

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第9期

Vol.36 No.9

**2015**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次

长江三角洲 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度遥感估算与时空分布特征 ..... 徐建辉, 江洪 (3119)

宁波市 PM<sub>2.5</sub> 中碳组分的时空分布特征和二次有机碳估算 ..... 杜博涵, 黄晓锋, 何凌燕, 胡敏, 王川, 任宇超, 应红梅, 周军, 汪伟峰, 许丹丹 (3128)

青岛大气中酸碱气体及 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的浓度特征和气粒平衡关系 ..... 周佳佳, 石金辉, 李丽平, 姚小红, 高会旺 (3135)

北京雾霾天大气颗粒物中微生物气溶胶的浓度及粒谱特征 ..... 胡凌飞, 张柯, 王洪宝, 李娜, 王洁, 杨文慧, 殷喆, 焦周光, 温占波, 李劲松 (3144)

2015 年春节北京市空气质量分析 ..... 程念亮, 陈添, 张大伟, 李云婷, 孙峰, 魏强, 刘嘉林, 刘保献, 孙瑞雯 (3150)

上海市大气挥发性有机化学消耗与臭氧生成的关系 ..... 王红丽 (3159)

生物滴滤塔净化氯代烃混合废气的研究 ..... 陈东之, 缪孝平, 欧阳杜娟, 叶杰旭, 陈建孟 (3168)

一种基于 GOCI 数据的叶绿素 a 浓度三波段估算模型 ..... 郭宇龙, 李云梅, 李渊, 吕恒, 刘闯, 王旭东, 张思敏 (3175)

巢湖溶解性有机物时空分布规律及其影响因素 ..... 叶琳琳, 吴晓东, 刘波, 闫德智, 张攻琪, 周阳 (3186)

河北洹河溶解性有机物光谱学特性 ..... 虞敏达, 张慧, 何小松, 檀文炳, 张媛, 马丽娜, 席北斗, 党秋玲, 高如泰 (3194)

东山岛地下水“三氮”空间分布特征 ..... 吴海燕, 傅世锋, 蔡晓琼, 汤坤贤, 曹超, 陈庆辉, 梁修雨 (3203)

重庆典型岩溶区地下河中溶解态正构烷烃、脂肪酸来源、迁移及转化 ..... 梁作兵, 孙玉川, 王尊波, 师阳, 江泽利, 张媚, 谢正兰, 廖昱 (3212)

硫酸对乌江中上游段岩溶水化学及 δ<sup>13</sup>C<sub>DIC</sub> 的影响 ..... 黄奇波, 覃小群, 刘朋雨, 张连凯, 苏春田 (3220)

阆中市思依镇水化学特征及其成因分析 ..... 张艳, 吴勇, 杨军, 孙厚云 (3230)

东南沿海河流-水库系统藻类生长营养盐限制季节变动 ..... 陈聪聪, 饶拉, 黄金良, 白敏冬 (3238)

水体氮磷营养盐水平与氯霉素浓度复合水体对苦草的生理生化影响 ..... 胡珍珍, 崔益斌, 李梅, 余静 (3248)

溶藻活性物质对棕囊藻溶藻及其脂肪酸影响的模拟 ..... 杨秋婵, 赵玲, 尹平河, 谭烁, 舒万姣, 侯少玲 (3255)

坡岸截留强化处理设施在不同运行条件下对农业面源污染物去除效果 ..... 李怀正, 陈珂莉, 危忠, 王卫刚 (3262)

典型材料屋面积尘重金属形态分布与风险评估 ..... 李敦柱, 管运涛, 刘安, 李思远 (3269)

南水北调丹江口水库水氯(胺)化消毒副产物产生特性与消毒工艺对比 ..... 张民盛, 徐斌, 张天阳, 程拓, 夏圣骥, 楚文海 (3278)

臭氧-混凝交互作用对混凝效果的影响 ..... 刘海龙, 郭雪峰, 王敏慧, 焦茹媛, 石健 (3285)

含溴水臭氧化过程阴离子对溴酸盐生成的影响 ..... 吴悦, 吴纯德, 刘吕刚, 袁博杰 (3292)

厌氧环境雌黄溶解产物形态的 XAS 研究 ..... 王莹, 许丽英, 王少锋, 肖翻, 贾永锋 (3298)

印染及染料行业废水生物处理系统中的 AOX 污染研究 ..... 申洋洋, 刘锐, 徐灿灿, 舒小铭, 许江军, 兰亚琼, 陈吕军 (3304)

螺旋霉素制药废水处理过程中耐药菌和抗性基因的转归特征 ..... 覃彩霞, 佟娟, 申佩弘, 魏源送 (3311)

两种膜生物反应器处理养猪沼液的比较研究 ..... 税勇, 川岸朋树, 宋小燕, 刘锐, 陈吕军 (3319)

农村污水膜生物反应器系统中微生物群落解析 ..... 孔晓, 崔丙健, 金德才, 吴尚华, 杨波, 邓晔, 庄国强, 庄绪亮 (3329)

四区一体反应器冬季启动脱氮特性及硝化菌群结构分析 ..... 张岩, 孙凤侠, 谢杭冀, 陈敬, 睦稀, 甘志明, 王修平, 史扬 (3339)

从亚硝酸还原厌氧氨氧化转变为硫酸盐型厌氧氨氧化 ..... 刘正川, 袁林江, 周国标, 李晶 (3345)

提高有机负荷对好氧颗粒污泥形成与稳定过程的影响 ..... 刘小鹏, 王建芳, 钱飞跃, 王琰, 陈重军, 沈耀 (3352)

常规施肥条件下农田不同途径氮素损失的原位研究, 以长江中下游地区夏玉米季为例 ..... 桑蒙蒙, 范会, 姜珊珊, 蒋静艳 (3358)

水氮组合模式对双季稻甲烷和氧化亚氮排放的影响 ..... 傅志强, 龙攀, 刘依依, 钟娟, 龙文飞 (3365)

厌氧条件下砂壤水稻土 N<sub>2</sub>、N<sub>2</sub>O、NO、CO<sub>2</sub> 和 CH<sub>4</sub> 排放特征 ..... 曹娜, 王睿, 廖婷婷, 陈诺, 郑循华, 姚志生, 张海, Klaus Butterbach-Bahl (3373)

黄土丘陵区不同有机碳背景下侵蚀坡面土壤呼吸特征 ..... 陈盖, 许明祥, 张亚锋, 王超华, 樊会敏, 王闪闪 (3383)

生物炭添加对半干旱地区土壤温室气体排放的影响 ..... 郭艳亮, 王丹丹, 郑纪勇, 赵世伟, 张兴昌 (3393)

宁南山区林地土壤原位矿化过程中碳氮转化耦合特征 ..... 倪银霞, 黄懿梅, 牛丹, 赵彤, 闫浩, 蒋跃利 (3401)

石漠化山地植被恢复过程土壤团聚体氮分布及与氮素矿化关系研究 ..... 胡宁, 马志敏, 蓝家程, 伍宇春, 陈高起, 傅瓦利, 文志林, 王文净 (3411)

江汉平原农田土壤有机碳分布与变化特点: 以潜江市为例 ..... 王玉竹, 肖和艾, 周萍, 童成立, 葛体达, 曾冠军, 吴金水 (3422)

缙云山不同土地利用方式下土壤团聚体中活性有机碳分布特征 ..... 李睿, 江长胜, 郝庆菊 (3429)

西北典型工矿型城市街道尘埃重金属污染的环境磁学响应 ..... 聂燕, 王新, 王博, 许淑婧, 高福元, 余晔, 夏敦胜, 夏听鸣 (3438)

