



微生物与矿物相互作用对污染物环境行为的影响

朱栎佳^{1,2}, 丁玲^{1,2*}, 仇欣然^{1,2}, 梁旭军^{1,2}, 郭学涛^{1,2*}

1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100;

2. 陕西省干旱/半干旱农林固碳与污染控制重点实验室, 杨凌 712100

* 联系人, E-mail: dingling@nwfau.edu.cn; guoxuetao2005@nwfau.edu.cn

2024-07-09 收稿, 2024-08-19 修回, 2024-09-02 接受, 2024-09-05 网络版发表

国家自然科学基金(42377233, 42407345)、中国博士后科学基金(2024M752637)和陕西省博士后科研项目(2023BSHEDZZ131)资助

摘要 微生物与矿物的相互作用作为自然环境中普遍存在且重要的环境地球化学过程之一, 是联系不同圈层物质与能量交换的重要纽带, 深刻影响着环境中能量流动、元素循环以及共存污染物的环境行为. 在两者相互作用过程中, 矿物能刺激微生物的活性和代谢分泌, 反之微生物也能改变矿物的理化性质, 进而影响共存污染物的迁移转化过程. 本文综述了微生物与矿物相互作用的研究进展和作用机制, 并重点总结了两者相互作用对共存污染物环境行为的影响, 厘清了微生物与矿物相互作用对于环境修复和污染物治理的重要意义, 为微生物-矿物相互作用在环境污染修复领域提供理论支撑.

关键词 矿物, 微生物, 相互作用, 污染物, 环境行为

矿物作为地球的重要组成部分, 在环境中广泛存在, 其理化特征反映了地球形成时期的地理环境信息^[1], 可为环境中的生物提供营养元素和能量, 并在环境治理和保护中发挥积极作用. 微生物作为地球上最早的生命, 是地球生命的根基, 在碳、氮、磷和硫循环中发挥重要作用^[2]. 自地球生命起源以来, 矿物与微生物随时间推移表现出共演化现象, 即微生物通过其新陈代谢活动推动矿物多样化, 矿物也会通过其理化性质的变化促进微生物进化, 增加物种多样性^[3], 对地质和环境变化产生深远影响. 在近地表环境中, 矿物和微生物共存并发生复杂的相互作用^[4]. 这一相互作用影响地球元素循环、地表环境改造、地质矿床形成、环境变化等地球宏观行为^[5,6], 并在资源回收、环境修复以及碳循环等方面发挥着重要作用. 因此, 微生物与矿物相互作用是环境科学领域的核心研究内容之一.

目前虽有诸多以“微生物-矿物-污染物”为主题的研究, 但是该领域的研究探索仍处于起步阶段, 存在研究菌株单一、实验室研究条件和结果不能完全代表自然环境实际情况等问题. 因此, 亟需研究人员加强相关研究, 拓展补充这一领域的研究空白. 此外, 目前已发表的综述文章多从微生物与矿物相互作用机制或微生物与矿物相互作用对重金属的影响等单一角度出发, 缺乏对微生物与矿物相互作用及其对污染物环境行为影响的多角度总结. 基于此, 本文对微生物与矿物的相互作用研究进展、作用机制以及二者对共存污染物环境行为的影响进行了系统全面的总结, 并在此基础上分析了目前已有研究的不足, 构建了一个较完整的“微生物-矿物-污染物”知识体系. 以上研究成果有助于深入了解自然环境中污染物的环境行为, 为污染物的环境修复提供理论支持.

引用格式: 朱栎佳, 丁玲, 仇欣然, 等. 微生物与矿物相互作用对污染物环境行为的影响. 科学通报, 2025, 70: 443–456

Zhu L J, Ding L, Qiu X R, et al. Effects of microbe-mineral interaction on the environmental behaviors of coexisting pollutants: a review (in Chinese). Chin Sci Bull, 2025, 70: 443–456, doi: [10.1360/TB-2024-0741](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0741)

1 微生物与矿物的相互作用

1.1 相互作用研究进展

微生物与矿物相互作用在环境中无处不在，比如土壤、水体和空气等环境介质，甚至在酸性矿山废水、深海低温热液等一些极端环境也发现了该过程^[7,8] (表1).

目前国内外相关的研究可以分为以下几个方面：(1) 微生物在矿物表面的吸附. 微生物在矿物表面的吸附是两者相互作用的基础，主要受静电作用、疏水性分配作用和氢键驱动. 且从热力学角度分析，细菌吸附于矿物的过程为放热过程，且细菌对矿物的吸附焓受两者之间作用力的影响，即吸附过程是放热过程还是吸热过程由主导两者吸附的作用力决定^[12,28]. (2) 微生物对矿物胁迫的反馈与适应机制. 矿物可以为微生物提供保护，使微生物免受缺水、强酸性以及冻融循环等恶劣环境条件的伤害^[15]，同时微生物的生长代谢还可能导致矿物发生变化(溶解、转化等)，释放出金属离子，刺激微生物氧化应激，影响微生物的活性. Wu等人^[13]采用微量热法和碳利用法探讨了土壤胶体和矿物对恶臭假单胞菌代谢活性的影响，发现蒙脱石可以吸

附大量有毒代谢物，减少其对细菌的毒害，显著提高细菌代谢活性；而高岭石、针铁矿和土壤胶体会干扰细菌对营养物质以及代谢产物的跨膜运输，导致细菌代谢活性降低. 此外，在矿物刺激下，微生物还可以通过调节自身代谢来适应生存环境，包括胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)的合成、微生物抗逆能力的提高以及分泌更多有机酸. Li等人^[29]发现在胶质类芽孢杆菌K02与矿物相互作用的过程中，多种矿物(凹凸棒土、蛇纹石、滑石、黑云母和羟基磷灰石)可以通过碰撞和摩擦对细菌造成破坏，使得细菌分泌大量的EPS，促进矿物溶解，削弱矿物颗粒的“攻击”. (3) 微生物对矿物表面性质和形态结构的影响. 一方面，微生物可通过直接参与矿物元素氧化还原反应促进矿物转化，也可耦合环境中共存物质参与矿物元素氧化还原反应，进而促进矿物转化. Cao等人^[30]研究指出腐败希瓦氏菌CN32和希瓦氏菌MR-1通过还原蒙脱石晶格中的三价铁，使得蒙脱石铁元素减少，层间距缩小，从而促进矿物的转化. Zhao等人^[31]研究发现硝酸盐依赖性Fe(II)氧化细菌*Pseudogulbenkiania* sp. strain 2002能够通过亚硝酸盐作为中间体，将伊利石中结构Fe(II)的氧化反应与硝酸盐还原为氮气这一反应过程

表 1 微生物与矿物相互作用的相关研究

Table 1 Related research on the interaction between microorganisms and minerals

类别	微生物	矿物	文献
微生物与矿物的吸附作用	铁还原代谢菌	黄铁矿	[9]
	红假单胞菌UZ25p	高岭石	[10]
	嗜铁钩端螺旋菌LF-104	黄铁矿	[11]
	嗜酸喜温硫杆菌MTH-04		
微生物对矿物胁迫的反馈与适应机制	枯草芽孢杆菌	高岭石、蒙脱石、针铁矿	[12]
	恶臭假单胞菌	高岭石、蒙脱石、针铁矿	[13]
	金黄杆菌属WAL2	蒙脱石	[14]
	大肠杆菌	水铁矿	[15]
	巴氏芽孢杆菌	高岭石	[16]
微生物对矿物表面性质和形态结构的影响	金黄色葡萄球菌	高岭石	[17]
	嗜温细菌、嗜热细菌	绿脱石	[18]
	希瓦氏菌菌株WP3	蒙脱石	[19]
	希瓦氏菌MR-1	黄钾铁矾	[20]
	类芽孢杆菌 <i>Paenibacillus</i>	蒙脱石	[21]
	大肠杆菌	黄铁矿	[22]
两者相互作用的环境意义	聚球菌属PCC 7002	蒙脱石	[23]
	PAH降解细菌 <i>Sphingomonas</i> sp. GY2B	蒙脱石	[24,25]
	海洋沉积物原始菌群	石英、绿泥石、蒙皂石	[26]
	黑曲霉	高岭石、蒙脱石、坡缕石	[27]

偶联,从而促进了伊利石→蒙脱石→高岭石的转化.另一方面,除微生物自身会通过氧化还原反应促进矿物转化以外,其分泌物也能促进矿物转化;Yang等人^[32]研究发现胶质芽孢杆菌可以通过代谢分泌有机酸,与溶解硅离子发生络合反应,破坏其四面体结构,促进蒙脱石的高岭石化.(4)两者相互作用的环境意义探究.随着微生物与矿物相互作用研究的深入,越来越多学者关注“微生物与矿物的环境作用”.微生物与矿物的相互作用会影响碳、氮等元素的地球化学循环和污染物的环境行为.Shelobolina等人^[33]发现*Desulfitobacterium frappieri* strain G2可以利用Fe(II)作为电子受体将硝酸盐还原为亚硝酸盐,然后还原所得的亚硝酸盐又会进一步参与菌株G2氧化Fe(II)的化学反应,从而影响氮元素循环.Lamérand等人^[34]研究表明含有蓝藻的混合菌群在封存CO₂以及将CO₂转化为生物质和次生碳酸盐矿物方面具有很高的潜力.除此以外,微生物与矿物相互作用体系还会对污染物环境行为产生较大影响.微生物与矿物相互作用过程中,微生物代谢以及矿物理化性质会发生变化,进而影响污染物的环境行为^[24].

