环的重要组成部分^[1-4]。微生物和矿物相互作用所引起的微环境中的物质变化是研究微生物风化矿物机理的一个突破口^[5-10], 其中的高聚物多糖是微生物在生长代谢过程中产生的由 10 个以上单糖聚合而成的线性或分支的高分子碳水化合物, 研究微生物多糖在矿物诱导下的变化有助于弄清微生物和矿物相互作用引起的微环境差异^[11-12]。钾长石矿物在地壳中具有较高的丰度, 含有丰富的钾、铝、硅等矿质元素, 因而已有许多对钾长石的风化研究^[13-15], 然而相对物理、化学风化机理而言, 对生物风化钾长石的作用过程与机理的解释仍有很多争议, 还有许多细节有待进一步探讨。黑曲霉 (*Aspergillus niger*) 已

被证实是很好的浸矿菌种, 对磷矿石^[16]、蛇纹石^[17]等都有很强的风化作用。本文主要研究了黑曲霉与含钾矿粉颗粒形成的真菌-矿物聚集体微环境中的多糖在黑曲霉风化含钾矿粉过程中起到的作用, 以为实验条件下真菌风化含钾矿物的作用机理提供一些实验数据和研究线索。

1 材料和方法

1.1 材料

1.1.1 菌种: 黑曲霉由中国科学院地球化学研究所环境生物科学与技术研究中心提供。生长温度为 28℃ - 30℃, 培养基为查氏培养基, 菌落呈褐黑色, 丝绒状。

基金项目: 国家“863 计划” (2008AA06Z108); 国家自然科学基金委创优群体项目 (41021062); 中国科学院“百人计划”项目

* 通信作者。Tel/Fax: +86-851-5895148; E-mail: bin2368@vip.163.com

作者简介: 胡婕 (1985 -), 女 (壮族), 云南人, 硕士研究生, 研究方向为应用生物化学与生化分离工程。E-mail: jiehu00@163.com

收稿日期: 2010-12-02; **修回日期:** 2011-01-21

1.1.2 岩石样品:含钾矿粉取自贵州省福泉市道平, XRD 分析其矿物组成分别为: 钾长石(75.52%)、云母(9.25%)、白云石(7.15%)、蒙脱石(4.10%)、高岭石(3.46%)、角闪石(0.52%); X-射线荧光分析其化学组成为: K_2O (9.67%)、 Al_2O_3 (18.06%)、 SiO_2 (57.75%)、 Fe_2O_3 (5.3%)、 CaO (0.21%)、 MgO (3.21%)、 Na_2O (0.14%)、失水率(4.98%)。粉碎并过 200 目筛。

1.2 黑曲霉-矿物聚集体的形成

参照查氏培养基^[18], 去除其中的含钾成分, 作为基础培养基, 成分为: $(NH_4)_2SO_4$, Na_2HPO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, 蔗糖, 纯水。取活化的黑曲霉菌种于超净工作台接入基础培养基, 28℃, 120 r/min 振荡培养 1 d 后形成直径 1 mm 左右的小菌丝球, 以此作为后续实验的接种物。

对照组 1: 基础培养基; 实验组 1: 基础培养基中加入 2 g 钾矿粉; 对照组 2: 基础培养基中加入 0.24 g KCl; 实验组 2: 基础培养基中加入 0.24 g KCl 和 2 g 钾矿粉。分别在 500 mL 三角瓶中加入以上 4 组培养液 200 mL, 121℃ 灭菌后, 于超净工作台各接入菌丝球 20 个。以上 4 组处理均设置 3 个重复, 置恒温振荡器(28℃, 120 r/min)继续培养 5 d。

1.3 黑曲霉-矿物聚集体的形貌观察及能谱分析

将培养所得菌丝球用小勺取出适量。一部分冲洗球体表面后, 用干净的镊子和玻棒挑开, 观察。剩余的菌丝球干燥后粘于样品台的导电胶上, SEM (JEOL-JSM6460) 下进行微观形貌观察, 并进行能谱微区成分分析(配 EDAX Genesis 图像分析软件)。

1.4 黑曲霉-矿物聚集微环境与外环境的多糖浓度

分别取 4 个组发酵液用以提取聚集体/菌丝球外部环境的多糖; 同时, 收集各组菌丝球, 压碎后于 JY88(96)-II N 型超声波破碎机中, 间隔工作 2 h (超声功率 200 w) 后, 用冷冻高速离心机 7155 × g 离心 20 min, 过滤取压出液用以提取聚集体/菌丝球微环境(内部环境和表面环境)的多糖。精密称取无水葡萄糖制做标准曲线^[19]后, 另取 8 支试管, 分别加入 4 个组发酵液和固体压出液 1 mL, 用蒸馏水补体积至 2 mL, 再加入 5% 苯酚溶液 1 mL, 摇匀后迅速加入浓硫酸 5 mL, 置 45℃ 水浴锅中保温 20 min, 冷却后, 使用 TU-1901 双光束紫外可见分光光度计(配 UVWin5.1.1 紫外软件)于 490 nm 波长