电镀厂周边环境重金属分布特征及人体健康暴露风险评估 ..... 郭鹏然, 雷永乾, 周巧丽, 王畅, 潘佳钊 (3447)

典型电力电容器污染土壤中多氯联苯水平及特性 ..... 刘洁, 李晓东, 赵中华, 祁志福, 陈彤, 严建华 (3457)

紫色土对硫丹的吸附与解吸特征 ..... 赵炎, 郑国灿, 朱恒, 张进忠, 朱秀英, 胡淑春, 吴娅林 (3464)

紫茉莉对石油污染盐碱土壤微生物群落与石油烃降解的影响 ..... 焦海华, 崔丙健, 吴尚华, 白志辉, 黄占斌 (3471)

4 株外生菌根真菌对 Al<sup>3+</sup> 吸收与吸附的研究 ..... 王明霞, 袁玲, 黄建国, 周志峰 (3479)

长春市郊区蔬菜有机磷农药残留与健康风险评价 ..... 于锐, 刘景双, 王其存, 刘强, 王洋 (3486)

北京市北神树生活垃圾填埋场产甲烷菌的群落结构和演替规律 ..... 宋立娜, 王磊, 夏孟婧, 苏月, 李振山 (3493)

城市分散式粪便颗粒化有机肥用作叶菜肥的肥力及环境影响 ..... 吕文洲, 乔宇祥, 余宁, 史荣华, 王光明 (3501)

V<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-WO<sub>3</sub>/TiO<sub>2</sub> 催化剂与活性炭混合降解气相二噁英 ..... 任咏, 纪莎莎, 俞明峰, 李晓东, 严建华 (3508)

基于出行服务的纯电动公交车节能减排效益分析 ..... 林晓丹, 田良, 吕彬, 杨建新 (3515)

我国挥发性有机物定义和控制指标的探讨 ..... 江梅, 邹兰, 李晓倩, 车飞, 赵国华, 李刚, 张国宁 (3522)

异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响 ..... 司友斌, 王娟 (3533)

《环境科学》征订启事 (3297) 《环境科学》征稿简则 (3303) 信息 (3127, 3202, 3277, 3318)

# 异化铁还原对土壤中重金属形态转化及其有效性影响

司友斌, 王娟

(安徽农业大学资源与环境学院, 合肥 230036)

**摘要:** 铁的微生物还原是以 Fe(III) 为末端电子受体在厌氧条件下氧化有机物的产能过程, 在生物地球化学循环中起着重要的作用. 铁呼吸被认为是地球上最古老的微生物代谢形式, 与水体、土壤及沉积物中物质循环息息相关. 铁的微生物还原对土壤中重金属形态转化有显著影响, 对修复重金属及放射性核素污染的场地有着重要意义. 本文综合评述了近年来铁微生物还原研究进展, 从生态安全和可持续发展角度, 探讨了异化铁还原对重金属的形态改变及重金属污染土壤修复的潜在价值, 并对其应用前景进行客观分析. 异化铁还原对重金属形态转化的影响机制, 可初步归纳为异化铁还原对重金属的氧化还原作用、对重金属的甲基化作用、对重金属的固定作用, 其作用机制包含生物过程和化学作用的相互穿插, 值得进一步深入研究.

**关键词:** 异化铁还原; 重金属; 形态转化; 生物可给性; 土壤

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)09-3533-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.09.052

## Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil

SI You-bin, WANG Juan

(School of Resources and Environment, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)

**Abstract:** Fe(III) dissimilatory reduction by microbes is an important process of producing energy in the oxidation of organic compounds under anaerobic condition with Fe(III) as the terminal electron acceptor and Fe(II) as the reduction product. This process is of great significance in element biogeochemical cycle. Iron respiration has been described as one of the most ancient forms of microbial metabolism on the earth, which is bound up with material cycle in water, soil and sediments. Dissimilatory iron reduction plays important roles in heavy metal form transformation and the remediation of heavy metal and radionuclide contaminated soils. In this paper, we summarized the research progress of iron reduction in the natural environment, and discussed the influence and the mechanism of dissimilatory iron reduction on the speciation and bioavailability of heavy metals in soil. The effects of dissimilatory iron reduction on the speciation of heavy metals may be attributed to oxidation and reduction, methylation and immobilization of heavy metals in relation to their bioavailability in soils. The mechanisms of Fe(III) dissimilatory reduction on heavy metal form transformation contain biological and chemical interactions, but the mode of interaction remains to be further investigated.

**Key words:** dissimilatory iron reduction; heavy metal; form transformation; bioavailability; soil

在自然界中厌氧环境条件下, 几乎都会发现铁还原微生物存在, 并在其介导下发生异化 Fe(III) 还原现象. 随着研究的深入, 异化铁还原的重要性逐渐为人们所认识. 异化 Fe(III) 还原可能是地球上最早的呼吸形式之一<sup>[1]</sup>, 加强异化 Fe(III) 还原研究对于揭示地球早期生命的能量代谢特征和生命进化具有重要意义.

铁氧化物是地球上分布最广的物质成分之一, 铁氧化物的表面特性所引起的土壤对重金属离子和多价含氧酸根的专性吸附, 在植物的微量营养元素供应与调节以及控制有毒有害元素进入食物链的速率方面亦起着重要作用. 有证据表明, 以胞外铁氧化物为末端电子受体的微生物异化 Fe(III) 还原有可能是最早的微生物代谢形式, 广泛存在于沉积物、土壤和地层中<sup>[2]</sup>. 异化 Fe(III) 还原菌可存在于极端环境中<sup>[3]</sup>, 嗜酸嗜热的异化铁还原菌能在恶劣生

长条件下将 Fe(III) 还原. 微生物异化 Fe(III) 还原是一个重要的生物及地球化学过程, 不仅对铁的分布以及矿物学形态产生影响, 而且变价重金属或有毒元素(如铬、汞、砷、硒、钒及铀等)在土壤厌氧环境中的形态改变与铁还原过程具有密切联系. 因此, 系统地针对重金属形态变化与铁还原的关系开展研究, 对于深入认识重金属在土壤中的毒性以及能否利用土壤生物化学过程降低重金属的危害具有重要的理论意义和实际应用价值.

### 1 铁的微生物还原

#### 1.1 铁的微生物还原过程

铁的微生物还原, 又称铁呼吸, 是指微生物以胞

收稿日期: 2015-02-26; 修订日期: 2015-04-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(40971182, 41171254, 41471405)

作者简介: 司友斌(1968~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为土壤重金属迁移转化与污染控制, E-mail: youbinsi@ahau.edu.cn

外不溶性铁氧化物为末端电子受体,通过氧化电子供体耦联Fe(III)还原,并从这一过程贮存生命活动所需的能量<sup>[1]</sup>. 与同化作用不同的是,异化Fe(III)还原过程中的还原产物Fe(II)积聚于细胞外,不作为细胞成分进入胞内. 长期以来,铁的异化还原被误认为是化学反应,微生物的作用被忽视. 直到20世纪80年代,才开始认识到铁的异化还原是由特定微生物驱动的酶促反应,铁还原菌是异化铁还原的主要动力.