1.2 相互作用机制

矿物与微生物相互作用是一个复杂的动态过程,国内外众多学者前期进行了相关研究,揭示了微生物与矿物相互作用过程及其作用机制.如图1所示,作用机制包括吸附、胞外电子传递、质子交换、络合作

用、形成生物膜或分泌EPS、生物力学等.

表面吸附结合是两者相互作用的基础.其中,一些相互作用力对微生物与矿物的表面结合吸附起重要作用,比如范德华力、疏水作用、静电作用、氢键等^[35,36],即微生物与矿物的相互作用过程是由特异性作用力和非特异性作用力共同作用的复杂过程^[37].Ruan等人^[24]发现在低离子强度(≤ 20 mmol/L)下,细菌在蒙脱石上的黏附主要由长程DLVO力(如静电排斥)驱动,而范德华力和疏水相互作用在较高离子强度(50~100 mmol/L)下的细菌黏附中起着更重要的作用.Shroll和Straatsma^[38]采用经典分子模拟方法研究了铜绿假单胞菌对针铁矿的黏附作用,结果发现细菌黏附矿物表面的过程是由与矿物表面形成的氢键所主导的.荣兴民等人^[39]使用表面热力学和扩展的DLVO理论计算发现疏水作用力和静电力是驱动细菌与矿物颗粒吸附的主要作用力,其中疏水作用力占主要地位.综上所述可知,不同种类细菌与矿物的表面理化性质存在差异,这种差异决定了细菌与矿物吸附过程的主导作用力.

在微生物-矿物作用过程中,矿物与微生物也可以通过多种胞外电子传递方式相互影响.关于微生物与矿物的相互作用过程及其机制的研究,诸多学者也将研究重点聚焦于微生物-矿物间的电子转移机制.根据目前已有的研究成果可知,微生物与矿物之间胞外电子传递主要有以下4种形式:(1)微生物利用矿物作为电子受体,满足自身代谢需要^[40].Lovley等人^[41]发现在

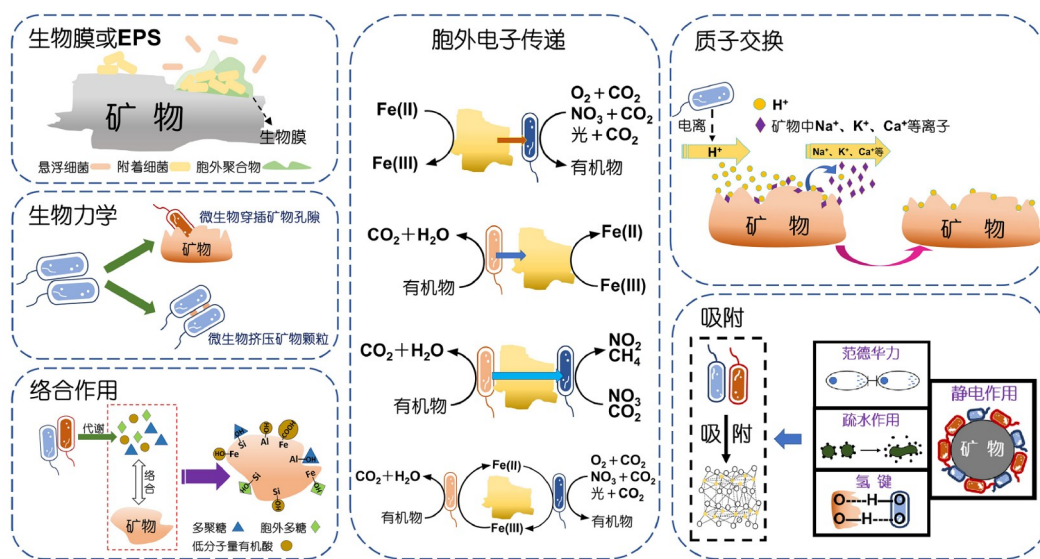


图1 微生物与矿物的相互作用机制

Figure 1 The interaction mechanism between microorganisms and minerals

无氧条件下, *Geobacter metallireducens* GS-15以赤铁矿等矿物为呼吸终端的电子受体, 将氧化有机物释放的电子转移至矿物上进行呼吸. Myers和Nealson^[42]同样也发现交替单胞菌MR-1在厌氧条件下以氧化锰矿物作为唯一的末端电子受体进行呼吸与新陈代谢. 此外, 半导体矿物可以与电活性微生物相互作用, 作为电子受体, 有效促进透光区细胞外电子转移的过程^[43]. (2) 矿物还可以作为电子供体为微生物的生长代谢提供电子和能量. Jiao等人^[44]分离和表征了一种光养亚铁[Fe(II)]氧化细菌TIE-1, 发现在厌氧条件下, 其以含Fe(II)的氧化铁矿物为电子供体获取生长所需的电子和能量. (3) 微生物以矿物为电子导体进行电子传递. 在微生物-矿物共培养体系中, 半导体矿物还可以作为电子导体促进了不同物种微生物细胞之间的电子转移. 例如赤铁矿和磁铁矿颗粒可以作为电子导体, 促进硫还原地杆菌和脱氮硫杆菌之间的电子传递^[45]. (4) 矿物作为电子存储介质, 促进微生物的生长代谢. 比如在环境中没有其他电子受体的情况下, 微生物可以还原磁铁矿, 将电子储存在矿物中. 当外界环境条件变化时, 矿物可将存储的电子通过呼吸作用传递给微生物, 维持微生物正常的生长代谢, 因此磁铁矿可作为环境电池支持微生物生长代谢^[46].

此外, 微生物与矿物相互作用过程中, 微生物不仅可以利用矿物进行电子传递, 促进生长代谢, 还可通过质子交换和络合作用促使矿物发生变化, 释放出金属离子, 为其生长提供所需的营养物质. 微生物与矿物相互作用过程中, 矿物其表面金属阳离子容易与微生物代谢产生的酸发生酸解作用而溶出^[47]. Ehrlich^[40]发现微生物代谢产生的小分子物质及其表面电离出来的 H^+ 均能与矿物中的金属离子发生质子交换, 从而促进矿物溶解. 此外, 细菌代谢产生的阴离子配体, 例如低分子量有机酸、多聚糖及胞外多糖等, 可与矿物中的Si、Al、Ca、Mg、Fe等金属离子络合, 使之以络合物的形式从矿物的晶格中脱离, 促使矿物溶解^[48].

除此之外, 微生物还可以通过分泌EPS和形成生物膜使微生物与矿物发生相互作用. 微生物分泌EPS能改变矿物表面附着位点活性, 破坏化学键和矿物结构, 进而影响矿物表面化学性质^[49]. 此外, 硅酸盐细菌分泌的EPS还会与矿物颗粒络合形成菌-矿复合体, 促进硅酸盐矿物的溶解风化^[50]. Fang等人^[51]通过实验发现EPS会与矿物中的金属离子形成化学键, 从而促进细菌对矿物的黏附. 此外, 微生物还可以通过物理作用改变矿

物的形态结构. 如部分微生物可通过菌丝穿透矿物颗粒, 破坏矿物结构, 进而促进矿物的溶解和风化^[52].

1.3 影响因素

微生物与矿物相互作用通常受到各种因素的影响, 包括自身的特性以及环境因素, 如pH、温度、有机质含量、细菌浓度、微生物活性、矿物类型以及矿物表面基团等. 本文将从矿物特性、微生物特性以及环境条件三方面阐明微生物与矿物的相互作用的影响因素.

随着地球演变进化, 在不同的环境条件下形成了多种多样的矿物. 矿物的类型及其理化性质是影响矿物与微生物的相互作用的重要因素. 不同类型的矿物在理化性质上存在差异, 这种理化性质差异将会影响矿物与微生物之间的相互作用, 主要表现在矿物与微生物的吸附作用. 其中, 微生物与矿物表面的表面电荷主导着微生物在矿物表面的吸附水平^[53], 表面积越大、带正电荷越多的矿物越有利于吸附微生物^[54]. 相较于蒙脱石和高岭石, 假单胞菌倾向附着在带正电的针铁矿表面^[53]. Hong等人^[55]利用吸附等温线以及DLVO计算研究枯草芽孢杆菌在六种矿物上的吸附水平, 发现细菌在矿物表面的黏附能力与矿物表面的比表面积及静电能垒呈显著相关关系. 此外, 矿物表面金属离子的电子壳空轨道数也会影响微生物的吸附作用. Jia等人^[56]发现细菌与黄铁矿、方铅矿、闪锌矿相互作用过程中, 由于 Fe^{2+} 、 Fe^{3+} 的空轨道数比其他金属离子多, 孤对电子接受容量比其他金属离子大, 因此细菌均优先吸附于黄铁矿表面.