处测定吸光度。

1.5 黑曲霉-矿物聚集微环境中多糖的提取

把 4 个组压出液(聚集体/菌丝球微环境)用真空旋转蒸发仪浓缩, 交替加入 Sevag 试剂 1(氯仿: 正丁醇 = 5:1) 和 Sevag 试剂 2(氯仿: 正丁醇 = 3:1) 各 3 次除去蛋白质后, 加入 3 倍体积预冷 95% 乙醇, 放入冰箱静置 24 h, 过滤取沉淀, 再用丙酮、乙醚、无水乙醇洗涤数次后, 60℃ 烘干得多糖, 干燥器中保存, 并进行全波长扫描及 α-萘酚显色检测有无蛋白质、核酸和糖类^[20]。

1.6 黑曲霉-矿物聚集微环境中多糖的单糖组分

把 4 个组提取的多糖(见 1.5) 酸水解后衍生化, 使用岛津 GC-2014(配置氢火焰离子检测器) 检测单糖组分, 单糖标品有 L-鼠李糖、D-岩藻糖、L-阿拉伯糖、D-木糖、D-甘露糖、D-葡萄糖、D-半乳糖, 内标为肌醇。检测条件: 温度为 25℃, 相对湿度为 70%。

1.7 黑曲霉-矿物聚集微环境中多糖的化学结构

把 4 个组提取的多糖(见 1.5) 研碎与 KBr 干燥粉末混合后于压片机下制成圆形的薄片, 在 4000 - 500 cm^{-1} 区域内进行红外光谱扫描(BRUKER-TENSOR27 型傅立叶变换红外光谱仪)。检测条件: 温度为 28℃, 相对湿度为 70%。

2 结果和分析

2.1 黑曲霉-矿物聚集体的形成

以黑曲霉、钾长石作为研究材料, 确定 4 组不同组合的培养基, 4 个组均得到黑曲霉菌丝球。实验组 1 和 2 中, 黑曲霉与钾矿粉相互作用后, 矿物颗粒逐渐在菌丝表面聚集, 在作用 5 d 后, 随着菌丝和其代谢产物逐渐增多, 矿物颗粒大部分被黑曲霉菌丝吸附、包裹, 形成真菌-矿物聚集体^[15,21]。

2.2 黑曲霉-矿物聚集体的形貌观察及能谱分析

观察黑曲霉菌丝球和黑曲霉-矿物聚集体的形态, 结果见图 1。比较图 A_1 和 B_1 , 可以看到在脱离培养液环境后, 单一的黑曲霉会因细胞的渗透作用散失部分水分, 呈椭圆状, 而黑曲霉-矿物聚集体形态仍然保持圆润饱满。可见, 由黑曲霉与矿物颗粒组合而成的聚集体在脱离水环境后的持水能力优于普通菌丝球。图 B_1 、 B_2 菌丝球表面、内壁均呈乳白色, 可以看到聚集体剖开图 A_2 , 大量的矿粉(呈灰黑色)被菌丝体包裹在内部, 且以“贴内壁”的状态吸

