中国科学: 地球科学 2023 年 第 53 卷 第 9 期: 2196 ~ 2198
SCIENTIA SINICA Terrae earthcn.scichina.com
《中国科学》杂志社 SCIENCE CHINA PRESS

点 评

真菌与矿物协同降解有机污染物的新认识

董海良*

中国地质大学(北京)地质微生物与生物地球化学研究中心, 生物地质与环境地质国家重点实验室, 北京 100083
* 通讯作者, E-mail: dongh@cugb.edu.cn

收稿日期: 2023-07-18; 收修改稿日期: 2023-07-24; 接受日期: 2023-07-31; 网络版发表日期: 2023-08-07

土壤污染和其他生态环境问题已经成为严重影响人类健康和经济社会可持续发展的瓶颈. 近年来, 土壤有机污染问题日益突显, 引起了社会的广泛关注, 同时也成为科研界的热点问题. 在新时代, 国家对于生态文明和地球宜居环境的迫切需求为深入研究和发展土壤污染修复带来了新的机遇和挑战, 迫切需要开展与土壤污染防治、地球宜居性等重要议题和国家需求相关的研究.

全球土壤中存在着约120亿吨的真菌生物量, 几乎是土壤中细菌数量的两倍(Bar-On等, 2018). 土壤中植物根际的真菌菌丝长度可高达800km/kg(Whitfield, 2007). 据估计, 仅在地球表层10cm的土壤中, 植物根部附近的真菌菌丝的累计长度就可达到4.5×10^{17}km, 并且菌丝的表面积约为地球陆地面积的2.5倍(Leake和Read, 2017). 在近10亿年的进化中, 真菌已经发展出多种生物功能, 包括降解有机物质、获取磷养分和与其他生物的共生等能力(Bonneville等, 2020). 通常, 真菌通过分泌胞外酶和产生孢子等方式来应对有机污染物对环境带来的压力. 然而, 自从地球进入“人类世”以来, 由于人类合成有机污染物的急剧增加(Elhacham等, 2020), 学者对真菌的进化以及其快速降解新型有机污染物、适应环境胁迫的机制尚不清楚.

矿物在污染物迁移转化中发挥着重要作用(张晓文等, 2023). 矿物对于微生物提供了一种“庇护所”, 能够抵挡强紫外线、磨蚀和温度波动等物理伤害; 此外, 矿物还能够缓冲强酸、强碱等化学危害, 为微生物创造更适宜的微环境(Dong等, 2022). 由此可见, 在实际土壤中, 真菌缓解环境胁迫的机制比过去所认识的更加复杂. 矿物的存在为真菌提供了一种重要的保护和支持, 使它们能够在恶劣的环境条件下生存和繁殖. 进一步研究矿物-真菌互作机制将有助于我们更好地理解土壤生态系统中微生物的适应能力和生存策略.

日前, 常乐等(2023)的研究论文针对“真菌是如何利用矿物协同降解有机污染物、从而缓解环境胁迫”这一关键科学问题, 该作者团队以4,4′-二氯联苯(PCB15)为模式有机污染物, 构建了黄孢原毛平革菌与磁铁矿共培养体系, 综合应用纳米酶、同步辐射红外显微成像和X射线光电子能谱(XPS)等手段, 深入探讨了真菌与磁铁矿协同降解有机污染物的界面过程与机制. 为了回答这一科学问题, 研究团队分别进行了单独真菌培养、单独矿物培养和真菌+矿物共培养体系的研究. 研究发现, 尽管黄孢原毛平革菌本身具有一定的有机污染物降解能力, 但添加磁铁矿显著促进了有机污染物的降解. 这一发现有力支持了“真菌-磁铁矿协同作用促进有机污染物降解”的科学假说. 对于揭示土壤环境中微生物的降解机制, 以及进一步开发高效的环境修复技术具有重要意义.

微生物与矿物相互作用及其界面反应对土壤中有机污染物的行为有深远影响, 也决定了土壤的健康和质量. 因此, 土壤微生物-矿物界面过程是土壤甚至整

中文引用格式: 董海良. 2023. 真菌与矿物协同降解有机污染物的新认识. 中国科学: 地球科学, 53(9): 2196–2198, doi: 10.1360/SSTe-2023-0158
英文引用格式: Dong H. 2023. New insights into the synergistic degradation of organic pollutants by white rot fungi and minerals. Science China Earth Sciences, 66(9): 2166–2168, https://doi.org/10.1007/s11430-023-1157-0

© 2023 《中国科学》杂志社

个关键带的核心过程，也是揭示表层地球系统中污染物降解的重要前沿科学问题. 该研究团队利用上海光源的同步辐射红外显微成像(SR-FTIR)技术, 成功识别了矿物与菌丝的空间分布特征，并指出矿物颗粒与菌丝紧密黏附是微生物-矿物界面过程发生的关键. 同时，真菌胞外聚合物(EPS)在微生物-矿物界面过程中起到了重要的媒介作用. EPS不仅保护了真菌细胞, 还促进了真菌与矿物之间的界面反应，成为真菌有效降解有机污染物的物质基础.