### 1.2 铁还原微生物的种类

迄今为止,已有许多微生物被证实可以通过呼吸、发酵等方式进行Fe(III)还原<sup>[4]</sup>. Yan等<sup>[5]</sup>的研究表明厌氧环境中具有异化还原Fe(III)能力的微生物具有多样性,并将已知的铁还原微生物划分到确定的系统种属中. 铁还原菌在细菌域和古菌域几乎都有分布<sup>[6]</sup>,目前,已经报道的铁还原菌主要包括(图1): 变形菌纲- $\delta$ 亚纲中严格厌氧

Geobacteraceae科中的一些成员,如由淡水沉积物中分离的*Geobacter*<sup>[7]</sup>和海洋环境中*Desulfuromonas*的一些种<sup>[8]</sup>; 变形菌纲- $\gamma$ 亚纲中兼性厌氧菌*Shewanella*属内的一些种<sup>[2]</sup>,以及一些在细菌域和古菌域中均有分布的嗜温菌和嗜热菌<sup>[9, 10]</sup>. 大多数铁还原菌生活在中性环境下,但目前在酸性及碱性环境下也都分离到铁还原菌<sup>[11, 12]</sup>,如厚壁菌门中耐酸嗜热菌硫化螺旋菌属(*Sulfurospirillum*)和脱亚硫酸菌属(*Desulfitobacterium*)的成员可还原类金属As(V)和Se(V),而多粘芽胞杆菌(*Bacillus Polymyxa*)是嗜碱性铁还原菌. 铁还原菌不仅可以还原铁,而且还可以利用NO<sub>3</sub><sup>-</sup>、NO<sub>2</sub><sup>-</sup>、S<sup>0</sup>及多种形态的Fe(III)、MnO<sub>2</sub>和一些腐殖酸作为电子受体<sup>[13-15]</sup>. 此外,铁还原菌亦能还原许多痕量金属盐,如Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub><sup>2-</sup>、AsO<sub>3</sub><sup>-</sup>、SeO<sub>4</sub><sup>2-</sup>以及一些高价放射性金属,如Co、U(VI)、Tc(VII)<sup>[16-18]</sup>.

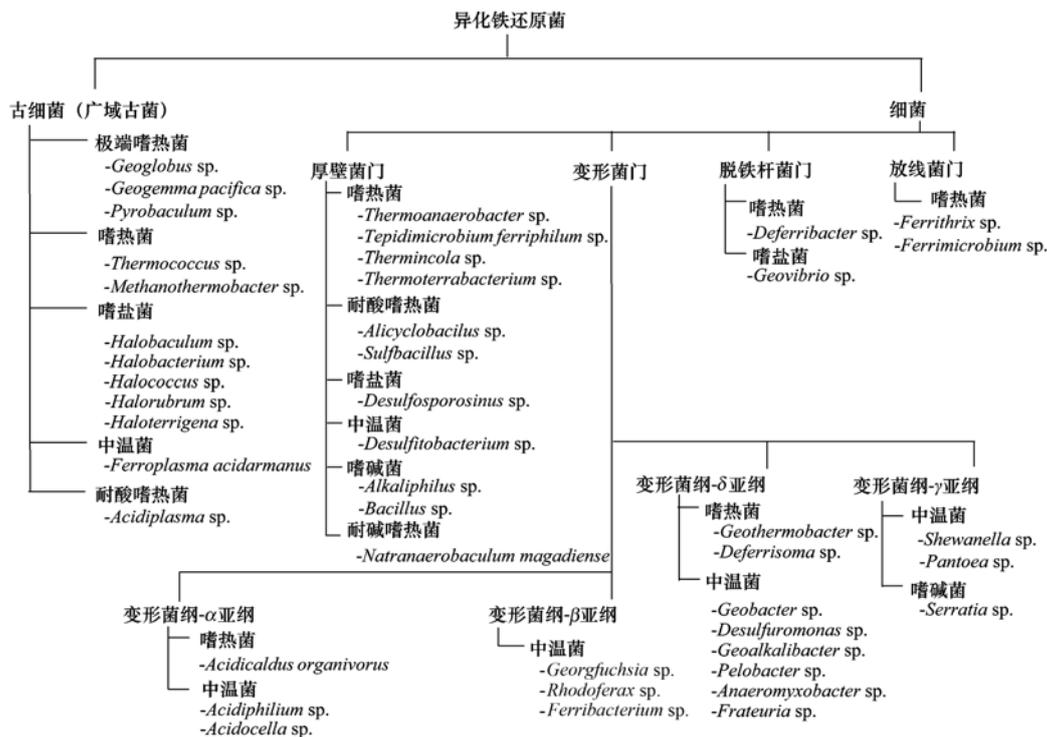


图1 异化铁还原微生物分类<sup>[19]</sup>

Fig. 1 Classification of dissimilatory iron reducing microorganism

### 1.3 铁的微生物还原机制

铁的微生物还原机制一直是研究的热点,还原反应可发生在微生物呼吸过程、发酵过程或光合作用过程中. 研究表明<sup>[20]</sup>,土壤中不溶性Fe(III)一般不能被有机质直接还原,只能靠微生物体内的酶进行酶促还原. 目前对于异化Fe(III)还原的机制,主要存在4种不同的观点<sup>[21]</sup>.

#### 1.3.1 直接接触对Fe(III)还原的促进作用

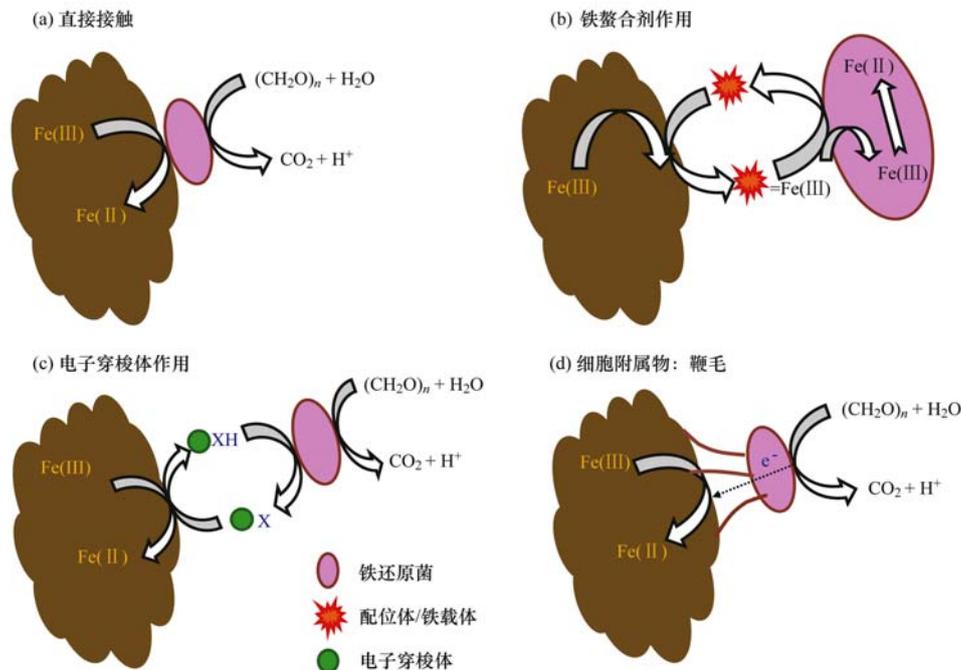
铁还原菌由于自身代谢和聚合作用与固相Fe(III)之间形成生物膜,产生大量的细胞外聚合物<sup>[22]</sup>,*Geobacter sulfurreducens*细胞外聚合物含具有导电性的生物膜和传递电子能力的蛋白质<sup>[23]</sup>. 活性氧化还原化合物Fe(III)表面和细菌细胞直接接触,使得Fe(III)被还原[图2(a)]. 研究表明<sup>[24]</sup>,

*Shewanella oneidensis* MR-1 Mtr 代谢途径是典型的 *Shewanella* spp. 与矿物相互作用的“孔蛋白-细胞色素”模型, MtrB 帮助细胞内其他传递电子的细胞色素通过细胞膜, 细胞外膜的细胞色素 c OmcA 和 MtrC 能直接接触 Fe(III) 使之还原. *G. sulfurreducens* 中 OmcB 通过基因替换终止其表达, 其 Fe(III) 还原效率依旧能达到 94% ~ 97%<sup>[25]</sup>. 研究表明, 直接参与作用 Fe(III) 还原的细胞色素 c 数量远低于 *S. oneidensis* 及 *G. sulfurreducens* 基因所推断的 39 和 111 种<sup>[26, 27]</sup>.