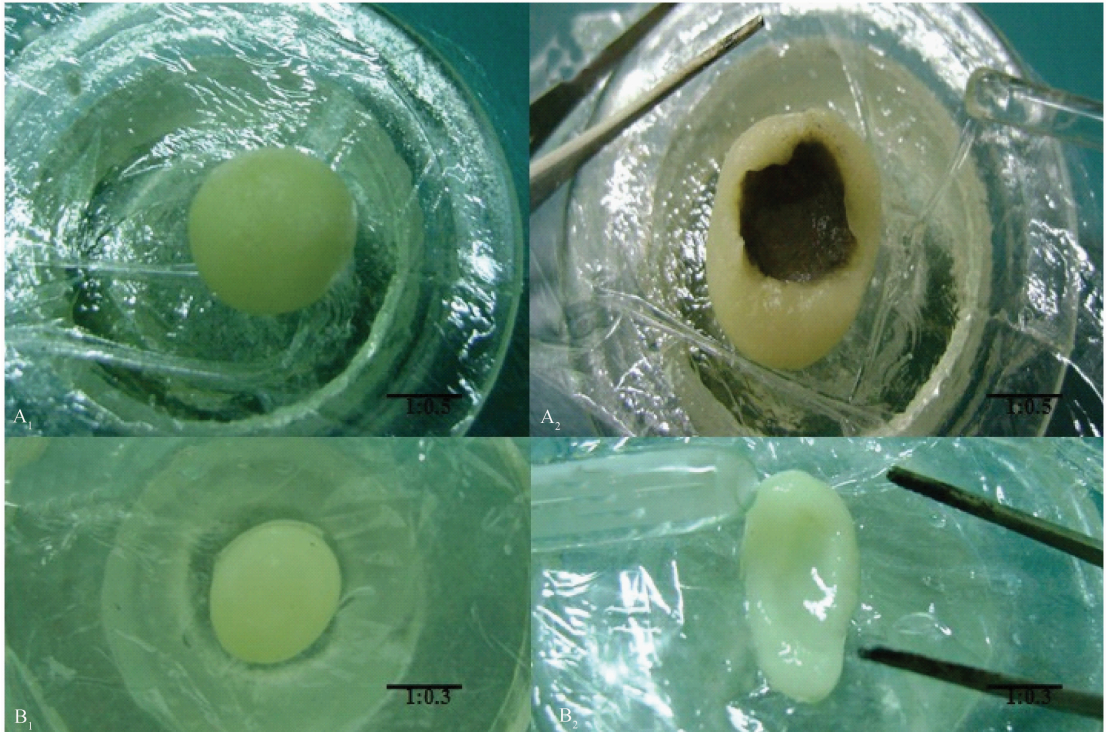


图1 黑曲霉菌丝球以及黑曲霉-矿物聚集体形态图

Fig. 1 The graphs of *A. niger* and *A. niger* - mineral aggregation. A₁: the surface of aggregation of the experimental group; A₂: the interior of aggregation of the experimental group; B₁: the surface of mycelia pellet of the control group; B₂: the interior of mycelia pellet of the control group.

附其上,聚集体表面也因此呈灰白色(图 A₁),此时形成的球体不再是单一的菌丝球,而是菌丝与矿粉在多糖等代谢物质帮助下,通过相互缠连、吸附、粘合作用形成的聚集体^[15,21],用去离子水数次冲洗聚集体内部,洗液中可以看到风化作用后的残余矿粉。

将黑曲霉菌丝球和黑曲霉-矿物聚集体置于SEM(150倍)下进行微观形貌观察,并进行能谱分析,结果见图2。如图2所示,A₁、B₁对应的能谱图分别为A₂、B₂。从SEM形态可以直观地看到,对照组(图 B₁)仅仅是黑曲霉菌丝及其分泌物的形貌图,而实验组(图 A₁)为黑曲霉及其分泌物包裹了矿粉的形貌图。结合能谱图可见,实验组不仅检测到构成有机物的碳、氧、磷、硫元素,还检测有大量的构成钾矿粉的钾、硅、铝、钙、铁元素,而对照组中几乎检测不到上述矿质元素,表明实验组形成的是由矿粉颗粒和有机质共同构成的聚集体。

2.3 黑曲霉-矿物聚集体微环境与外环境的多糖浓度

由UVWin5.1.1紫外软件处理得校正后的标准曲线,公式: $Abs = 0.03874 * (C) + 0.00143$, $R^2 =$

0.9997。根据标准曲线得到黑曲霉菌丝球和黑曲霉-矿物聚集体微环境与外环境的多糖浓度,见图3。

实验组1结果表明,当蔗糖为唯一碳源、 $(NH_4)_2SO_4$ 为唯一氮源、钾长石为唯一钾源时,黑曲霉-矿物聚集体微环境多糖浓度为19.4192 mg/mL、外部环境多糖浓度为7.9013 mg/mL,平均多糖浓度为13.6603 mg/mL。

比较实验组1与对照组1平均多糖浓度可看出,与钾长石作用后,黑曲霉产多糖浓度是对照的1.6倍;比较实验组2与对照组2,与钾长石作用后,黑曲霉平均多糖浓度是对照的1.4倍;比较实验组1与对照组2平均多糖浓度,用钾矿粉代替可溶性钾离子作为钾源后,黑曲霉产多糖浓度是后者的1.4倍。因此,加入矿粉能够促进菌株产更多的多糖,并且钾矿粉作为唯一钾源的产多糖浓度大于只加可溶性钾离子的产多糖浓度。推测其原因有两方面,首先,缺钾环境下,含钾矿物的存在会促使菌株对其主动攻击,更积极地从矿粉中获取自身生存养料;其次,菌株在浸矿过程中不