微生物是地球上最为丰富多样的生物资源, 具有悠久的历史. 微生物无处不在, 且种类繁多. 不同种类的微生物对矿物存在竞争吸附, 微生物表面性质决定竞争吸附过程中的主导细菌. 研究发现嗜铁钩端螺旋菌LF-104和嗜酸喜温硫杆菌MTH-04对黄铁矿存在竞争吸附, 且细菌LF-104在这一吸附过程中占据主导地位. 这是因为相较于MTH-04, LF-104具有较高的表面电荷和较多的有机官能团, 表现出较高的吸附亲和力^[11]. 此外, 微生物结构也在一定程度上影响微生物对矿物的吸附. Ams等人^[57]研究发现, 由于细胞壁结构的差异, 与门多萨假单胞菌(革兰氏阴性菌)相比, 更多的枯草芽孢杆菌(革兰氏阳性菌)附着在铁涂层的石英表面上. 同时, 细菌分泌的胞外聚合物(EPS)也会影响微生物与矿物两者的吸附水平, 并在细菌对矿物理化性质影响中发挥重要作用^[22]. Hong等人^[58]报道EPS去除

后,细菌在黏土矿物表面的黏着力下降,而在针铁矿表面的黏着力不受影响,主要可归因于EPS对细菌表面电性的影响以及细菌与矿物之间的化学作用这两方面。因此,微生物的种类和表面性质均会影响其与矿物的相互作用。

除了自身因素以外,pH、温度及离子强度等环境因素也会影响微生物与矿物之间相互作用。pH与细胞密度均会影响细菌-矿物悬浮液的沉降,当细胞密度较低时,pH会通过影响细菌与矿物的结合,进而影响矿物的沉降;而随着细胞密度增加,细菌与矿物的相互作用更加显著,从而促进矿物的生物沉降^[59]。此外,pH还会影响矿物间的转化。Jaisi等人^[18]研究了pH对于微生物介导的S-I转化(蒙脱石-伊利石转化)的影响,发现Fe(III)的还原速率取决于pH,主要因为涉及到的菌株适宜生存的环境为酸性或中性,高pH抑制了它们的代谢活性。温度也是影响微生物与矿物相互作用的一个重要因素。Rong等人^[28]研究表明细菌在高岭石上的吸附焓受温度变化影响明显,从热力学角度分析,这是因为高温下细菌与矿物之间的离子交换和疏水作用使得熵增加,根据焓-熵补偿理论,吸附焓下降。此外,Wang等人^[60]发现细菌对黄铜矿的吸附程度随离子强度的增加而减小,由于离子强度增加导致矿物和细菌颗粒的电双层压缩,静电引力减弱。而Hong等人^[12]也发现高盐浓度下,静电斥力减弱,疏水作用增强,促进了细菌与矿物的吸附,即离子强度增大促进细菌与矿物的吸附。因此,离子强度也在微生物与矿物相互作用中扮演着重要角色。

1.4 相互作用对微生物和矿物的影响

1.4.1 微生物对矿物的影响

在相互作用过程中,微生物与矿物并非互不干扰,而是微生物会通过生长代谢等途径溶解、沉淀、转化矿物,改变矿物理化性质(图2)。在微生物与矿物互作过程中,微生物会通过酸解作用或氧化还原反应等使矿物溶解。Zhou等人^[61]研究发现细菌吸附于矿物表面后会破坏钙长石中的Al-O-Si键,释放出 Al^{3+} 和 Si^{3+} 。此外,微生物分泌的有机酸和配体也是加速矿物溶解的主要原因^[4]。Banfield等人^[62]表明微生物通过分泌代谢产物,释放有机酸,促进不溶性磷酸盐矿物的溶解。此外,微生物不仅可以使矿物溶解,还可促进矿物转化。Kompantseva等人^[10]发现菌株*Rhodopseudomonas* sp. UZ-25p和高岭石相互作用导致高岭石的阳离子交换能力

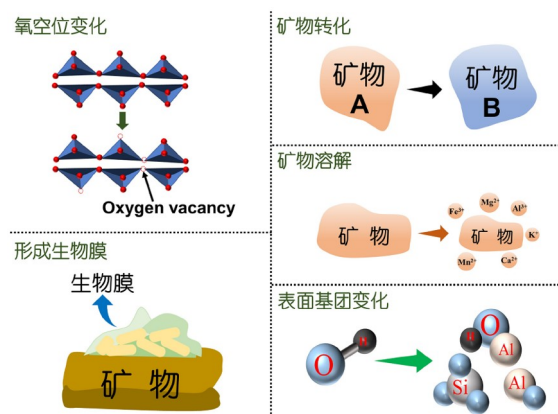


图2 微生物对矿物的影响

Figure 2 The influence of microorganisms on minerals

增加等物化特征变化,从而促使矿物转化形成三水铝石。Kim等人^[63]也研究发现微生物可以在室温和1个大气压下通过还原蒙脱石的结构Fe(III),在14d内溶解蒙脱石,且促进蒙脱石-伊利石(S-I)转化反应。微生物与黏土矿物的相互作用会促进S-I转化,反之亦然^[64]。微生物与矿物相互作用过程中,微生物还会定植于矿物表面,形成生物膜,代谢分泌EPS,对矿物的表面理化性质产生影响。研究表明微生物定植形成的生物膜既可以抑制环境因素对矿物的溶解^[65],也可以通过生物膜促进矿物的溶解^[66],该过程的发生取决于矿物理化性质和外界环境条件。比如,异氧嗜酸菌在黄铁矿表面形成的生物膜,可以阻碍环境中共存的铁氧化化学自养生物对矿物的氧化^[67]。Biswas等人^[68]和Simões等人^[69]观察到相较于原始矿物,与菌反应后的矿物出现新的峰,干扰矿物结构中存在的水分子,使基团波段发生偏移。Yu等人^[70]也发现与赤铁矿纳米颗粒和希瓦氏菌MR-1相比,赤铁矿-MR-1复合物显示出更低的Zeta电位值,由此可知赤铁矿和希瓦氏菌MR-1相互作用会导致矿物表面带正电的基团被掩盖。

1.4.2 矿物对微生物的影响

矿物与微生物共存时,矿物会对微生物生长代谢产生影响,既有不利影响,又有有益影响,主要表现为提供能量营养、影响活性、提供保护三个方面(图3)。矿物对微生物的有益影响体现在两方面。其一,矿物可作为微生物的营养能量来源。矿物为微生物的生长代谢提供所需的营养和微量金属元素,且作为电子供体/受体,促进电子转移,从而提供能量支持微生物的生长^[71]。微生物通过附着在矿物表面,获取Fe、Na等生

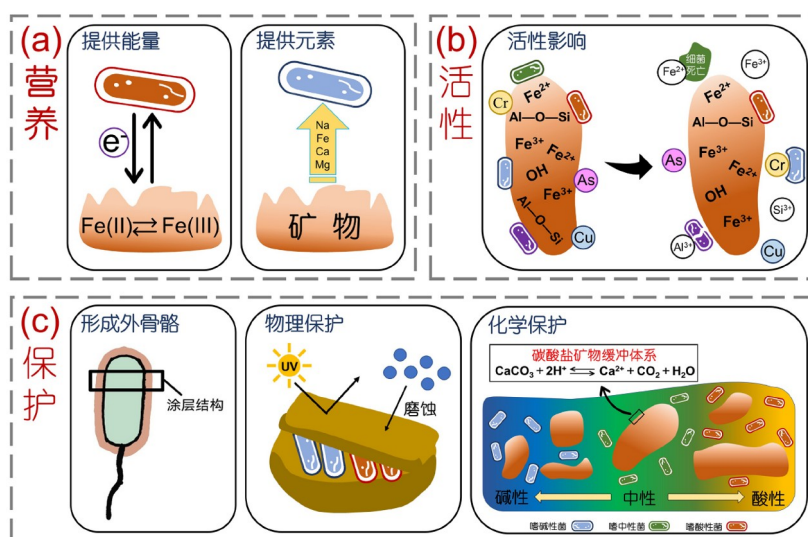


图3 矿物对微生物的影响. (a) 矿物为微生物提供能量和营养; (b) 矿物影响微生物活性; (c) 矿物对微生物的保护作用

Figure 3 The impact of minerals on microorganisms. (a) Minerals provide energy and nutrients for microorganisms; (b) minerals affect microbial activity; (c) the protective effect of minerals on microorganisms

长代谢所必需的金属元素^[72]. 其二, 矿物为微生物提供保护. 矿物的保护作用主要包括物理保护和化学保护. 矿物内部的裂缝和孔隙可保护微生物免受恶劣条件的影响, 如紫外线照射和物理磨损等^[72,73]. 矿物覆盖细菌的保护作用还能延伸到大气中的长距离运输过程中, 不过这种保护只能通过黏附性很强的小颗粒——黏土矿物来实现^[74], 且黏土矿物还可以保护细菌避免脱水伤害^[75]. 在化学保护方面, 矿物可以作为缓冲体系, 调节环境酸碱, 为微生物生长提供适宜的生存环境^[76]. 蒙脱石、高岭石等黏土矿物通过其表面可交换性阳离子来影响土壤环境的pH值, 进而影响环境中微生物种群分布和细菌活性^[77,78]. 此外, 矿物也可同时对细菌起到物理和化学两方面的保护作用. Chi等人^[79]发现在纳米生物杂化体系中, 真菌通过生物矿化将针铁矿纳米颗粒镶嵌在菌丝表面的EPS中, 形成了一层类似金属-有机框架(MOF)的外壳, 即“外骨骼”, 该外壳不仅具有较强的催化活性, 也可以对菌体起到物理保护作用.