### 1.3.2 铁螯合剂对 Fe(III) 还原的促进作用

研究表明<sup>[28]</sup>, *Geothrix fermentans* 和 *Shewanella alga* BrY 分泌的 Fe(III) 螯合物(通过配位体或铁载体溶解, 生成络合物), 较大程度上加速 Fe(III) 氧化物的溶解, 进而促进 Fe(III) 还原[图 2(b)]. 目前发现许多铁呼吸微生物能以柠檬酸铁这种低氧化还原电位的物质为电子受体. 因此, 有关异化铁还原微生物是否具有特异分泌柠檬酸用于螯合铁进行铁呼吸的功能, 已引起研究人员极大的关注, 这些铁螯合剂的特性及其与电子穿梭的差异也有待进一步研究.

### 1.3.3 电子穿梭体对 Fe(III) 还原的促进作用



(a) 直接接触: 具有导电性的生物膜和传递电子能力的蛋白质与 Fe(III) 氧化物直接接触, 使 Fe(III) 还原; (b) 铁螯合剂作用: 铁还原菌分泌 Fe(III) 螯合物, 加速 Fe(III) 氧化物的溶解, 进而促进 Fe(III) 还原; (c) 电子穿梭体作用: 铁还原菌利用氧化还原性物质, 与不溶性 Fe(III) 进行电子传递, 还原 Fe(III); (d) 鞭毛作用: 细胞附属物, 使细菌对 Fe(III) 氧化物产生趋向性, 实现 Fe(III) 的还原

图 2 异化铁还原菌介导的不溶性 Fe(III) 电子转移机制示意<sup>[19]</sup>

Fig. 2 Schematic illustrating solid phase Fe(III)-DIRB electron transfer mechanisms

土壤和沉积物中腐殖质的还原促进了微生物对其它较难利用的电子受体的还原, 如不溶性 Fe(III) 氧化物, 在该过程中腐殖质是作为一种电子穿梭体往返作用于细菌和不溶性 Fe(III) 化合物之间<sup>[29]</sup>[图 2(c)]. 腐殖质一旦被还原, 则可以 Fe(III) 作为电子接收器, 进行纯化学的氧化还原反应. 此外, 某些细菌在还原 Fe(III) 的过程中能产生并且分泌一些小分子的、可扩散的氧化还原性物质, 它们在微生物与不溶性 Fe(III) 之间充当电子穿梭体还原 Fe(III). 已发现能分泌这种氧化还原物质的微生物有 *Geothrix fermentans*<sup>[28]</sup>、*Shewanella alga* BrY 和 *Shewanella oneidensis* MR-1<sup>[30]</sup>.

### 1.3.4 细胞附属物对 Fe(III) 还原的促进作用

*Geobacter metallireducens* 代表着一种 Fe(III) 还原模式[图 2(d)]. 当环境中不存在可溶性 Fe(III) 化合物时, 细菌会产生鞭毛和绒毛这些附属物, 使细菌对 Fe(III) 氧化物产生一定趋向性, 附着在这些化合物上面, 实现 Fe(III) 的还原<sup>[31]</sup>; 另一种观点认为, Fe(III) 诱导 *G. sulfurreducens* 产生的纤毛不是一种附着器官而是一种可传递电子的生物纳米导线<sup>[32]</sup>. 纳米导线被认为 *Geobacter* spp. 鞭毛所独有的对金属还原的特质, 甚至 *Shewanella oneidensis* 菌

属都没有这个特性. 纳米导线能直接促进微生物的电子转移,以不溶性Fe(III)氧化物和电极作为电子受体<sup>[33]</sup>.

## 2 铁的微生物还原对土壤中重金属形态转化及其有效性的影响

铁的微生物还原会影响其他金属的存在状态,如将可溶有毒的Cr(VI)还原为毒性较小不溶的Cr(III),通过沉淀将金属从地下水中移除<sup>[34]</sup>. 近来研究表明,某些情况下微生物铁呼吸还可以保护钢铁免受侵蚀<sup>[35]</sup>. 随着异化铁还原机制的完善,铁还原菌的应用将更加广阔,地下水铀污染的原位微生物还原与固定就是铁还原菌应用的一个典型<sup>[36]</sup>.

### 2.1 铁异化还原对重金属铬价态的影响

铬在环境中通常以稳定的Cr(III)及Cr(VI)价态存在. 研究表明,异化金属还原菌对于Cr(VI)还原有良好促进作用<sup>[37]</sup>. 水稻土作为研究氧化还原的模式系统一直受到人们的重视,Fe(III)作为电子受体而被还原<sup>[2, 38]</sup>; Cr(VI)同样可以作为电子受体, Cr(VI)的还原与Fe(III)还原密切相关,微生物Fe(III)还原过程进行的快慢决定了Cr(VI)还原进行的程度. 水稻土中微生物种类及数量繁多,同时还含有丰富的有机质作为电子供体,必然会导致Cr(VI)还原能力增加,并且土壤自身还含有一定量的易还原氧化铁,而氧化铁作为厌氧体系中的优势电子受体易发生微生物还原反应,产生的Fe(II)作为还原剂,其对Cr(VI)的还原有一定促进作用<sup>[34]</sup>.

在厌氧水稻土体系中同时存在着诸如硝酸盐还原、硫酸盐还原及Fe(III)还原等还原过程,铬还原过程是否存在电子受体之间的竞争或产物之间的相互反应,已成为土壤污染修复中的热点问题<sup>[39]</sup>. 研究表明<sup>[40]</sup>, Cr(VI)可被异化铁还原中产生的Fe(II)还原为Cr(III),同时Fe(II)被重新氧化成Fe(III),从而使系统中存在Cr(III)-Fe(III)混合物,铁还原菌能循环利用Fe(III),通过连续的生物-非生物还原反应,加速对Cr(VI)的还原,铁在Cr(VI)的微生物还原中起到“催化”作用. 此外, *G. sulfurreducens* 在以醋酸盐作为唯一的电子供体、葱醌作为电子穿梭体、pH 7.0的条件下,分别添加富含Fe(III)的绿脱石、蒙脱石、绿泥石与Cr(VI)混合培养,实验结果表明, Cr(VI)还原所生成的Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>与残留的黏土矿物形成微团聚体颗粒,这种结构使得Cr(III)不易被氧化<sup>[41]</sup>. 由此可知,在厌氧土壤中,异化铁还原可以作为铬污染的一种重要解毒方式.