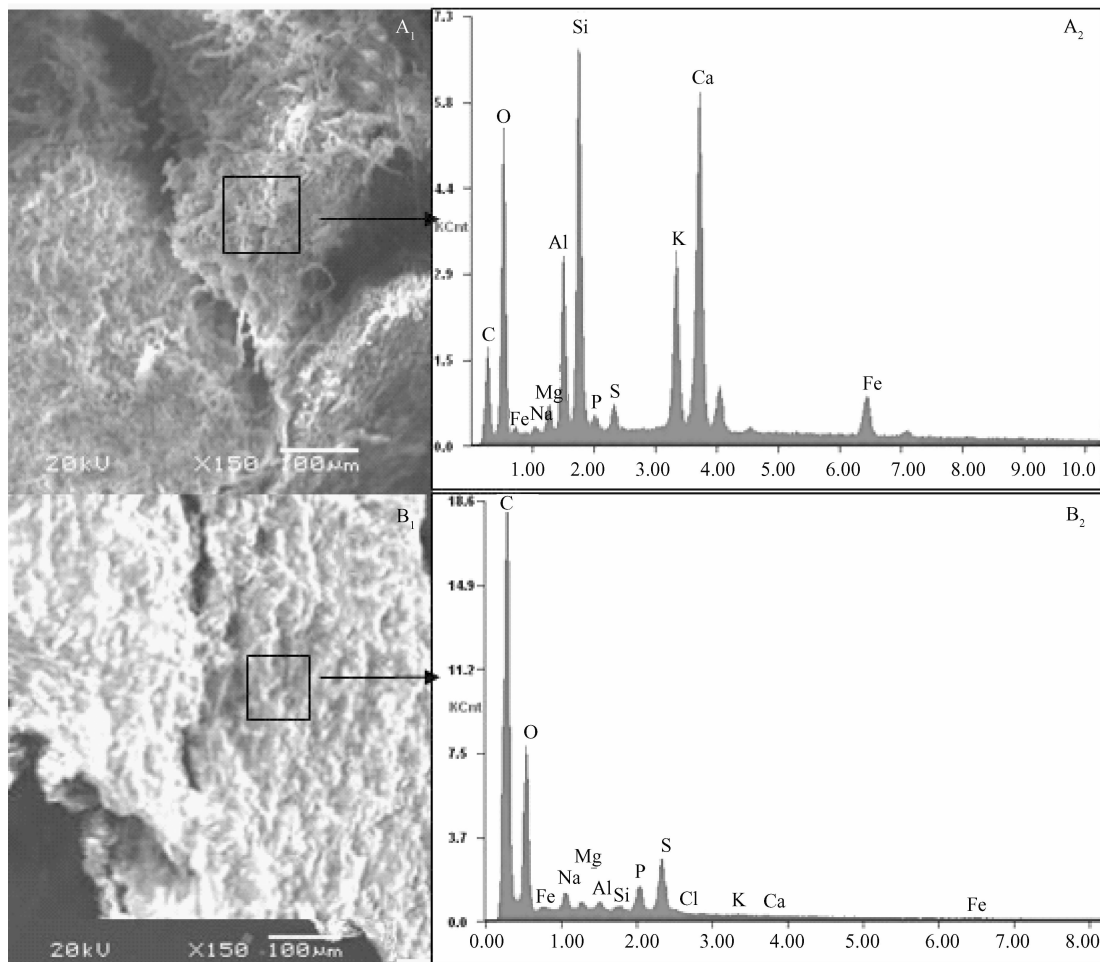


图 2 黑曲霉菌丝球以及黑曲霉-矿物聚集体 SEM 图和 EDS 图

Fig. 2 The SEM and EDS graphs of *A. niger* and *A. niger* - mineral aggregation. A₁ and A₂: *A. niger*-mineral aggregation of the experimental group; B₁ and B₂: *A. niger* of the control group.

仅可获得钾素养料, 还可以获取钙、铝、硅等其它矿物养料。

观察实验组 1, 聚集体微环境多糖浓度是外部环境的 2.5 倍, 同样地, 实验组 2 聚集体微环境多糖浓度也是外部环境的 2.3 倍, 而对照组 1 和对照组 2 中菌丝球微环境与外部发酵液的多糖浓度并没有表现出明显变化。笔者推测, 实验组是由于钾矿的作用, 诱导聚集体微环境内多糖浓度急剧增大, 而多糖含有的羟基基团不仅能以氢键的形式结合水分子, 还可以吸附、螯合矿物阳离子 (见 2.6), 因此多糖局部浓度的提高, 不仅能增强聚集体的持水能力^[22-24], 而且通过吸附和螯合作用可以更集中有效地作用于含钾矿物, 从而有助于微环境对含钾矿物的风化^[15]。

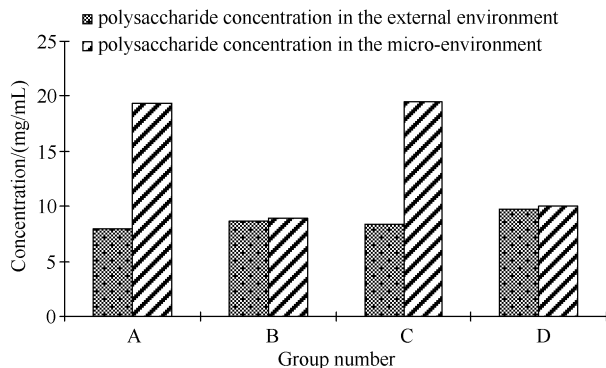


图 3 黑曲霉以及黑曲霉-矿物聚集体微环境与外环境多糖浓度的比较

Fig. 3 the comparison of polysaccharide concentration in the micro-environment and external environment of *A. niger* and *A. niger*- mineral aggregation. A: the experimental group 1; B: the control group 1; C: the experimental group 2; D: the control group 2.

2.4 黑曲霉-矿物聚集体微环境中多糖的提取

对提取样品进行 α -萘酚实验,在样品与浓硫酸分界面显示出清晰的紫环,说明提取样品确实是糖

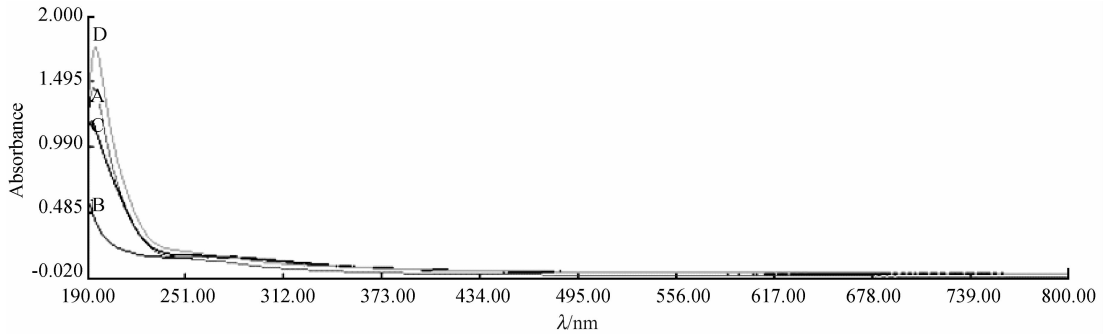


图4 黑曲霉以及黑曲霉-矿物聚集体多糖的光谱扫描

Fig. 4 Spectral Scanning of extracted polysaccharides from *A. niger* and *A. niger*- mineral aggregation. A: the experimental group 1; B: the control group 1; C: the control group 2; D: the experimental group 2.