矿物对微生物的不利影响主要表现为影响微生物活性. 矿物通过自身理化性质, 在与微生物接触中影响微生物的生长活性. 矿物对于微生物活性的影响体现在两个方面: 一是两者吸附过程中, 矿物表面形态会破坏微生物细胞膜; Cai等人^[80]发现大肠杆菌与蒙脱石和高岭石相互作用过程中其活性未受影响, 但与针铁矿相互作用时, 细菌活性降低, 细胞膜受损, 其原因是带正电的针铁矿与细胞结合更紧密, 导致细菌活性下降,

且针铁矿的针状形状可能会刺穿细胞膜, 导致死亡. 同时, 细菌与矿物接触, 会结合产生新的化学键(例如: 内球P-O-Fe键、O-金属、C-金属等化学键), 使细胞受损失活^[81]. Qu等人^[82]报道枯草芽孢杆菌和恶臭假单胞菌与赤铁矿接触后, P-O-Fe键迅速形成, 随后膜蛋白的结构在2 h内发生变化, 膜在10 h内失去结构完整性, 且革兰氏阴性菌比革兰氏阳性菌的现象更明显, 该现象得益于革兰氏阳性菌细胞壁中肽聚糖的保护作用. 二是矿物溶出的矿质离子或有毒物质对微生物起毒害作用. 目前部分研究表明, 矿物溶出的Fe和Al离子可以抑制微生物活性, 例如: Williams等人^[83]认为, 赤铁矿、针铁矿等溶出的 Fe^{2+} 可进入细胞并被氧化成 Fe^{3+} 沉淀, 产生致命的氢氧自由基, 破坏细胞内结构, 使细菌失活. Wong等人^[84]发现高岭石等矿物中 Al_2O_3 含量与*Desulfovibrio*菌株活性存在负相关关系, 推断矿物溶出的 Al^{3+} 是抑制细菌活性的主要原因.

2 微生物与矿物相互作用对污染物环境行为的影响

在实际环境中, 微生物与矿物的相互作用不仅会改变微生物的代谢途径和矿物的化学稳定性, 还会影响与其共存的污染物的环境行为(表S1). 因此, 了解微生物与矿物相互作用介导下污染物环境行为, 对全面了解微生物与矿物相互作用和污染物修复具有重要意义.

2.1 吸附行为

微生物作为土壤的重要组成部分,并非独立游离存在,会附着并定植于矿物表面,形成微生物-矿物复合体,相较于微生物或矿物单独体系而言,复合体会通过增加表面活性位点、提高表面活性位点的利用率等方式,影响其对环境中的污染物的吸附。目前大多数关于微生物与矿物相互作用对污染物吸附行为影响的研究主要集中于重金属。Xu等人^[85]探究了土壤中分离获得的耐镉细菌、矿物和Cd共存时Cd的归宿,发现在共存体系中,高岭石、蒙脱石、针铁矿和Cd可促进菌-矿复合体表面生物膜的形成,增强其对Cd²⁺的吸附。Xing等人^[86]的研究表明与原始磷矿石相比,菌-矿相互作用后,矿物的凹面暴露更多的交换位点和活性官能团,更容易释放与Cd²⁺共沉淀的磷酸盐,导致Cd²⁺吸附量增加约10倍。Du等人^[87]的研究表明Pb和Cd在菌-矿复合体表面的吸附位点相同,会出现竞争吸附。但由于复合体表面的吸附位点可逆性差,因此相较于细菌或矿物的单独体系,复合体的竞争吸附较弱。Lu等人^[88]发现相较矿物单独体系,菌-矿混合体系对邻苯二甲酸二丁酯(DPB)的吸附量发生变化,细菌的存在减少了蒙脱石和针铁矿表面DPB的吸附,而增加了高岭石表面DPB的吸附,这是因为细菌与矿物相互作用导致矿物表面疏水性变化,而矿物对疏水性有机化合物的吸附能力与其表面疏水性呈正相关。此外,研究表明相较于溶液中的游离态农药克线磷,吸附在有机黏土蒙脱石上的克线磷更容易被细菌降解^[89]。由此可知,微生物与矿物相互作用除了增强对污染物的吸附,还会通过吸附水平影响污染物的降解。

环境因素(pH、离子强度、环境中微生物和矿物含量等)、微生物和矿物自身性质的影响、污染物种类以及不同矿物之间的竞争吸附等均会对微生物-矿物对污染物的吸附水平造成影响。Chen等人^[90]定量比较了恶臭单胞杆菌CZ1-针铁矿复合体与其各组分的金属结合能力,发现活细胞对重金属的吸附量最大,且不同种类矿物与活细胞形成的菌-矿复合体对于污染物的吸附水平也不一致。因此,可知矿物类型和细胞存活状态均会影响到菌-矿复合体对重金属的吸附。除相互作用的微生物和矿物主体差异会影响污染物吸附水平外,环境条件也会在一定程度上影响微生物-矿物吸附污染物的水平。谢朝阳等人^[91,92]探究了pH和菌量对细菌与土壤胶体和黏土矿物体系吸附Cu²⁺和Cd²⁺水平的

影响,发现随着菌量增加,菌-矿共存体系对Cu²⁺和Cd²⁺的吸附量增加,且土壤胶体和矿物对Cu²⁺和Cd²⁺吸附都是随着pH的升高而逐渐上升,其原因是随着pH的升高,体系所带负电荷增多,静电引力作用加强,降低了H⁺与金属离子对矿物表面吸附活性位点的竞争作用,有利于金属离子在菌-矿表面的吸附。而Walker等人^[93]观察到枯草芽孢杆菌-黏土矿物复合物和大肠杆菌-黏土矿物复合物结合的重金属比等量的单个成分少20%~90%。结合上述研究结论可知,相较于矿物或细菌单独体系,菌-矿复合体对于重金属的吸附既表现出促进作用,又表现出抑制作用。Alessi和Fein^[94]则发现枯草芽孢杆菌和高岭石二元体系对镉的吸附随着高岭石含量的增加而降低,表明矿物和菌体的含量均会在一定程度上影响菌-矿二元体系的重金属吸附水平。Qu等人^[95]研究表明离子强度会对菌-矿复合体吸附重金属水平产生影响,随着离子强度从0.01 mol/L增加至0.1 mol/L NaNO₃,复合材料对Pb的吸附量减少了约15%。

2.2 降解行为

微生物与矿物均在污染物降解中发挥重要作用,而自然环境中两者并非独立存在,而是共存于同一环境中,因此污染物的降解过程并非是微生物与矿物独立发挥作用,而是一个复杂的相互作用、相互影响的过程。微生物与矿物相互作用及其界面过程对污染物降解和生物可利用性有重要影响,也在一定程度上影响着污染物的环境行为。因此,了解环境中微生物与矿物的界面过程,揭示微生物与矿物介导下污染物的降解机制是评估污染物环境行为及生态风险的重要基础。Wang等人^[96]发现不同金属改性后的蒙脱石(Mt)对于苯并芘的生物降解有着不同的影响,Na(I)-Mt和Fe(III)-Mt加速了苯并芘的生物降解,而Cu(II)-Mt和Ni(II)-Mt抑制了苯并芘的生物降解,这归因于表面改性金属离子会影响有关呼吸代谢的酶的活性,进而影响微生物与矿物之间的电子传递。Tao等人^[97]报道了金属阳离子改性黏土矿物具有较大的比表面积和阳离子交换能力,更易吸附细菌和污染物,进而能够促进菲(PHE)的生物降解。其中,钠离子改性的蒙脱石对PHE的降解最高(93.285%)。Chang等人^[98]实验发现白腐菌本身能够降解4,4'-二氯联苯(PCB15),而磁铁矿纳米颗粒的加入会显著增强细菌对PCB15的降解,这是因为真菌和磁铁矿纳米颗粒的共培养显著增强了磁铁矿的纳米酶活性。Chen等人^[99]研究表明恶臭假单胞菌对矿物吸附西维因

的降解遵循蒙脱石>高岭石>针铁矿的顺序。蒙脱石对西维因具有较高的亲和力和吸附能力,且增强了恶臭假单胞菌的活性,最终刺激了农药的生物利用度。相反,针铁矿对细菌活性具有抑制作用,进一步阻碍了农药的生物降解。余光辉课题组^[79]则发现真菌与磁铁矿这种纳米生物杂化系统可以通过改变晶格氧和氧空位之间的分子水平平衡增强污染物双酚A的降解。综上所述,微生物与矿物相互作用影响污染物降解的机制主要分为以下4点:(1)矿物影响细菌的代谢活性,进而影响污染物的生物降解;(2)菌-矿共存体系中,矿物对于不同污染物的吸附能力影响细菌对污染物的降解效率;(3)菌株影响矿物表面纳米酶活性或表面理化性质,进而影响污染物降解水平;(4)通过矿物与细菌间的电子传递机制影响污染物的降解。