### 2.2 铁异化还原对汞甲基化的影响

土壤中汞的存在形态一般分为有机态和无机态,也可分为可溶态、交换态(碳酸盐结合态)、铁锰氧化态、有机结合态和残渣态,在一定条件下不同形态的汞能相互转化. 研究表明<sup>[42]</sup>,这种转化与土壤pH、Eh、有机质含量、微生物等因素有关. 土壤中常见的无机汞形态为HgSO<sub>4</sub>、Hg(OH)<sub>2</sub>、HgCl<sub>2</sub>和HgO,它们因溶解度相对较低,在土壤中的迁移能力很弱,但在微生物作用下,能以土壤有机质、腐殖酸等为电子供体生成甲基汞<sup>[43]</sup>. 纳米颗粒HgS能够存在于水体表层及污染的沉积物中<sup>[44]</sup>,且能够被甲基化微生物高效转化. 研究表明<sup>[45,46]</sup>, *S. oneidensis* MR-1对固态硫化汞的生物溶解量随腐殖酸浓度的增大而增大,但生物甲基化率在腐殖酸浓度为1~5 mg·L<sup>-1</sup>范围内呈上升趋势,腐殖酸浓度为5~10 mg·L<sup>-1</sup>范围内呈抑制作用,其中最大生物甲基化率达到10.55%;加入不同浓度半胱氨酸,对*S. oneidensis* MR-1生物溶解固态硫化汞的影响较小,但却能增加菌体的甲基汞生成量,提高生物甲基化率,使汞甲基化率达到19.23%,当半胱氨酸浓度超过300 mg·L<sup>-1</sup>时,促进汞生物甲基化作用不明显.

不同菌株对汞甲基化最佳条件也不尽相同. 研究发现<sup>[47]</sup>,在初始HgCl<sub>2</sub>浓度为1 mg·L<sup>-1</sup>、温度35℃、pH 6.0、盐度0.9%的厌氧条件下, *G. sulfurreducens*能在细胞体内把HgCl<sub>2</sub>转化为MeHg,甲基化率达到38%. 在厌氧条件下,汞甲基化效率在温度35℃时最高;弱酸性(pH 6.0)比酸性和中碱性更有利于汞的甲基化;适当的盐度(0.9%)对汞甲基化有一定的促进作用;腐殖酸对汞甲基化有一定的抑制作用;而半胱氨酸能提高细胞内的汞含量从而促进汞甲基化. 梭状芽胞杆菌对汞甲基化最佳条件是在pH为4.5、Eh为50~300 mV时, HgCl<sub>2</sub>甲基化的转化速率比HgO高1000倍. 微生物合成甲基汞在需氧或厌氧条件下都可以进行,在需氧条件下主要形成甲基汞,甲基汞作为脂溶性物质,可被微生物吸收、积累而转入食物链造成对人体的危害;在厌氧条件下主要形成二甲基汞,在微酸性环境中,二甲基汞又可转化为甲基汞<sup>[48]</sup>.

汞的微生物甲基化过程与Fe(III)异化还原过程有着密切联系. Fe(III)存在的情况下, HgCl<sub>2</sub>制约*G. sulfurreducens*和*S. oneidensis* MR-1的生长与活性,从而抑制Fe(III)异化还原;汞甲基化与铁还原存在竞争关系,当Fe(III)含量过高时, *G.*

*sulfurreducens* 和 *S. oneidensis* MR-1 会忽略汞甲基化; 高结晶度的 Fe(III) 最容易被微生物还原, 更有利于促进汞生物甲基化<sup>[49]</sup>。

### 2.3 铁异化还原对土壤砷释放的影响

最近国内外学者对土壤中砷的形态转化研究特别感兴趣, 不同形态砷的毒性有较大差异, 砷化物的氧化或者甲基化一般可降低其毒性。砷的常见价态有 As(III) 和 As(V), 而 As(III) 的毒性要远大于 As(V)。Laverman 等<sup>[50]</sup> 已经发现一些异化铁还原菌如 SES-3 可将 As(V) 还原成 As(III); 而在土壤环境中, 异化铁还原菌在还原 Fe(III) 的同时, 可使 As(III) 氧化成 As(V), 从而起到解毒作用。Amstatter 等<sup>[51]</sup> 研究表明, 在 Fe(OH)<sub>3</sub> 和 Fe(II) 同时存在的条件下, As(III) 可以被氧化为 As(V), 相对于其他铁氧化物, Fe(OH)<sub>3</sub> 和 Fe(II) 同时存在相互作用下能够表现出最高氧化还原活性。此外, 研究表明<sup>[52]</sup>, 在 *S. oneidensis* MR-1 介导条件下, 适量的 Fe(III) 含量对 As(III) 氧化转化有很强的促进作用, 但是过高的 Fe(III) 浓度使得溶液中产生过多的 Fe(II), 从而对 As(III) 氧化转化有一定程度的抑制作用, 当 Fe(III) 浓度为 100 mg·L<sup>-1</sup> 时, As(III) 氧化转化率最高, 达 81.89%。

通过监测培养体系中铁和砷的形态变化模拟水稻土厌氧条件下微生物铁氧化过程对砷迁移转化的影响, 结果表明<sup>[53]</sup>, 约 96% 外源添加的 Fe(II) 可在 10 d 内氧化成 Fe(III), As(III) 对 Fe(II) 的初期氧化速率具有一定的抑制作用; 在微生物铁氧化过程中, As(III) 被氧化成 As(V), 并吸附在生成的铁氧化物表面或与其共沉淀。微生物的铁氧化过程可能降低了砷的移动性, 从而抑制水稻对砷的吸收, 降低了砷污染对人体健康的风险。

Katsyiannis 等<sup>[54]</sup> 报道了用铁还原细菌对废水中砷的去除; 地下水处理中, 加入铁离子能够显著增强氧化混凝除砷的效果<sup>[55]</sup>, 从实验角度验证了铁离子与砷吸附沉淀理论的正确性。另一方面, 被铁氧化物吸附沉淀的砷, 有可能通过铁还原而重新释放。王寅等<sup>[56]</sup> 研究表明, 随着反应时间增加, 微生物作用下毒砂和臭葱石中所含砷铁都在不断地释放; 不同种类微生物对不同类型天然含砷铁矿的砷、铁释放能力不同, *S. oneidensis* MR-1 对臭葱石中砷、铁的释放强于毒砂中的释放, 且溶液中铁浓度随着砷浓度增加而增加, 表明反应溶液中增加的铁来源于微生物对臭葱石的溶解侵蚀; 而 *Shewanella* sp. strain MR-4 对两种铁砷矿物的释放

能力大小, 与 *S. oneidensis* MR-1 相反。

### 2.4 铁异化还原对微量元素和放射性核素有效性的影响

铁还原微生物对微量元素和放射性核素的还原引起了人们极大兴趣, 因为多数放射性核素的氧化态溶解度大, 在环境尤其是水环境中容易扩散, 一旦被还原, 它们就会被沉淀固定下来。脱亚硫酸菌属 (*Desulfitobacterium*) 和硫化螺旋菌属 (*Sulfurospirillum*) 的成员可还原 As(V) 和 Se(V), 一些铁还原微生物甚至还可以将 Au(III) 还原为 Au(0) 而沉淀下来<sup>[18]</sup>。