2.5 黑曲霉-矿物聚集体微环境中多糖的单糖组分

对标准单糖衍生物和4个组多糖水解衍生物进行GC分析,结果见图5和图6。

对照标准单糖谱图5可以看出,图6无论是实验组还是对照组,多糖组分均含有L-鼠李糖、L-阿拉伯糖、D-葡萄糖和D-半乳糖。比较图6-B、C(未加钾矿粉的对照组)可以看出,图6-A、D(加钾矿粉的实验组)在靠近标准甘露糖(保留时间为14.046 min,见图5),保留时间接近13 min处(见图6-A、D)都有一个非常明显的峰,且该组分含量明显高于其它组分,而对照组图谱上根本检测不到该峰。笔者推测,该峰可能是甘露糖或其它单糖成分,由于与矿钾粉的相互作用,有机配位体改变了某些基团,使

类物质。全波长扫描结果(图4)显示,在260 nm和280 nm处无核酸和蛋白质的特征吸收峰,唯一的吸收峰出现在194 nm处,证明多糖较纯。

该成分保留时间偏离一般的标准单糖样品。可以肯定的是,该峰是因为钾矿粉的存在而产生的,作为构成多糖的基本单元,它的产生必然导致多糖结构的改变,这种变化对我们探究矿物风化机理有重要意义。由于本实验只选用了7种标准单糖,其余可能存在的组份差异还有待于进一步研究。

实验组1结果表明,当蔗糖为唯一碳源、 $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ 为唯一氮源、钾长石为唯一钾源时,黑曲霉-矿物聚集体微环境中的多糖主要是由L-鼠李糖、L-阿拉伯糖、D-葡萄糖、D-半乳糖和一种未知单糖通过复杂的交联方式聚合而成的杂多糖,其中该未知单糖含量最高,其余4种单糖相对含量比例为鼠李糖:阿拉伯糖:葡萄糖:半乳糖=0.26:0.58:1.00:0.35。

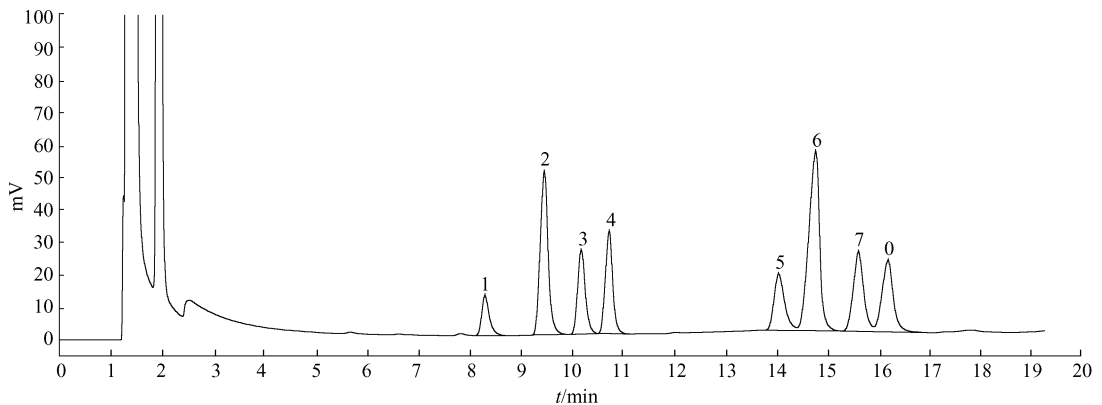


图5 黑曲霉以及黑曲霉-矿物聚集体多糖的标准单糖的气相色谱图

Fig. 5 Chromatogram of monosaccharide standards of polysaccharides from *A. niger* and *A. niger*- mineral aggregation. 0: inositol 16.166 min; 1: L-rhamnose 8.312 min; 2: D-fucose 9.472 min; 3: L-arabinose 10.192 min; 4: D-xylose 10.741 min; 5: D-mannose 14.046 min; 6: D-glucose 14.771 min; 7: D-galactose 15.606 min.