矿物与微生物在调节污染物降解方面受到许多因素的影响。体系中矿物的种类和含量均会影响矿物与微生物介导的污染物降解。不同类型的矿物对微生物活性的影响不同,进而影响到污染物的降解水平。有研究发现蒙脱石的存在会增强恶臭假单胞菌的活性,最终刺激了西维因的生物利用度;而针铁矿对细菌活性具有抑制作用,减少了西维因降解^[99]。Gan等人^[100]研究则表明赤铁矿的存在显著降低了菌株HPD-2对苯并芘的生物降解,且抑制作用随赤铁矿含量的增加而增强。微生物种类也会影响污染物降解。Quintelas等人^[101]观察到,当采用黏土矿物(高岭石、膨润土、海泡石和蛭石)和细菌的协同作用时,生物降解效果优于单一药剂处理;在二乙酰酮降解方面,*S. equisimilis*的表现优于*A. viscosus*。Froehner等人^[102]报道了在矿物介导下,土壤中萘的生物降解速率快于萘,污染物不同的化学结构(多环芳烃的分子量)可能是造成这一现象的主要原因。此外,环境因素也是影响污染物降解水平的重要因素。pH和温度既会影响微生物活性,又会影响微生物与矿物的相互作用,进而影响污染物的降解^[103]。

2.3 迁移转化行为

目前关于微生物-矿物相互作用对污染物迁移转化行为影响的研究,多集中于重金属,其中土壤中微生物-矿物对重金属的吸附作用是影响其迁移和化学转化的决定因素。Parikh等人^[104]发现细菌的存在阻碍了氧化锰矿物表面反应位点,使矿物钝化,降低反应速率,抑制As(III)氧化为As(VI),而相较于As(III),As(VI)可移动

性差,因此细菌与矿物的相互作用有利于环境中As(III)的移动扩散。Gan等人^[105,106]实验表明嗜酸性氧化亚铁硫杆菌有利于矿物溶解及其表面钝化层去除,促进Cr(VI)还原为Cr(III),并以Fe(III)/Cr(III)-羟基硫酸盐的形式在黄铁矿表面沉淀,影响其在土壤和水体中的迁移。Kang等人^[107]报道了细菌附着在黏土矿物表面,黏土矿物可以保护细胞免受Cr(VI)毒性的微环境,并提供细菌生长所需营养物质,刺激葡萄糖消耗和细菌生长来提高Cr(VI)生物还原率,促使Cr(VI)还原为Cr(III)。综上,矿物与微生物相互作用会通过影响微生物活性或矿物表面理化性质,进一步影响矿物-微生物对重金属的吸附固定与氧化还原,从而影响重金属在环境介质中的迁移。此外,微生物与矿物相互作用不仅会影响环境中重金属的氧化还原,还可以影响无机污染物的氧化还原。反硝化和DNRA(异化硝酸盐还原成铵)是硝酸盐在水沉积物中迁移和转化的主要过程。Liu等人^[108]报道磁铁矿与硝酸盐还原菌的相互作用促进了硝酸盐的反硝化和DNRA过程,该促进作用可归因于:(1)磁铁矿改变环境微生物群落,硝酸盐还原菌丰度增加;(2)磁铁矿显著增加微生物电子传递活性,有利于硝酸盐还原。

微生物与矿物相互作用对污染物迁移转化行为的影响会受到环境因素、菌-矿相互作用机制、污染物自身特性以及菌、矿理化性质的影响。微生物种类繁多,不同种类的微生物和矿物相互作用可能存在差异,导致对污染物迁移转化的影响也会有所差异。Gan等人^[106]发现相较于氧化亚铁硫杆菌,氧化硫硫杆菌与黄铁矿体系对Cr(VI)的还原效率最大,是氧化亚铁硫杆菌与黄铁矿体系的4.5倍。同时,同一菌株与不同矿物作用,对污染物的还原效果也存在着显著差异。高岭石和蛭石介导下,铜绿假单胞菌对Cr(VI)的生物还原程度不同,蛭石对Cr(VI)生物还原的促进作用最强,其次是高岭石^[107]。Cheng等人^[109]发现矿物与细胞含量比值较低时,赤铁矿可通过吸附Cr(VI)和细菌细胞于矿物表面,促进Cr(VI)的生物还原,而比值较高时,赤铁矿颗粒可能会覆盖细胞表面,影响Cr(VI)的生物还原,导致Cr(VI)去除率随着赤铁矿颗粒的增加而降低。外界环境因素也是影响菌-矿协同下污染物迁移转化的重要因素。pH和温度会通过影响微生物的生长代谢,进而影响菌-矿体系介导下污染物的迁移转化^[110]。Li等人^[111]研究了温度、pH以及不同初始Cr(VI)浓度对铜绿假单胞菌-针铁矿复合体转化Cr(VI)水平的影响,结果表明随

着pH和初始Cr(VI)浓度的增加,菌-矿复合体对Cr(VI)的去除效率逐渐降低,归因于碱性条件和Cr(VI)的毒害作用不利于细菌正常生长;但是在一定温度范围内(20~45°C),随着温度升高,Cr(VI)的去除效率逐渐升高,这是因为较高的温度可以促进针铁矿对Cr(VI)的吸附和铁离子的溶解,维持细菌正常生长代谢。此外,重金属在环境中的迁移转化还受矿物表面的物理性质以及矿物组分转化沉淀的影响^[112]。Franzblau等人^[113]发现,细菌与矿物相互作用过程中生物氧化铁矿物的形成有利于更多的Cu(II)还原为Cu(I),因此可知矿物组分转化沉淀也会影响重金属在环境中的转化。

3 展望

综上所述,微生物与矿物相互作用的环境效应及其实际应用是目前的研究热点。微生物-矿物相互作用通常可强化重金属(Cr、As等)氧化还原及其固定效果,促进污染物的降解,以及在碳循环、氮循环等元素循环中发挥重要作用。尽管目前微生物与矿物相互作用及其环境效应方面已取得较大进展,但是矿物-微生物-污染物三者之间的研究大多集中在表观现象层面。虽

已研究多种微生物与矿物作用的方式与机理,但在分子或原子水平上的详细作用机制仍存在知识空白,且目前研究多集中于实验室简化下的环境条件开展,无法真实准确反映自然环境条件下微生物与矿物的复杂相互作用。此外,实验使用的微生物多为常见种属或模式微生物,而自然环境中微生物种类繁多,所以微生物与矿物相互作用尚未得到充分研究。

未来可从以下方面开展深入研究:(1)在分子水平探究不同种类微生物与矿物的作用机制差异,并且深入研究这种差异对微生物-矿物系统介导下污染物环境行为的影响机制。(2)打破传统地质学、环境科学和微生物独立研究的学科壁垒,整合矿物与微生物生态学,深入研究微生物对矿物胁迫下的分子响应与调控机制,并且从分子角度进一步明确微生物对矿物理化性质的影响机制。(3)对微生物与矿物相互作用及其环境效应的研究不仅局限于实验室模拟实验,可以拓宽至自然环境介质,建立实验室模拟实验和实际自然环境观察分析的有机联系,通过长时间、大规模的模拟结合机器学习等数据分析方法获得真实的矿物-微生物相互作用机制及其对污染物环境行为的影响。

参考文献

- 1 Dong H L, Zeng Q, Liu D, et al. Interactions between clay minerals and microbes: Mechanisms and applications in environmental remediation (in Chinese). *Earth Sci Front*, 2024, 31: 467–485 [董海良, 曾强, 刘邓, 等. 黏土矿物-微生物相互作用机理以及在环境领域中的应用. *地学前缘*, 2024, 31: 467–485]
- 2 Xie S C, Yang H, Luo G M, et al. Geomicrobial functional groups: A window on the interaction between life and environments (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2012, 57: 3–22 [谢树成, 杨欢, 罗根明, 等. 地质微生物功能群: 生命与环境相互作用的重要突破口. *科学通报*, 2012, 57: 3–22]
- 3 Moore E K, Jelen B I, Giovannelli D, et al. Metal availability and the expanding network of microbial metabolisms in the Archaean eon. *Nat Geosci*, 2017, 10: 629–636
- 4 Dong H, Huang L, Zhao L, et al. A critical review of mineral–microbe interaction and co-evolution: Mechanisms and applications. *Natl Sci Rev*, 2022, 9: nwac128
- 5 Liu X, Lai P M W, Zhang M et al. Microbe-mineral interactions: Mechanisms and immobilization effect toward heavy metals (in Chinese). *Environ Chem*, 2024, 43: 377–392 [刘洵, 赖潘民旺, 张敏, 等. 微生物-矿物相互作用: 机制与重金属固定效应. *环境化学*, 2024, 43: 377–392]
- 6 Wu Z J, Jia L, Yuan L X, et al. Biomineralization process occurring in iron mud of coastal seepage area of Zhoushan Island, Zhejiang Province (in Chinese). *Chin Sci Bull*, 2008, 53: 703–712 [吴自军, 贾楠, 袁林喜, 等. 浙江舟山海岸带渗漏水沉淀铁泥中的微生物矿化作用. *科学通报*, 2008, 53: 703–712]
- 7 Ta K, Peng X, Chen S, et al. Hydrothermal nontronite formation associated with microbes from low-temperature diffuse hydrothermal vents at the South Mid-Atlantic Ridge. *JGR BioGeosci*, 2017, 122: 2375–2392
- 8 Feng Y Q, Hao L K, Guo Y, et al. Spatio-temporal evolution characteristics of microbiome in acid mine drainage and microbial-mineral interaction mechanism (in Chinese). *Ecol Environ*, 2022, 31: 1032–1046 [冯乙晴, 郝立凯, 郭圆, 等. 酸性矿山废水微生物组时空演变特征及微生物-矿物互作机制. *生态环境学报*, 2022, 31: 1032–1046]
- 9 Saavedra A, García-Meza J V, Cortón E, et al. Attachment of *Leptospirillum* sp. to chemically modified pyrite surfaces. Fast and simple electrochemical monitoring of bacterial-mineral interactions. *Hydrometallurgy*, 2021, 199: 105534
- 10 Kompantseva E I, Naimark E B, Boeva N M, et al. Interaction of anoxygenic phototrophic bacteria *Rhodospseudomonas* sp. with kaolinite. *Microbiology*, 2013, 82: 316–326