#### 2.4.1 铁还原对微量元素 V(V) 的作用

在工业生产中, 钒主要被应用于钢铁行业, 冶金、炼钢废水中含有高浓度的 V(V)<sup>[57]</sup>。有研究发现<sup>[58]</sup>, 异化金属还原菌 *Rhodoferrax ferrireducens* 能在生长环境为 30℃、pH 7.5、摇菌转速 150 r·min<sup>-1</sup> 的条件下, 将含有 300 mg·L<sup>-1</sup> NaVO<sub>3</sub> 的冶金废水中 75.8% 的 V(V) 还原。Ortiz-Bernad 等<sup>[59]</sup> 发现 *G. metallireducens* 可以利用乙酸盐将 V(V) 还原为 V(IV) 而沉淀下来, 这一过程用在地下水 V(IV) 的去除中效果非常好。*S. oneidensis* MR-1 以 V(V) 作为唯一的电子受体<sup>[60, 61]</sup>, 将 5 mmol·L<sup>-1</sup> V(V) 完全还原为低价态的 V(IV)。不同水稻土中的微生物群落对于 V(V) 的还原能力有差异, 有 Fe(III) 存在时, 由于 V(V) 的还原产物 V(IV) 可以被 Fe(III) 重新氧化和专性铁还原微生物的富集及其对 Fe(III) 的高选择性, 使 V(V) 还原过程被滞后, 添加 V(V) 也可对氧化铁的还原过程产生影响<sup>[62]</sup>。

产甲烷菌能利用沉积物中的有机物以及黏土矿物将 Fe(III) 还原, Zhang 等<sup>[63]</sup> 研究发现, *Methanosarcina mazei* 和 *thermophilic Methanothermobacter thermoautotrophicus* 将绿脱石中 Fe(III) 进行生物还原。*M. mazei* 接种到 V(V) 浓度分别为 2、5、10 mmol·L<sup>-1</sup> 的培养基中, 经过一段时间后 V(V) 能全部被还原成低价态 V(IV); *Thermophilic methanogens* 能将培养基中浓度为 2 mmol·L<sup>-1</sup> 或 5 mmol·L<sup>-1</sup> 的 V(V) 完全还原, 而 V(V) 浓度 10 mmol·L<sup>-1</sup> 时还原率为 18.5%, 故能将 Fe(III) 还原的产甲烷菌对 V(V) 也能起到良好还原作用。有研究表明<sup>[60]</sup>, 添加碳源能有效促进厌氧条件下微生物的铁和钒还原过程; 加入葡萄糖能使体系中微生物活性增强, 使其能够更好地利用外界高价金属离子作为电子受体氧化体内基质, 促进金属离子的还原反应进行; 添加氧化铁能显著提高

厌氧水稻土中微生物Fe(Ⅲ)还原潜势,但同时也在一定程度上使还原进程变长;添加V(V)能够促进水稻土中的微生物Fe(Ⅲ)还原,使该过程的铁还原速率加快。

#### 2.4.2 铁还原对放射性核素U(VI)的作用

铀的微生物还原从U(VI)到U(IV)是一个重要的过程,影响着各种有关铀的地球化学沉积和地下水环境。因为U(VI)的高度水溶性使其能在地下水中自由移动,造成水体污染,而U(IV)因为不溶而被析出。因此,利用异化铁还原菌Geobacteraceae科的成员还原U(VI)可以有效制止地下水中铀的扩散<sup>[16]</sup>。能够还原高价U(VI)的Geobacter属广泛存在自然界的地表环境中,添加醋酸盐到地下水可加快Geobacter属还原作用<sup>[64]</sup>。

Lovley等<sup>[65]</sup>在20世纪90年代提出,利用微生物将地下水环境中可溶性的六价铀U(VI)转化为稳定的、溶解度很低的四价铀U(IV),进而防止其迁移扩散的设想。U(VI)还原的反应式为: $UO_2^{2+} + 2e^- = UO_2(s)$  ( $\Delta G^{\theta'} = -43.2 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )。实验室静止实验表明<sup>[66]</sup>,温度4℃条件下,生物反应很慢,磷酸铀酰复合物转化为碳酸铀酰复合物。因此,有可能磷酸铀酰先转化为碳酸铀酰后再被还原。碳酸铀酰复合物的还原式如下: $UO_2(CO_3)_3^{4-} + 3H^+ + 2e^- \longrightarrow UO_2 + 3HCO_3^-$  ( $\Delta G^{\theta'} = 24.3 \text{ kJ}\cdot\text{mol}^{-1}$ )

微生物还原U(VI)为U(IV)也是清除污水中溶解铀的有效方法<sup>[67]</sup>。异化铁还原菌将可溶的U(VI)形态快速还原为U(IV)的不溶形态,当铀以化合物的形态存在于溶液中时,这种方式可以有效地使之沉淀。即使在有氧条件下,微生物对U(VI)的还原能力也不会因为微生物细胞暴露在空气中而减弱<sup>[68]</sup>。这种用异化铁还原微生物去除污水中的U(VI)比先前的生物技术更具有潜在优势。Anderson等<sup>[36]</sup>的研究表明,目前利用异化Fe(Ⅲ)还原对U(VI)污染的生物修复是最成功的。U(VI)在环境中溶解度大容易扩散,但一旦被异化铁还原微生物直接还原,或者被Fe(Ⅱ)还原为U(IV),它的溶解度就降低形成沉淀而被固定。

### 3 异化铁还原对重金属形态转化的作用机制

#### 3.1 异化铁还原对重金属的氧化还原作用

异化铁还原菌利用其自身的代谢功能特性,将(类)金属如Cr、Cu、As、Hg、Se、Mn等作为电子受体(供体)使其价态发生变化。研究表明,环境中存在微生物可利用的Fe(Ⅱ)时,Cr(VI)被还原成

Cr(Ⅲ)<sup>[69]</sup>;异化铁还原菌*S. oneidensis*作用下以Hg(Ⅱ)作为电子供体,将Hg(Ⅱ)还原成Hg(0)<sup>[70]</sup>。随着对异化铁还原菌研究的深入,Cr(VI)、Cu(Ⅱ)、As(V)作为竞争电子受体时对水稻土中异化铁还原过程的影响受到越来越多的关注。研究发现<sup>[71]</sup>,Cu(Ⅱ)作为竞争电子受体时,Fe(Ⅱ)的累积量和铁还原速率常数降低,且Cu(Ⅱ)浓度越大对铁还原的影响也越大。添加不同浓度As(V)后,土壤中Fe(Ⅲ)的还原也被抑制,且随着浓度的增加抑制越明显。但是,As(V)的还原转化与Cr(VI)的还原过程有所区别。由As(V)和As(Ⅲ)的形态分布看出,在Fe(Ⅲ)还原同时存在下As(V)不可能完全被还原,反映出Fe(Ⅲ)在反应过程中具有重要的调节机制。

铁的微生物还原基本上都是利用重金属价态的改变使得重金属有效性发生变化,但是铁还原微生物对于不同重金属的还原能力不尽相同,所以应在铁微生物还原过程中充分利用外在环境的改变提高还原能力及效率。铁还原菌在生物修复中具有巨大的潜力,除了通过单一的添加电子供体刺激铁还原菌生长来提高污染物去除效率外,有机质的添加及微生物对土壤中腐殖酸的利用对(类)金属还原效率亦有较大的影响。

#### 3.2 异化铁还原对重金属的甲基化作用

2006年,Fleming等<sup>[72]</sup>研究发现抑制硫还原菌活性后,汞甲基化抑制不到一半,所分离出来的铁还原菌菌株*Geobacter sp. strain CLFeRB*在纯培养时的汞甲基化率与硫酸盐还原菌相当。由此,铁还原菌(FeRB)在汞甲基化的研究中脱颖而出,成为近年来研究的重点和热点。铁还原菌在自然界中分布广泛,具有丰富的多样性,变形杆菌δ亚纲中土杆菌科(Geobacteraceae)<sup>[73]</sup>的成员以及γ亚纲希瓦氏菌属(*Shewanella*)<sup>[74]</sup>的成员是发现相对较早的两类铁还原微生物。有研究指出<sup>[44]</sup>,纳米颗粒HgS能够存在于水体表层及污染的沉积物中,且能够被甲基化微生物高效转化。故甲基汞的产生与厌氧微生物有着密切的联系,如土壤或者沉积物中的硫酸盐还原菌及铁还原菌,同时环境中的电子穿梭体如腐殖酸和半胱氨酸,对甲基汞的产生量也有影响。