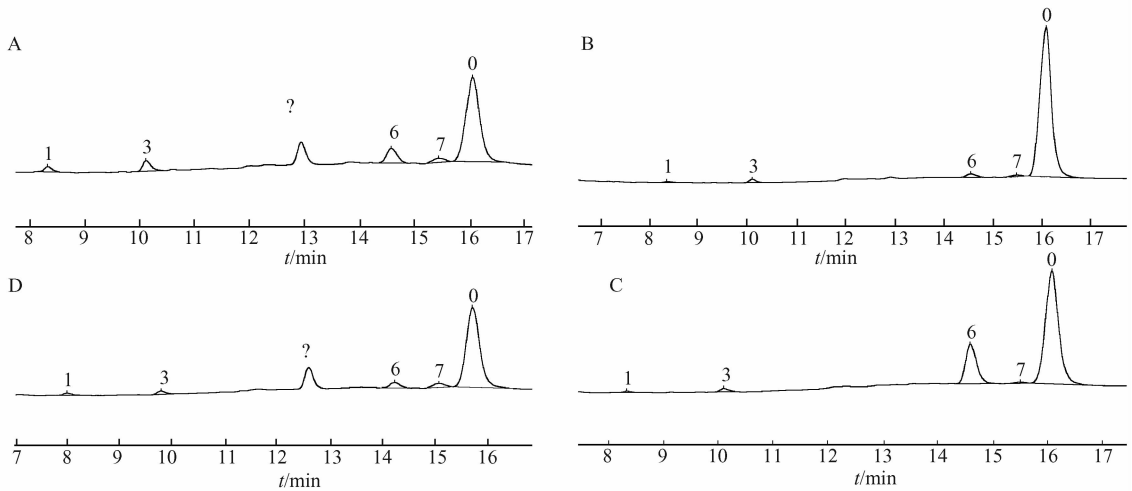


图6 黑曲霉以及黑曲霉-矿物聚集体多糖的单糖组分气相色谱图

Fig. 6 Chromatogram of monosaccharides of polysaccharides from *A. niger* and *A. niger*- mineral aggregation. A: the experimental group 1; B: the control group 1; C: the control group 2; D: the experimental group 2; 0: inositol; 1: L-rhamnose; 3: L-arabinose; 6: D-glucose; 7: D-galactose.

2.6 黑曲霉-矿物聚集体微环境中多糖的化学结构

对4个组多糖进行IR分析,结果见图7。在官能团区, $3400 - 3240 \text{ cm}^{-1}$ 归属为 O-H 伸缩振动,如图7显示该区域内峰强且宽,说明4组多糖结构中均有大量 OH⁻。然而从强度区别,实验组2(既加 K⁺ 又加钾矿粉) > 实验组1(加钾矿粉) > 对照组2(加 K⁺) > 对照组1(未加 K⁺ 也未加钾矿粉),

结果表明,加了钾矿粉后多糖 OH⁻ 增多,加了可溶性钾离子后多糖 OH⁻ 也会增多,但是加了钾矿的多糖 OH⁻ 增加量更多,说明钾矿物可诱导产生更多的多糖 OH⁻,一方面,使多糖有更多机会吸附矿物阳离子;另一方面,羟基是亲水性基团,能吸引水分子,使其形成的固体表面也易被水润湿,而这些羟基也可与水分子以氢键的形式结合在一起。从峰形区

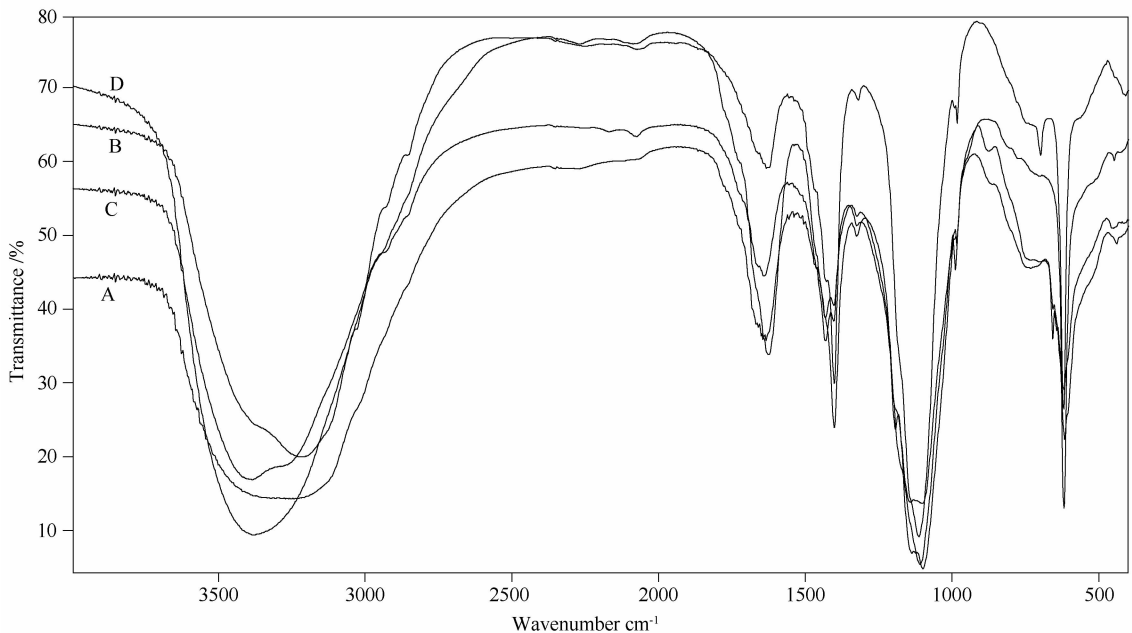


图7 黑曲霉菌以及黑曲霉-矿物聚集体多糖的红外光谱鉴别

Fig. 7 The infrared absorbance spectra of polysaccharides from *A. niger* and *A. niger*- mineral aggregation. A: the experimental group 1; B: the control group 1; C: the control group 2; D: the experimental group 2.