- 11 Song J, Lin J, Ren Y, et al. Competitive adsorption of binary mixture of *Leptospirillum ferriphilum* and *Acidithiobacillus caldus* onto pyrite. *Biotechnol Bioproc E*, 2010, 15: 923–930
- 12 Hong Z, Rong X, Cai P, et al. Effects of temperature, pH and salt concentrations on the adsorption of *Bacillus subtilis* on soil clay minerals investigated by microcalorimetry. *GeoMicrobiol J*, 2011, 28: 686–691
- 13 Wu H, Chen W, Rong X, et al. Soil colloids and minerals modulate metabolic activity of *Pseudomonas putida* measured using microcalorimetry. *GeoMicrobiol J*, 2014, 31: 590–596
- 14 Wang H, Wu P, Liu J, et al. The regulatory mechanism of *Chryseobacterium* sp. resistance mediated by montmorillonite upon cadmium stress. *Chemosphere*, 2020, 240: 124851
- 15 Wang X, Yuan W, Tao J, et al. Interactions between *Escherichia coli* survival and manganese and iron oxides in water under freeze-thaw. *Environ Pollution*, 2021, 268: 115237
- 16 Cardoso R, Borges I, Vieira J, et al. Interactions between clay minerals, bacteria growth and urease activity on biocementation of soils. *Appl Clay Sci*, 2023, 240: 106972
- 17 Abdel-Khalek N, el-sayed S, Selim K, et al. Interaction between kaolinite and *Staphylococcus gallinarum* bacteria. *J Min World Express*, 2014, 3: 21825–21830
- 18 Jaisi D P, Eberl D D, Dong H, et al. The formation of illite from nontronite by mesophilic and thermophilic bacterial reaction. *Clays clay miner*, 2011, 59: 21–33
- 19 Liu D, Wang F, Dong H, et al. Biological reduction of structural Fe(III) in smectites by a marine bacterium at 0.1 and 20 MPa. *Chem Geol*, 2016, 438: 1–10
- 20 Bingjie O, Xiancai L, Huan L, et al. Reduction of jarosite by *Shewanella oneidensis* MR-1 and secondary mineralization. *Geochim Cosmochim Acta*, 2014, 124: 54–71
- 21 Ren X, Li F, Cai Y, et al. *Paenibacillus* sp. Strain SB-6 induces weathering of Ca-montmorillonite: Illitization and formation of calcite. *GeoMicrobiol J*, 2017, 34: 1–10
- 22 Wang S, Hu X, Yu F, et al. Microbe regulates the mineral photochemical activity and organic matter compositions in water. *Water Res*, 2022, 225: 119164
- 23 Playter T, Konhauser K, Owttrim G, et al. Microbe-clay interactions as a mechanism for the preservation of organic matter and trace metal biosignatures in black shales. *Chem Geol*, 2017, 459: 75–90
- 24 Ruan B, Wu P, Liu J, et al. Adhesion of *Sphingomonas* sp. GY2B onto montmorillonite: A combination study by thermodynamics and the extended DLVO theory. *Colloids Surfs B-Biointerfaces*, 2020, 192: 111085
- 25 Ruan B, Wu P, Wang H, et al. Effects of interaction between montmorillonite and *Sphingomonas* sp. GY2B on the physical and chemical properties of montmorillonite in the clay-modulated biodegradation of phenanthrene. *Environ Chem*, 2018, 15: 296–305
- 26 Keil R G, Montluçon D B, Prah F G, et al. Sorptive preservation of labile organic matter in marine sediments. *Nature*, 1994, 370: 549–552
- 27 Zhang L, Hu Y, Han F, et al. Influences of multiple clay minerals on the phosphorus transport driven by *Aspergillus niger*. *Appl Clay Sci*, 2019, 177: 12–18
- 28 Rong X, Huang Q, He X, et al. Interaction of *Pseudomonas putida* with kaolinite and montmorillonite: A combination study by equilibrium adsorption, ITC, SEM and FTIR. *Colloids Surfs B-Biointerfaces*, 2008, 64: 49–55
- 29 Li X, Yu Y, Li Y, et al. Molecular mechanism of increasing extracellular polysaccharide production of *Paenibacillus mucilaginosus* K02 by adding mineral powders. *Intl Biodeterior Biodegrad*, 2022, 167: 105340
- 30 Cao W Z, Zhu Y, Lu A H, et al. An experimental study on interactions of two dissimilatory iron reducing bacteria with smectite. *Bull Min Petrol Geochem*, 2011, 30: 311–316
- 31 Zhao L, Dong H, Edelman R E, et al. Coupling of Fe(II) oxidation in illite with nitrate reduction and its role in clay mineral transformation. *Geochim Cosmochim Acta*, 2017, 200: 353–366
- 32 Yang X, Li Y, Li Y, et al. Microbially induced clay weathering: Smectite-to-kaolinite transformation. *Am Miner*, 2023, 108: 1940–1947
- 33 Shelobolina E S, VanPraagh C G, Lovley D R. Use of ferric and ferrous iron containing minerals for respiration by *Desulfitobacterium frappieri*. *GeoMicrobiol J*, 2003, 20: 143–156
- 34 Lamérand C, Shirokova L S, Bénézet P, et al. Olivine dissolution and hydrous Mg carbonate and silicate precipitation in the presence of microbial consortium of photo-autotrophic and heterotrophic bacteria. *Geochim Cosmochim Acta*, 2020, 268: 123–141
- 35 Hermansson M. The DLVO theory in microbial adhesion. *Colloids Surfs B-Biointerfaces*, 1999, 14: 105–119
- 36 San Martín F, Aguilar C. Study of the adhesion mechanism of *Acidithiobacillus ferrooxidans* to pyrite in fresh and saline water. *Minerals*, 2019, 9: 306
- 37 Zhang D C, Wang T, Hou Z X, et al. Mechanism of microorganism regulating mineral surface properties (in Chinese). *Clean Coal Technol*, 2013, 19: 5–9, 23 [张东晨, 王涛, 侯志翔, 等. 矿物表面性质生物调节机理的研究. *洁净煤技术*, 2013, 19: 5–9, 23]

