

· 专题 10: 表层地球系统生物地球化学循环及其生态环境效应 ·

## 水稻土亚铁氧化耦合砷固定的微氧型铁氧化菌作用机制

童辉<sup>1,2</sup>, 刘承帅<sup>1\*</sup>, 陈曼佳<sup>2</sup>, 李芳柏<sup>2</sup>

1. 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 550081;

2. 广东省生态环境技术研究所, 广东省农业环境综合治理重点实验室, 广州 510650

稻田是陆地表层重要的铁循环模式系统, 水稻土由于有氧-无氧条件的交替, 导致水稻土中发生周期性的氧化还原反应, 使得微生物驱动的亚铁氧化过程十分普遍 (Ratering and Schnell, 2001)。微生物亚铁氧化过程的主要产物无定形羟基氧化铁作为异化铁还原作用的理想底物, 可加速铁元素在氧化还原界面层的循环 (Kappale and Straub, 2005); 同时, 由于其具有较大的比表面积, 可通过共沉淀以及物理吸附作用控制环境中重金属 (如砷、镉等) 的迁移 (Fakih, 2011; Sun *et al.*, 2009)。在自然条件变化及人类活动的影响下, 砷可释放到环境中, 造成土壤与水体的污染。地表中砷主要以 As(III) 和 As(V) 形式存在, 其活性主要受到共沉淀及表面吸附 2 种反应制约 (Hering *et al.*, 2001)。中性环境中, 微生物亚铁氧化过程中形成的铁氧化物在很大程度上影响这 2 个反应 (Sun *et al.*, 2009), 因此, 研究嗜中性微生物类群及铁氧化成矿过程对砷的迁移转化有着重要的意义。

本研究采用铁氧反向浓度梯度管法富集培养水稻土中微好氧亚铁氧化菌, 同时在梯度管中添加 As(III) 和 As(V), 分析培养过程中微好氧亚铁氧化菌群落多样性与分布以及对砷的固定作用。富集培养结果表明, 梯度管微氧区域有明显的铁氧化带形成, 添加 As(V) 和对照管形成的铁氧化带颜色为红褐色, 添加 As(III) 的为砖黄色。在添加 As(V) 和对照管中, 微生物具有活跃的铁氧化能力, 培养 15 天后分别生成 6.29 和 3.48 mmol/L Fe-HCl, 而 As(III) 体系为 2.74 mmol/L Fe-HCl, 说明 As(III) 对微好氧亚铁氧化过程有一定的抑制作用。随着微好氧铁氧化过程进行, 半固体培养基中砷的浓度不断减少, 形

成的铁氧化物中提取出来的砷总量增加, 表明形成的铁氧化物不断地吸附固定培养基中的砷, 从而可以降低砷的生物有效性。XRD 和 XANES 结果表明添加砷和对照样品中微生物作用下形成的三价铁矿物类型均为无定形铁氧化物。南东 M 结果显示 As(V) 体系中微好氧铁氧化菌菌体形貌更加丰富, 而 As(III) 中主要呈现椭圆形, 细菌表面和周围散布着颗粒状物质, 可能是形成的无定形铁氧化物。在不添加砷的体系中, *Curvibacter*、*Cupriavidus*、*Duganella*、*Pseudomonas*、*Ralstonia* 和 *Sediminibacterium* 在群落中为优势菌属。在 As(III) 体系中, *Curvibacter*、*Cupriavidus*、*Duganella*、*Pseudomonas* 和 *Ralstonia* 为优势菌属。而在 As(V) 体系中, 优势菌属为 *Curvibacter*、*Cupriavidus*、*Polaromonas*、*Pseudomonas*、*Ralstonia*、*Sediminibacterium* 和 *Stakelama*。其中 *Curvibacter* 为典型的微氧型微生物, *Cupriavidus*、*Pseudomonas* 和 *Sediminibacterium* 为已报道的铁氧化菌。在 As(III) 体系中, 只检测到少量的 *Sediminibacterium*, 说明 As(III) 抑制了某些铁氧化菌的生长。3 种体系中优势菌属相似, 但相对丰度差异较大, PCA 结果显示 3 种体系中微生物群落结构有明显差异, 可能是砷的赋存形态影响了铁氧化菌的分布。

微好氧亚铁氧化过程中, As(III) 抑制某些铁氧化菌的生长, As(V) 对铁氧化菌的生长影响较小。微生物亚铁氧化形成的铁氧化物不仅可以吸附砷, 还可以与砷共沉淀, 从而控制砷的迁移, 降低砷的生物有效性。铁循环对砷污染的控制具有重要的意义, 本研究结果可为利用铁氧化微生物控制环境中砷的迁移提供一定的理论基础。

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目 (41603127)

第一作者简介: 童辉 (1986-), 男, 助理研究员, 研究方向: 环境土壤矿物学. E-mail: huitong@soil.gd.cn.

\* 通讯作者简介: 刘承帅 (1978-), 男, 研究员, 博士生导师, 研究方向: 环境地球化学. E-mail: liuchengshuai@vip.gyig.ac.cn.