异化铁微生物对砷的甲基化途径,目前普遍接受的理论是Challenger机制——砷的交替氧化还原甲基化反应<sup>[75]</sup>。Challenger机制的第一步是将无机砷酸盐还原,通过失去砷原子上的双氧键将砷酸还原,紧随其后的反应是将As(Ⅲ)甲基氧化成一甲基

肿酸 ( $\text{MMA}^{\text{V}}$ ), 生成一甲基砷酸钠 [ $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$ ]; 生成的  $\text{CH}_3\text{AsO}(\text{OH})_2$  中  $\text{As}=\text{O}$  键断裂, 将  $\text{MMA}(\text{V})$  还原成  $\text{MMA}(\text{III})$  即一甲基亚砷酸钠 [ $\text{CH}_3\text{As}(\text{OH})_2$ ], 然后进行甲基氧化反应生成二甲基砷酸 ( $\text{DMA}^{\text{V}}$ )。细胞中谷胱甘肽可以参与砷生物甲基化过程中的还原反应, 非特异性甲基转移酶促进甲基化反应, 也可能将  $\text{As}(\text{III})$  转化为有机砷<sup>[76~78]</sup>。

### 3.3 异化铁还原对重金属的固定作用

Smedley 等<sup>[79]</sup> 研究表明, 地下含水层中砷铁之间浓度变化呈正相关趋势, 说明氢氧化铁起到了固定砷的作用。近年来更多的研究开始关注铁还原微生物在砷固定方面的作用, Zobrist 等<sup>[80]</sup> 用分离出的 *Sulfurospirillum barnesii* 将溶解态及吸附态的  $\text{Fe}(\text{III})$  和  $\text{As}(\text{V})$  还原并生成沉淀。水合铁矿广泛存在于各种环境中, 是铁还原细菌利用的主要矿物, 也是铁氧化细菌合成的主要矿物。Chen 等<sup>[81]</sup> 研究发现, 砷污染水稻土中存在着大量依赖硝酸盐的铁氧化菌, 在土壤中添加  $\text{NO}_3^-$  可以促进  $\text{Fe}(\text{II})$  的氧化, 同时显著减少水稻对砷的吸收。

异化铁还原土壤中重金属主要是通过改变金属的价态或者在土壤中共沉淀, 使得重金属在土壤中的毒性得到降低。微生物的铁氧化过程降低了砷的移动性,  $\text{As}(\text{III})$  被氧化成  $\text{As}(\text{V})$ , 并吸附在生成的铁氧化物表面或与其共沉淀。此外, 存在于地下水高价态铀毒性很大, 利用 *Shewanella* spp. 降低铀的价态, 从而使铀形成不溶于水的固体得以沉淀。

异化铁还原微生物在铁循环方面具有举足轻重

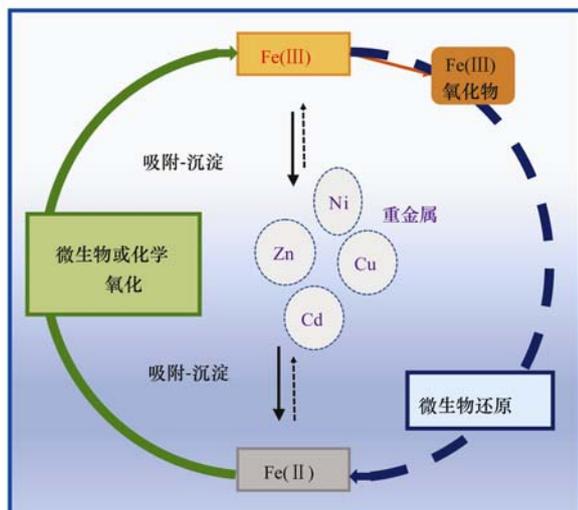


图3 铁循环对重金属的固定作用

Fig. 3 Diagram of the iron cycle and its involvement in heavy metal immobilization

的地位(图3)。Fe(III)氧化物在微生物作用下被还原成Fe(II), 而Zn、Cd、Cu、Ni等高价态的重金属失去电子被还原可使Fe(II)得到电子被氧化成为Fe(III), 另外Fe(II)也能直接被微生物或化学氧化为Fe(III)。铁氧化还原过程中重金属被吸附或共沉淀而被铁氧化物固定。

## 4 研究展望

### 4.1 铁微生物还原对重金属价态转化影响机制

铁还原微生物能将Fe(III)还原成Fe(II), 被还原Fe(III)失去电子对其他重金属具有一定的氧化能力, 但其氧化能力或者还原能力来源于铁还原微生物还是被还原Fe(III)的化学反应, 其原因值得探究。

以砷从土壤中的释放机制为例<sup>[82]</sup>, 地下水中溶解态砷与铁的含量密切相关, 因为铁氧化物对As(III)和As(V)有着强烈的吸附作用<sup>[79]</sup>。从非生物的角度来说, As(III)氧化和As(V)还原分别与腐殖物中半醌类和氢醌类物质有关, 同时含铁矿物的形态改变会引起As(V)还原或As(III)氧化。从生物过程的角度来说, 其一, 由于微生物引起的Fe(II)氧化导致Fe(III)矿物形成, 对As(III)或As(V)吸附及共沉淀作用, 使得砷形态发生改变; 其二, 微生物对含砷铁矿的还原溶解导致无机砷的释放; 其三, 由微生物介导, 含铁矿物的二级反应, 被还原的Fe(II)和未反应的Fe(III)形成Fe(II)/Fe(III)混合体对砷的共沉淀作用; 其四, 微生物直接对As(III)氧化或As(V)还原, 导致其他形式的异化反应或砷毒性降低。铁的微生物还原对改变重金属形态是一个复杂的作用体系, 不能将其简单地看成生物过程或者化学作用, 其作用机制包含生物、化学的相互穿插。

### 4.2 重金属离子对异化铁还原过程的影响

近年来, 人们逐渐认识到促使氧化铁还原的主要动力是微生物的作用<sup>[14, 15]</sup>, 而重金属离子的毒性同样可能成为制约氧化铁还原的重要因素<sup>[16]</sup>。重金属离子影响异化铁还原, 主要表现在增加异化铁还原发生前的时间, 减慢异化铁还原的速率, 而重金属离子对异化铁还原的抑制程度主要取决于微生物的活性和重金属离子的浓度<sup>[83]</sup>。

重金属离子抑制异化铁还原可能是由于其对微生物有毒害作用, 可能毒害了发酵细菌, 抑制了糖代谢, 使铁还原细菌得不到足够的电子供体, 从而影响了异化铁还原, 也可能由于重金属直接抑制了铁还

原细菌,具体原因还有待于进一步研究.

#### 4.3 铁微生物还原在重金属污染场地修复中的应用

近几年来对水-矿-微生物系统铁锰循环的研究证实<sup>[76]</sup>,充分利用表层水体和沉积物中的铁锰循环及其与金属循环耦合过程,可以有效降低金属污染,是全新的污染控制手段.

异化铁还原产生的Fe(II)与矿物结合形成吸附态Fe(II),具有很高的还原活性,影响土壤中可还原性污染物的转化.铁氧化物是沉积物中重金属的重要接收器<sup>[4]</sup>,通过其表面羟基的配合和络合作用吸附大量的金属阳离子,从而达到固定重金属的作用.