- 38 Shroll R M, Straatsma T P. Molecular basis for microbial adhesion to geochemical surfaces: Computer simulation of *Pseudomonas aeruginosa* adhesion to goethite. *Biophys J*, 2003, 84: 1765–1772
- 39 Rong X M, Huang Q Y, Chen W L, et al. Surface thermodynamical analysis of adsorption of bacteria on two soil clay minerals (in Chinese). *Acta Pedol Sin*, 2011, 48: 331–337 [荣兴民, 黄巧云, 陈雯莉, 等. 细菌在两种土壤矿物表面吸附的热力学分析. *土壤学报*, 2011, 48: 331–337]
- 40 Ehrlich H L. How microbes influence mineral growth and dissolution. *Chem Geol*, 1996, 132: 5–9
- 41 Lovley D R, Stolz J F, Nord Jr G L, et al. Anaerobic production of magnetite by a dissimilatory iron-reducing microorganism. *Nature*, 1987, 330: 252–254
- 42 Myers C R, Nealson K H. Bacterial manganese reduction and growth with manganese oxide as the sole electron acceptor. *Science*, 1988, 240: 1319–1321
- 43 Liu J, Sun Y, Lu A, et al. Extracellular electron transfer of electrochemically active bacteria community promoted by semiconducting minerals with photo-response in marine euphotic zone. *GeoMicrobiol J*, 2021, 38: 329–339
- 44 Jiao Y, Kappler A, Croal L R, et al. Isolation and characterization of a genetically tractable photoautotrophic Fe(II)-oxidizing bacterium, *Rhodopseudomonas palustris* strain TIE-1. *Appl Environ Microbiol*, 2005, 71: 4487–4496
- 45 Kato S, Hashimoto K, Watanabe K. Microbial interspecies electron transfer via electric currents through conductive minerals. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2012, 109: 10042–10046
- 46 Byrne J M, Klueglein N, Pearce C, et al. Redox cycling of Fe(II) and Fe(III) in magnetite by Fe-metabolizing bacteria. *Science*, 2015, 347: 1473–1476
- 47 Zhu Y G, Duan G L, Chen B D, et al. Mineral weathering and element cycling in soil-microorganism-plant system (in Chinese). *Sci China Earth Sci*, 2014, 44: 1107–1116 [朱永官, 段桂兰, 陈保冬, 等. 土壤-微生物-植物系统中矿物风化与元素循环. *中国科学: 地球科学*, 2014, 44: 1107–1116]
- 48 Xiao B, Lian B, Sun L, et al. Gene transcription response to weathering of K-bearing minerals by *Aspergillus fumigatus*. *Chem Geol*, 2012, 306–307: 1–9
- 49 Zhu J, Yang P, Li B, et al. Microcalorimetric studies of interaction between extracellular polymeric substance and sulfide minerals. *Trans Nonfer Met Soc China*, 2008, 18: 1439–1442
- 50 Bennett P C, Rogers J R. Silicates, silicate weathering, and microbial ecology. *GeoMicrobiol J*, 2001, 18: 3–19
- 51 Fang L, Cao Y, Huang Q, et al. Reactions between bacterial exopolymers and goethite: A combined macroscopic and spectroscopic investigation. *Water Res*, 2012, 46: 5613–5620
- 52 Mendes G O, Bahri-Esfahani J, Csetenyi L, et al. Chemical and physical mechanisms of fungal bioweathering of rock phosphate. *GeoMicrobiol J*, 2021, 38: 384–394
- 53 Jiang D, Huang Q, Cai P, et al. Adsorption of *Pseudomonas putida* on clay minerals and iron oxide. *Colloids Surfs B-Biointerfaces*, 2007, 54: 217–221
- 54 Chen M, Zhang L, Gu G, et al. Effects of microorganisms on surface properties of chalcopyrite and bioleaching. *Trans Nonfer Met Soc China*, 2008, 18: 1421–1426
- 55 Hong Z, Rong X, Cai P, et al. Initial adhesion of *Bacillus subtilis* on soil minerals as related to their surface properties. *Eur J Soil Sci*, 2012, 63: 457–466
- 56 Jia C, Wei D, Liu W, et al. Selective adsorption of bacteria on sulfide minerals surface. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2008, 18: 1247–1252
- 57 Ams D A, Fein J B, Dong H, et al. Experimental measurements of the adsorption of *Bacillus subtilis* and *Pseudomonas mendocina* onto Fe-oxyhydroxide-coated and uncoated quartz grains. *GeoMicrobiol J*, 2004, 21: 511–519
- 58 Hong Z, Chen W, Rong X, et al. The effect of extracellular polymeric substances on the adhesion of bacteria to clay minerals and goethite. *Chem Geol*, 2013, 360–361: 118–125
- 59 Joo H W, Kwon T H, Dai S. Clay-bacteria interaction: Effect of bacterial cell density on sedimentation behavior and fabric map of kaolinite clay. *Appl Clay Sci*, 2023, 241: 106973
- 60 Wang Z, Xie X, Liu J. Experimental measurements of short-term adsorption of *Acidithiobacillus ferrooxidans* onto chalcopyrite. *Trans Nonferrous Met Soc China*, 2012, 22: 442–446
- 61 Zhou Y, Chen H, Yao J, et al. Influence of clay minerals on the *Bacillus halophilus* Y38 activity under anaerobic condition. *Appl Clay Sci*, 2010, 50: 533–537
- 62 Banfield J F, Barker W W, Welch S A, et al. Biological impact on mineral dissolution: Application of the lichen model to understanding mineral weathering in the rhizosphere. *Proc Natl Acad Sci USA*, 1999, 96: 3404–3411
- 63 Kim J, Dong H, Seabaugh J, et al. Role of microbes in the smectite-to-illite reaction. *Science*, 2004, 303: 830–832
- 64 Li G L, Zhou C H, Fiore S, et al. Interactions between microorganisms and clay minerals: New insights and broader applications. *Appl Clay Sci*, 2019, 177: 91–113

- 65 Welch S A, Vandevivere P. Effect of microbial and other naturally occurring polymers on mineral dissolution. *GeoMicrobiol J*, 1994, 12: 227–238
- 66 Barker W W, Welch S A, Chu S, et al. Experimental observations of the effects of bacteria on aluminosilicate weathering. *Am Miner*, 1998, 83: 1551–1563
- 67 Johnson D B, Yajie L, Okibe N. “Bioshrouding”—A novel approach for securing reactive mineral tailings. *Biotechnol Lett*, 2008, 30: 445–449
- 68 Biswas B, Chakraborty A, Sarkar B, et al. Structural changes in smectite due to interaction with a biosurfactant-producing bacterium *Pseudoxanthomonas kaohsiungensis*. *Appl Clay Sci*, 2017, 136: 51–57
- 69 Simões C R, Hacha R R, Merma A G, et al. On the recovery of hematite from an iron ore fine fraction by electroflotation using a biosurfactant. *Minerals*, 2020, 10: 1057
- 70 Yu C, Yu L, Mohamed A, et al. Size-dependent visible-light-enhanced Cr(VI) bioreduction by hematite nanoparticles. *Chemosphere*, 2022, 295: 133633
- 71 Li Z, Liu L, Lu X, et al. Hyphal tips actively develop strong adhesion with nutrient-bearing silicate to promote mineral weathering and nutrient acquisition. *Geochim Cosmochim Acta*, 2022, 318: 55–69
- 72 Uroz S, Kelly L C, Turpault M P, et al. The mineralosphere concept: mineralogical control of the distribution and function of mineral-associated bacterial communities. *Trends Microbiol*, 2015, 23: 751–762
- 73 Cary S C, McDonald I R, Barrett J E, et al. On the rocks: The microbiology of Antarctic Dry Valley soils. *Nat Rev Microbiol*, 2010, 8: 129–138
- 74 Cuadros J. Clay minerals interaction with microorganisms: A review. *Clay miner*, 2017, 52: 235–261
- 75 Alimova A, Katz A, Steiner N, et al. Bacteria-clay interaction: Structural changes in smectite induced during biofilm formation. *Clays clay miner*, 2009, 57: 205–212
- 76 Jones A A, Bennett P C. Mineral microniches control the diversity of subsurface microbial populations. *Geomicrobiol J*, 2014, 31: 246–261
- 77 Stotzky G. Influence of clay minerals on microorganisms: II. Effect of various clay species, homoionic clays, and other particles on bacteria. *Can J Microbiol*, 1966, 12: 831–848
- 78 Jiang Z, An N, Chu Y, et al. Growth, biofilm formation and atrazine degrading gene (trzN) expression of *Arthrobacter* sp. DNS10 cultured with montmorillonite, kaolinite and goethite. *Chemosphere*, 2022, 307: 135904
- 79 Chi Z L, Yu G H, Teng H H, et al. Molecular trade-offs between lattice oxygen and oxygen vacancy drive organic pollutant degradation in fungal biomineralized exoskeletons. *Environ Sci Technol*, 2022, 56: 8132–8141
- 80 Cai P, Huang Q, Walker S L. Deposition and survival of *Escherichia coli* O157:H7 on clay minerals in a parallel plate flow system. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 1896–1903
- 81 Asadishad B, Ghoshal S, Tufenkji N. Short-term inactivation rates of selected gram-positive and gram-negative bacteria attached to metal oxide mineral surfaces: Role of solution and surface chemistry. *Environ Sci Technol*, 2013, 47: 5729–5737
- 82 Qu C, Qian S, Chen L, et al. Size-dependent bacterial toxicity of hematite particles. *Environ Sci Technol*, 2019, 53: 8147–8156
- 83 Williams L B, Metge D W, Eberl D D, et al. What makes a natural clay antibacterial? *Environ Sci Technol*, 2011, 45: 3768–3773
- 84 Wong D, Suflita J M, McKinley J P, et al. Impact of clay minerals on sulfate-reducing activity in aquifers. *Microb Ecol*, 2004, 47: 80–86
- 85 Xu S, Xing Y, Liu S, et al. Co-effect of minerals and Cd(II) promoted the formation of bacterial biofilm and consequently enhanced the sorption of Cd(II). *Environ Pollut*, 2020, 258: 113774
- 86 Xing Y, Jiang Y, Liu S, et al. Surface corrosion by microbial flora enhances the application potential of phosphate rock for cadmium remediation. *Chem Eng J*, 2022, 429: 132560
- 87 Du H, Chen W, Cai P, et al. Competitive adsorption of Pb and Cd on bacteria–montmorillonite composite. *Environ Pollut*, 2016, 218: 168–175
- 88 Lu T, Xue C, Shao J, et al. Adsorption of dibutyl phthalate on *Burkholderia cepacia*, minerals, and their mixtures: Behaviors and mechanisms. *Inl Biodeter Biodegrad*, 2016, 114: 1–7
- 89 Singh N, Megharaj M, Gates W P, et al. Bioavailability of an organophosphorus pesticide, fenamiphos, sorbed on an organo clay. *J Agric Food Chem*, 2003, 51: 2653–2658
- 90 Chen X C, Chen L T, Shi J Y, et al. Immobilization of heavy metals by *Pseudomonas putida* CZ1/goethite composites from solution. *Colloids Surfs B-Biointerfaces*, 2008, 61: 170–175
- 91 Xie Z Y, Huang Q Y, Huang M. Influence of heavy metal-resistant bacterium on the adsorption of cd in soil colloid and minerals (in Chinese). *Hubei Agric Sci*, 2010, 49: 855–858 [谢朝阳, 黄巧云, 黄敏. 耐重金属细菌对土壤胶体及矿物体系吸附镉的影响. 湖北农业科学, 2010, 49: 855–858]
- 92 Xie Z Y, Huang Q Y, Huang M, et al. Influence of heavy metal-resistant bacterium on the adsorption of Cu^{2+} in soil colloid and minerals (in Chinese). *Hubei Agric Sci*, 2006, (5): 587–592 [谢朝阳, 黄巧云, 黄敏, 等. 耐重金属细菌对土壤胶体矿物体系吸附铜的影响. 湖北农业科学, 2006, (5): 587–592]
- 93 Walker S G, Flemming C A, Ferris F G, et al. Physicochemical interaction of *Escherichia coli* cell envelopes and *Bacillus subtilis* cell walls with two clays and ability of the composite to immobilize heavy metals from solution. *Appl Environ Microbiol*, 1989, 55: 2976–2984

