

硫化汞纳米颗粒的微生物摄入及其在汞甲基化过程中的作用研究

硫化汞 (HgS) 是水环境中汞重要的汇。在天然环境中, HgS 通常以不同尺寸大小的颗粒形态存在, 且粒径大小对其环境行为(如生物有效性)有着至关重要的作用。近年来研究发现, HgS 纳米颗粒 (HgS_{NP}) 在环境中普遍存在, 且其甲基化能力远高于大粒径 HgS 颗粒。在某些环境如稻田土壤中, HgS_{NP} 的甲基化能力甚至与溶解态 Hg²⁺ 相当。因此, HgS_{NP} 逐渐受到人们的关注。但目前对于 HgS_{NP} 与汞甲基化细菌相互作用的过程并不清楚。近日, 中国科学院生态环境研究中心阴永光研究员团队发现了汞甲基化微生物通过“特洛伊木马”机制摄入 HgS_{NP} 继而导致其生物有效性增强(图 1), 研究成果发表在《ACS Nano》上 (10.1021/acsnano.2c05657)。全文链接: <https://doi.org/10.1021/acsnano.2c05657>。

该研究以汞甲基化细菌 *Geobacter sulfurreducens* PCA 为模型, 通过总汞分析、尺寸排阻色谱 (size exclusive chromatography, SEC)-电感耦合等离子体质谱 (inductively coupled plasma mass spectrometry, ICP-MS)、细胞切片-透射电镜-能量色散 X 射线谱等分析方法揭示了微生物对 HgS_{NP} 的直接摄入过程。暴露 24 小时后, *G. sulfurreducens* PCA 胞内摄入 HgS_{NP} 总量占总汞的 26%, 远高于 Hg²⁺-溶解性有机质 (dissolved organic matter, DOM) 对照组。同时 SEC-ICP-MS 手段揭示了微生物胞内硫醇可快速溶解 HgS_{NP}, 这种直接摄入-快速溶解的内化现象类似于真核细胞摄入纳米颗粒的“特洛伊木马”机制。溶解后生成的 Hg²⁺ 快速被甲基化, 导致 HgS_{NP} 的甲基化效率在暴露前期高于 Hg²⁺-DOM 对照组。此外, 该研究还发现敲除与 Hg²⁺ 甲基化直接相关的 *hgcAB* 基因并不影响 HgS_{NP} 甲基化, 提示 HgS_{NP} 的甲基化可能通过非 HgcAB 途径。考虑到环境中不含 *hgcAB* 基因微生物的普遍存在, 该发现进一步凸显了 HgS_{NP} 甲基化在环境甲基汞生成中的重要性。

总而言之, HgS_{NP} 内化机制的揭示为明晰微生物的汞甲基化过程及其关键控制因子提供科学依据, 同时也为理解微生物从天然纳米颗粒获取必需元素(如铁、锰)以及对毒性纳米颗粒的转化提供了新的视角。

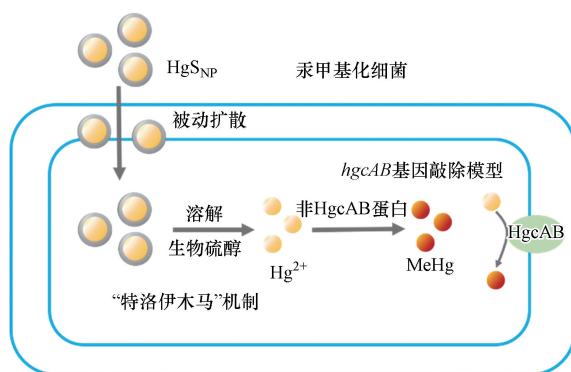


图 1 硫化汞纳米颗粒的微生物摄入及其汞甲基化