土壤中有机污染物的转化涉及微生物、化学以及微生物-化学耦合等众多过程. 如何解析土壤中有机污染物的生物地球化学过程是土壤学、环境科学和地质微生物学等多个学科交叉的前沿研究主题. 在这方面的工作中，研究团队首次观察到黄孢原毛平革菌增强了附着在菌丝上的磁铁矿的纳米酶活性，从而有效降解了4,4′-二氯联苯. 进一步研究中, 研究团队利用XPS技术解析了菌矿培养过程中矿物表面(2~10nm)结构的演变特征, 揭示了“磁铁矿纳米酶活性主要由矿物表面的氧空位(而非铁)主导”的机制. 这些表面氧空位点主要被吸附氧占据, 包括羟基-OH及其吸附水. 因此, 真菌通过生物矿化作用(Dong等, 2022)“激活”了矿物表面氧空位的形成，进而促进了矿物纳米酶活性的提升和有机污染物的降解. 这些研究结果对于我们理解土壤中有机污染物的转化过程具有重要意义.

常乐等(2023)提出了真菌-矿物协同降解有机污染物的创新过程(图1). 该过程包括以下步骤: (1) 矿物纳米颗粒展现出类似酶的作用, 被称为“纳米酶”, 并在真菌菌丝表面形成一个疏松多孔的“人工孢子”外壳(Chi等, 2022); (2) 这个“人工孢子”结构中独特的纳米-生物界面不仅阻止了真菌菌丝与污染物的直接接触，而且展现出类似酶的作用，产生高度氧化性的羟基自由基, 从而高效降解有机污染物; (3) 在这个过程中，矿物纳米酶不仅通过减轻真菌体内的氧化应激压力，还减少了真菌自身分泌胞外酶所消耗的能量. 总的来说，真菌通过生物矿化作用“激活”矿物表面的氧空位，进而促进矿物纳米酶的活性和有机污染物的降解过程.

作为表层地球系统的核心过程之一，土壤矿物-微生物互作机制与界面过程面临着与地球宜居性密切相关的重大问题的交叉融合. 为了取得突破性的原创性成果, 迫切需要发展先进的矿物-微生物协同过程表征方法，以获得土壤污染修复过程的新科学证据和新科学认知. 常乐等(2023)的创新性认识和观点有助于揭示真菌在抗逆性和适应极端环境方面的强大能力，同时为进一步理解场地土壤中真菌介导的有机污染物降解过程提供了新观点和认知. 未来的研究需要加强土壤学、环境科学和地质微生物等多学科的交叉融合, 从矿物-微生物界面的角度系统揭示表层地球系统中物质循环与能量交换的新机制. 这将有助于寻求学科的新增长点，并形成国际领先的研究方向，为地球宜居性、区域环境生态可持续性和土壤污染防治等国家重大需求提供理论支持.

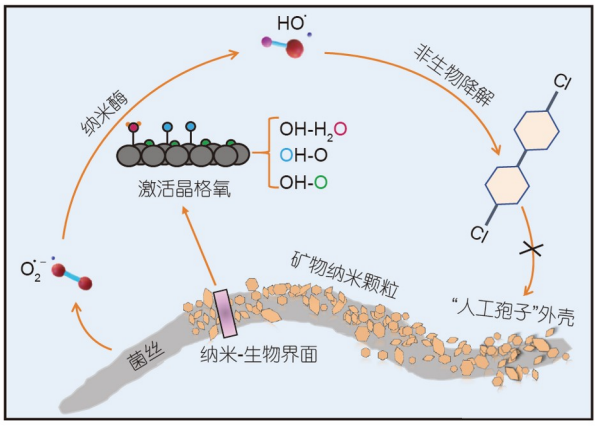


图 1　(网络版彩图)真菌-矿物协同降解有机污染物的示意图
据常乐等(2023)绘制

参考文献

常乐, 余光辉, 刘丛强. 2023. 白腐真菌-磁铁矿协同降解二氯联苯的界面过程与机制. 中国科学: 地球科学, 53(9): 2085–2093

张晓文, 刘焱, 郭东毅, 董海良, 王海纳. 2023. 黏土矿物对病毒生物地球化学作用的影响探讨与展望. 科学通报, 68: 87–99

Bar-On Y M, Phillips R, Milo R. 2018. The biomass distribution on Earth. Proc Natl Acad Sci USA, 115: 6506–6511

Bonneville S, Delpomdor F, Préat A, Chevalier C, Araki T, Kazemian M, Steele A, Schreiber A, Wirth R, Benning L G. 2020. Molecular identification of fungi microfossils in a Neoproterozoic shale rock. Sci Adv, 6: eaax7599

Chi Z L, Yu G H, Kappler A, Liu C Q, Gadd G M. 2022. Fungal-mineral interactions modulating intrinsic peroxidase-like activity of iron nanoparticles: Implications for the biogeochemical cycles of nutrient elements and attenuation of contaminants. Environ Sci Technol, 56: 672–680

Dong H, Huang L, Zhao L, Zeng Q, Liu X, Sheng Y, Shi L, Wu G, Jiang H, Li F, Zhang L, Guo D, Li G, Hou W, Chen H. 2022. A

critical review of mineral–microbe interaction and co-evolution: Mechanisms and applications. Natl Sci Rev, 9: nwac128

Elhacham E, Ben-Uri L, Grozovski J, Bar-On Y M, Milo R. 2020. Global human-made mass exceeds all living biomass. Nature, 588: 442–444

Leake J R, Read D J. 2017. Chapter 2—Mycorrhizal Symbioses and Pedogenesis Throughout Earth's History. In: Johnson N C, Gehring C, Jansa J, eds. Mycorrhizal Mediation of Soil. Elsevier. 9–33

Whitfield J. 2007. Fungal roles in soil ecology: Underground networking. Nature, 449: 136–138

(责任编委: 朱茂炎)