- 94 Alessi D S, Fein J B. Cadmium adsorption to mixtures of soil components: Testing the component additivity approach. *Chem Geol*, 2010, 270: 186–195
- 95 Qu C, Du H, Ma M, et al. Pb sorption on montmorillonite-bacteria composites: A combination study by XAFS, ITC and SCM. *Chemosphere*, 2018, 200: 427–436
- 96 Wang Z, Sheng H, Xiang L, et al. Different performance of pyrene biodegradation on metal-modified montmorillonite: Role of surface metal ions from a bioelectrochemical perspective. *Sci Total Environ*, 2022, 805: 150324
- 97 Tao K, Zhao S, Gao P, et al. Impacts of *Pantoea agglomerans* strain and cation-modified clay minerals on the adsorption and biodegradation of phenanthrene. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2018, 161: 237–244
- 98 Chang L, Yu G, Liu C. Interfacial processes and mechanisms of synergistic degradation of dichlorobiphenyl by white rot fungi and magnetite nanoparticles. *Sci China Earth Sci*, 2023, 66: 2057–2065
- 99 Chen H, He X, Rong X, et al. Adsorption and biodegradation of carbaryl on montmorillonite, kaolinite and goethite. *Appl Clay Sci*, 2009, 46: 102–108
- 100 Gan X, Teng Y, Zhao L, et al. Influencing mechanisms of hematite on benzo(a)pyrene degradation by the PAH-degrading bacterium *Paracoccus* sp. strain HPD-2: Insight from benzo(a)pyrene bioaccessibility and bacteria activity. *J Hazard Mater*, 2018, 359: 348–355
- 101 Quintelas C, Costa F, Tavares T. Bioremoval of diethylketone by the synergistic combination of microorganisms and clays: Uptake, removal and kinetic studies. *Environ Sci Pollut Res*, 2013, 20: 1374–1383
- 102 Froehner S, Cardoso da Luz E, Maceno M. Enhanced biodegradation of naphthalene and anthracene by modified vermiculite mixed with soil. *Water Air Soil Pollut*, 2009, 202: 169–177
- 103 Qu C, Chen W, Hu X, et al. Heavy metal behaviour at mineral-organo interfaces: Mechanisms, modelling and influence factors. *Environ Int*, 2019, 131: 104995
- 104 Parikh S J, Lafferty B J, Meade T G, et al. Evaluating environmental influences on As^{III} oxidation kinetics by a poorly crystalline mn-oxide. *Environ Sci Technol*, 2010, 44: 3772–3778
- 105 Gan M, Gu C, Ding J, et al. Hexavalent chromium remediation based on the synergistic effect between chemoautotrophic bacteria and sulfide minerals. *Ecotoxicol Environ Saf*, 2019, 173: 118–130
- 106 Gan M, Li J, Sun S, et al. Synergistic effect between sulfide mineral and acidophilic bacteria significantly promoted Cr(VI) reduction. *J Environ Manage*, 2018, 219: 84–94
- 107 Kang C, Wu P, Li Y, et al. Understanding the role of clay minerals in the chromium(VI) bioremoval by *Pseudomonas aeruginosa* CCTCC AB93066 under growth condition: Microscopic, spectroscopic and kinetic analysis. *World J Microbiol Biotechnol*, 2015, 31: 1765–1779
- 108 Liu Y, Wan Y, Ma Z, et al. Effects of magnetite on microbially driven nitrate reduction processes in groundwater. *Sci Total Environ*, 2023, 855: 158956
- 109 Cheng H, Jing Z, Yang L, et al. Sunlight-triggered synergy of hematite and *Shewanella oneidensis* MR-1 in Cr(VI) removal. *Geochim Cosmochim Acta*, 2021, 305: 19–32
- 110 Wang Y, Liu X, Si Y, et al. Release and transformation of arsenic from As-bearing iron minerals by Fe-reducing bacteria. *Chem Eng J*, 2016, 295: 29–38
- 111 Li Y, Wang H, Wu P, et al. Bioreduction of hexavalent chromium on goethite in the presence of *Pseudomonas aeruginosa*. *Environ Pollution*, 2020, 265: 114765
- 112 Flemming C A, Ferris F G, Beveridge T J, et al. Remobilization of toxic heavy metals adsorbed to bacterial wall-clay composites. *Appl Environ Microbiol*, 1990, 56: 3191–3203
- 113 Franzblau R E, Daughney C J, Swedlund P J, et al. Cu(II) removal by *Anoxybacillus flavithermus*–iron oxide composites during the addition of Fe (II)aq. *Geochim Cosmochim Acta*, 2016, 172: 139–158

补充材料

表S1 微生物与矿物协同作用对污染物的环境行为的部分研究

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “微生物与矿物相互作用对污染物环境行为的影响”

Effects of microbe-mineral interaction on the environmental behaviors of coexisting pollutants: a review

Lijia Zhu^{1,2}, Ling Ding^{1,2*}, Xinran Qiu^{1,2}, Xujun Liang^{1,2} & Xuetao Guo^{1,2*}

¹ College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

² Shaanxi Key Laboratory of Agricultural and Forestry Carbon Sequestration and Pollution Control in Arid and Semi-arid Region, Yangling 712100, China

* Corresponding authors, E-mail: dingling@nwfau.edu.cn; guoxuetao2005@nwfau.edu.cn

Minerals, as an important component of the Earth, are widely present in the environment and play a positive role in environmental governance and protection. Microorganisms, as the earliest living organisms on Earth, are the foundation of life and play an important role in the carbon, nitrogen, phosphorus, and sulfur cycles. Since the origin of life on Earth, minerals and microorganisms have exhibited coevolution over time, which has a profound impact on geological and environmental processes. At present, researches on the interaction between microorganisms and minerals mainly focus on the following four aspects: (1) adsorption of microorganisms on mineral surfaces; (2) Feedback and adaptation mechanisms of microorganisms to mineral stress; (3) the influence of microorganisms on the surface properties and morphological structure of minerals and (4) the environmental significance of the interaction between microorganisms and minerals. In summary, microorganisms and minerals interact through mechanisms such as adsorption, electron transfer, proton exchange, chelation, biomechanics, and biochemistry. In the process of interaction, minerals can provide protection and nutrition for microorganisms, improve their resistance to external pressure and interference, promote their metabolic processes, and may also have toxic effects on microorganisms by releasing metal elements, thus affecting the physiological activity of microorganisms. Meanwhile, microorganisms can, in turn, change the physicochemical properties and structure of minerals through dissolution and transformation. In practical environments, the interaction between microorganisms and minerals not only changes the metabolic pathways of microorganisms and the chemical stability of minerals, but also affects the environmental behavior of energy flow, element cycling, and coexisting pollutants, which is of great significance in resource recovery, environmental remediation, and carbon cycling. Therefore, the interaction between microorganisms and minerals is one of the core research topics in the field of environmental science. Although significant progresses have been made in the interaction between microorganisms and minerals as well as their environmental effects, researches on the interaction between minerals, microorganisms, and pollutants have mostly focuses on reaction processes with a lack of mechanistic studies. Exploration in this field is still in its infancy, and existing researches still have limitations. For instance, most studies are conducted under simplified environmental conditions at the laboratory scale, which cannot accurately reflect the complex interactions between microorganisms and minerals under natural environmental conditions. The detailed mechanisms governing the interactions between microorganisms and minerals at the molecular or atomic level remain largely unexplored. In addition, current researches mainly focus on the effects of mineral-microbe interaction on the transformation of heavy metals and the degradation of benzene derivatives, with less research on other types of pollutants. Therefore, future researches are warranted to (1) explore the differences in mechanisms governing mineral-microbe interaction at microscopic level through omics techniques and molecular dynamics simulations, (2) extend experimental observations from laboratory scale to full scale via field studies, and (3) promote the application of mineral-microbe interactions in pollutant treatment through practical environmental remediation projects.

In summary, this review summarizes the state-of-art of the interaction between microorganisms and minerals as well as the underlying mechanisms. How microbe-mineral interaction affects the environmental behaviors of coexisting pollutants and their potential applications in environmental remediation are then reviewed and discussed. The knowledge gaps of current researches were analyzed followed by a summarization of future prospect. This review will contribute to a deep understanding of the relationship between microorganisms and minerals as well as their impact on the environmental behaviors of pollutants. This review will also provide theoretical support for the sustainable remediation of contaminated environments.

mineral, microorganisms, interaction, pollutants, environmental behavior

doi: [10.1360/TB-2024-0741](https://doi.org/10.1360/TB-2024-0741)