别,实验组 1 比对照组峰宽,推测实验组 1 还可能存在着有螯合的羟基^[25],这很可能是由黑曲霉代谢多糖羟基与钾长石中的阳离子螯合而成,而实验组 2 峰宽与对照组未表现明显差异,可能是由于培养基中同时有可溶性 K^+ 的存在,黑曲霉优先利用相对容易吸收的 KCl ,营养成分充足使其暂时不需要作用于钾矿粉。在指纹区,实验组 1 和实验组 2 在 1100 cm^{-1} 附近的吸收峰均有一个小的分岔,而对照组 1 和对照组 2 均显示一个完整的尖锐的峰形,说明加了含钾矿粉的 2 个实验组除了有 $-OH$ 伸缩振动外可能还有 $Si-O$ 伸缩振动^[17,26],因为钾长石是硅酸盐矿物,很可能由于多糖对其的螯合作用使得矿质元素 Si 易于与多糖复合在一起,明显区别于钾矿粉作用前的 2 个对照组多糖结构。

实验组 1 结果表明,黑曲霉-矿物聚集体微环境多糖可能含有 $CH(983\text{ cm}^{-1})$ 、 $Si-O(1100\text{ cm}^{-1})$ 、羧酸(离子)(1400 cm^{-1})以及大量 OH^- 和螯合 OH^- (3252 cm^{-1} 等处)^[25,26],是一种由常规多糖与钾矿粉作用后形成的多糖。

3 结论

本文以黑曲霉和钾长石为例,探讨了真菌-矿物聚集体形成前后微环境中多糖发生的改变。结果表明,在矿物颗粒参与下,菌体细胞形态及代谢会产生变化,从而诱导多糖浓度和结构发生明显改变,这种变化有助于拉近真菌与矿物的距离并使矿物粘附在菌体上。随着摇瓶培养的进行,真菌与矿物相互作用形成了较为封闭的真菌-矿物聚集体,在聚集体内部菌丝与矿物颗粒充分接触,在有机酸、蛋白质和酶等代谢物质以及水分子的帮助下能使矿物晶格层间域增大,多种因素协同作用促使矿物晶格破坏和离子的释放。可以说,多糖为菌丝及其代谢产物直接风化矿粉提供了有利的工具。

真菌风化矿物是一种积极的生命活动过程,它从浸矿过程中获取生存资源,作用机理应从其多种代谢产物混合物的协同作用入手。而菌体及其多糖等代谢产物形成的生物膜会覆盖在矿物表面并形成易于发生生物化学降解的微环境,这个微环境是一个由多因素组成、时空可变的复杂聚集体,并在真菌对含钾矿物风化的行为中发挥重要作用。

参考文献

[1] 连宾,陈骏,傅平秋,刘丛强,陈焯. 微生物影响硅酸盐矿物风化作用的模拟试验. 高校地质学报 (*Geological Journal of China Universities*), 2005, 11(2): 181-185.

[2] 陈骏,姚素平. 地质微生物学及其发展方向. 高校地质学报 (*Geological Journal of China Universities*), 2005, 11(2): 154-166.

[3] 连宾. 微生物矿物学及其应用. 地质地球化学 (*Geology-Geochemistry*), 1999, 27(1): 85-90.

[4] 沈萍,陈向东. 微生物学复兴的机遇挑战和趋势. 微生物学报 (*Acta Microbiologica Sinica*), 2010, 50(1): 1-6.

[5] 李兆麟,于波. 地质学中“大科学”. 国际学术动态 (*International Academic Development*), 2006, 1: 24-33.

[6] 周雪莹,李辉,连宾. 胶质芽孢杆菌胞外多糖在肥料矿物分解转化中的作用. 矿物岩石地球化学通报 (*Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*), 2010, 29(1): 63-66.

[7] Katja S. Fungi as geologic agents. *Geomicrobiology Journal*, 2000, 17: 97-124.

[8] Weiner S, Dove PM. An overview of biomineralization processes and the problem of the vital effect. *Reviews in Mineralogy & Geochemistry*, 2003, 54: 1-29.

[9] Basak BB, Biswas DR. Influence of potassium solubilizing microorganism (*Bacillus mucilaginosus*) and waste mica on potassium uptake dynamics by sudan grass (*Sorghum vulgare Pers.*) grown under two Alfisols. *Plant Soil*, 2009, 317: 235-255.

[10] Sugumaran P, Janarthanam B. Solubilization of potassium containing minerals by bacteria and their effect on plant growth. *World journal of agricultural sciences*. 2007, 3(3): 350-355.

[11] 连宾,傅平秋,莫德明,刘丛强. 硅酸盐细菌解钾作用机理的综合效应. 矿物学报 (*Acta Mineralogica Sinica*), 2002, 22(2): 179-182.

[12] 莫彬彬,连宾. 长石风化作用及影响因素分析. 地学前缘 (*Earth Science Frontiers*), 2010, 17(3): 281-286.

[13] Sheng XF, He LY. Solubilization of potassium-bearing minerals by a wild type strain of *Bacillus edaphicus* and its mutants and increased potassium uptake by wheat. *Canadian Journal Microbiology*, 2006, 52(1): 66-72.

[14] Yuan L, Huang JG, Li XL, Peter C. Biological mobilization of potassium from clay minerals by ectomycorrhizal fungi and eucalypt seedling roots. *Plant and Soil*, 2004, 262: 351-361.

[15] Lian B, Wang B, Pan M, Liu CQ, Teng HH. Microbial release of potassium form K-bearing minerals by thermophilic fungus *Aspergillus fumigatus*. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2008, 72: 87-98.

[16] 谌书,刘丛强,连宾. 一株黑曲霉对磷灰石的风化作用. 矿物学报 (*Acta Mineralogica Sinica*), 2009, 29(1): 103-107.

[17] 谭媛,董发勤,代群威. 黑曲霉菌浸出蛇纹石尾矿中钴和镍的实验研究. 矿物岩石 (*Journal of Mineralogy and Petrology*), 2009, 29(3): 115-119.

- [18] 马放, 张斯, 山丹. 黑曲霉 Y3 菌丝球培养基成分优化. 中国环境科学 (*China Environmental Science*), 2008, 28(11): 989-933.
- [19] 刘晓涵, 陈永刚, 林励, 庄满贤, 方晓娟. 萘酚硫酸法与苯酚硫酸法测定枸杞子中多糖含量的比较. 食品科技 (*Food Science and Technology*), 2009, 34(9): 270-272.
- [20] 彭辉, 尹华, 梁郁强, 汤心虎, 刘慧璇. 微生物絮凝剂产生菌的培养及其化学特征初探. 环境科学与技术 (*Environmental Science and Technology*), 2002, 25(1): 6-8.
- [21] 窦传伟, 连宾. 一株岩生真菌对方解石的风化作用. 矿物学报 (*Acta Mineralogica Sinica*), 2009, 29(3): 387-391.
- [22] 王进军, 连宾, 陈骏. 黄土中 3 株优势细菌的鉴定以及持水效果的初步研究. 农业环境科学学报 (*Journal of Agro-Environment Science*), 2007, 26(4): 1575-1578.
- [23] 李静, 连宾, 侯卫国. 放射形土壤杆菌 GY04 胞外多糖发酵工艺及其持水作用分析. 重庆大学学报 (*Journal of Chongqing University*), 2009, 32(11): 1363-1369.
- [24] Barker WW, Welch SA, Chu S. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *American Mineralogist*, 1998, 83: 1551-1563.
- [25] 宁永成. 有机化合物结构鉴定与有机波谱学. 北京: 清华大学出版社, 1989.
- [26] 甘四洋, 董发勤, 曾亚丽, 邓建军, 赵磊. 纤蛇纹石石棉及代用纤维粉尘的光谱研究与噻唑蓝 (MTT) 比色法分析. 矿物岩石 (*Journal of Mineralogy and Petrology*), 2008, 28(4): 47-52.

Formation of *Aspergillus niger*-mineral aggregation and characterization of polysaccharide from aggregation

Jie Hu¹, Bin Lian^{2*}, Jianping Yu¹, Xing Hu¹

¹ College of Life Science, Guizhou University, Guiyang 550025, China

² State Key Laboratory of Environmental Geochemistry, Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550002, China

Abstract: [Objective] In order to understand the weathering on potassium-bearing mineral by *Aspergillus niger*, we studied the formation of *A. niger*-mineral aggregation and polysaccharide in the revolving and fermenting mode and their role in the process of weathering on potassium-bearing mineral. [Methods] We used four different media to study the morphology of *A. niger*-mineral aggregation; ultraviolet-visible spectrum (UV-Vis), fourier transform infrared spectrum (IR), gas chromatography (GC), scanning electron microscopy (SEM) and energy dispersive spectrometer (EDS) were combined to research the changes of polysaccharide and their significances in the micro-environment forming fungal-mineral aggregation. [Results] *A. niger* mycelia intertwined, adsorbed and bonded mineral powder to form aggregation by the assistance of polysaccharide and other metabolites. After formation of the aggregation, the concentration and structure of polysaccharide were changed significantly. [Conclusion] The changes of polysaccharide would enhance the adsorption on minerals, chelation on metal ions and adsorption on water molecules, which provided a favorable micro-environment for the fungal using mineral nutrients effectively.

Keywords: aggregation, polysaccharide, *Aspergillus niger*, weathering, micro-environment, potassium-bearing mineral powder

(本文责编:王晋芳)

Supported by the National High Technology Research and Development Program of China (2008AA06Z108), the by National Science Foundation for Creative Research Groups (40721002) and the Chinese Academy of Sciences "Hundred Talents" project

* Corresponding author. Tel/Fax: +86-851-5895148; E-mail: bin2368@vip.163.com

Received: 2 December 2010/ Revised: 21 January 2011