利用微生物以乙醇为电子供体还原地下水和沉积物中U(VI)为不溶解的U(IV),使之原位固定化,地下水中铀浓度从40~60 mg·L<sup>-1</sup>降至0.03 mg·L<sup>-1</sup>以下,达到了美国环保署饮用水标准.研究表明<sup>[66]</sup>,在维持实验系统无氧和无硝酸盐的条件下,通过添加乙醇为电子供体可有效地促进地下水中土著功能微生物的活性,从而实现铀的原位还原固定与稳定.因此,利用异化铁还原对重金属污染场地进行修复具有广阔的应用前景.

#### 参考文献:

- [1] Tor J M, Lovley D R. Anaerobic degradation of aromatic compounds coupled to Fe(III) reduction by *Ferroglobus placidus* [J]. *Environmental Microbiology*, 2001, **3**(4): 281-287.
- [2] Lovley D R, Holmes D E, Nevin K P. Dissimilatory Fe(III) and Mn(IV) reduction [J]. *Advances in Microbial Physiology*, 2004, **49**: 219-286.
- [3] Slobodkin A, Campbell B, Cary S C, et al. Evidence for the presence of thermophilic Fe(III)-reducing microorganisms in deep-sea hydrothermal vents at 13°N (East Pacific Rise) [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2001, **36**(2-3): 235-243.
- [4] Weber K A, Achenbach L A, Coates J D. Microorganisms pumping iron: anaerobic microbial iron oxidation and reduction [J]. *Nature Reviews Microbiology*, 2006, **4**(10): 752-764.
- [5] Yan B, Methé B A, Lovley D R, et al. Computational prediction of conserved operons and phylogenetic footprinting of transcription regulatory elements in the metal-reducing bacterial family *Geobacteraceae* [J]. *Journal of Theoretical Biology*, 2004, **230**(1): 133-144.
- [6] Nielsen J L, Juretschko S, Wagner M, et al. Abundance and phylogenetic affiliation of iron reducers in activated sludge as assessed by fluorescence in situ hybridization and microautoradiography [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(9): 4629-4636.
- [7] Reguera G, McCarthy K D, Mehta T, et al. Extracellular electron transfer via microbial nanowires [J]. *Nature*, 2005, **435**(7045): 1098-1101.
- [8] Coates J D, Lonergan D J, Philips E J P, et al. *Desulfuromonas palmitatis* sp. nov., a marine dissimilatory Fe(III) reducer that can oxidize long-chain fatty acids [J]. *Archives of Microbiology*, 1995, **164**(6): 406-413.
- [9] Slobodkin A, Reysenbach A-L, Strutz N, et al. *Thermoterrabacterium ferrireducens* gen. nov., sp. nov., a thermophilic anaerobic dissimilatory Fe(III)-reducing bacterium from a continental hot spring [J]. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 1997, **47**(2): 541-547.
- [10] Kashafi K, Holmes D E, Baross J A, et al. Thermophily in the *Geobacteraceae*: *Geothermobacter ehrlichii* gen. nov., sp. nov., a novel thermophilic member of the *Geobacteraceae* from the "Bag city" hydrothermal vent [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(5): 2985-2993.
- [11] 贺江舟, 曲东, 张莉利. Fe(III)的微生物异化还原[J]. *微生物学通报*, 2006, **33**(5): 158-164.
- [12] 黎慧娟, 彭静静. 异化Fe(III)还原微生物研究进展[J]. *生态学报*, 2012, **32**(5): 1633-1642.
- [13] Kieft T L, Fredrickson J K, Onstott T C, et al. Dissimilatory reduction of Fe(III) and other electron acceptors by a *Thermus* isolate [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(3): 1214-1221.
- [14] Cord-Ruwisch R, Lovley D R, Schink B. Growth of *Geobacter sulfurreducens* with acetate in syntrophic cooperation with hydrogen-oxidizing anaerobic partners [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1998, **64**(6): 2232-2236.
- [15] Küsel K, Dorsch T, Acker G, et al. Microbial reduction of Fe(III) in acidic sediments; isolation of *Acidiphilium cryptum* JF-5 capable of coupling the reduction of Fe(III) to the oxidation of glucose [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1999, **65**(8): 3633-3640.
- [16] Holmes D E, Finneran K T, O'Neil R A, et al. Enrichment of members of the family *Geobacteraceae* associated with stimulation of dissimilatory metal reduction in uranium-contaminated aquifer sediments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2002, **68**(5): 2300-2306.
- [17] Lloyd J R, Sole V A, Van Praagh C V G, et al. Direct and Fe(II)-mediated reduction of technetium by Fe(III)-reducing bacteria [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2000, **66**(9): 3743-3749.
- [18] Kashafi K, Tor J M, Nevin K P, et al. Reductive precipitation of gold by dissimilatory Fe(III)-reducing *Bacteria* and *Archaea* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(7): 3275-3279.
- [19] Esther J, Sukla L B, Pradhan N, et al. Fe(III) reduction strategies of dissimilatory iron reducing bacteria [J]. *Korean Journal of Chemical Engineering*, 2015, **32**(1): 1-14.
- [20] Pfiffner S M, Cantu J M, Smithgall A, et al. Deep subsurface microbial biomass and community structure in Witwatersrand Basin mines [J]. *Geomicrobiology Journal*, 2006, **23**(6): 431-442.
- [21] 李红岩, 高峰, 杨敏. 微生物异化Fe(III)还原及其作用机制研究 [J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(10): 100-105.

- [22] Franks A E, Nevin K P, Glaven R H, *et al.* Microtoming coupled to microarray analysis to evaluate the spatial metabolic status of *Geobacter sulfurreducens* biofilms [J]. ISME Journal, 2010, **4**(4): 509-519.
- [23] Richter K, Schicklberger M, Gescher J. Dissimilatory reduction of extracellular electron acceptors in anaerobic respiration [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2012, **78**(4): 913-921.
- [24] Richardson D J, Butt J N, Fredrickson J K, *et al.* The 'porin-cytochrome' model for microbe-to-mineral electron transfer [J]. Molecular Microbiology, 2012, **85**(2): 201-212.
- [25] Leang C, Coppi M V, Lovley D R. OmcB, a *c*-type polyheme cytochrome, involved in Fe(III) reduction in *Geobacter sulfurreducens* [J]. Journal of Bacteriology, 2003, **185**(7): 2096-2103.
- [26] Heidelberg J F, Paulsen I T, Nelson K E, *et al.* Genome sequence of the dissimilatory metal ion-reducing bacterium *Shewanella oneidensis* [J]. Nature Biotechnology, 2002, **20**(11): 1118-1123.
- [27] Methé B A, Nelson K E, Eisen J A, *et al.* Genome of *Geobacter sulfurreducens*: metal reduction in subsurface environments [J]. Science, 2003, **302**(5652): 1967-1969.
- [28] Nevin K P, Lovley D R. Mechanisms for accessing insoluble Fe(III) oxide during dissimilatory Fe(III) reduction by *Geothrix fermentans* [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(5): 2294-2299.
- [29] Lovley D R, Woodward J C, Chapelle F H. Stimulated anoxic biodegradation of aromatic hydrocarbons using Fe(III) ligands [J]. Nature, 1994, **370**(6485): 128-131.
- [30] Newman D K, Kolter R. A role for excreted quinones in extracellular electron transfer [J]. Nature, 2000, **405**(6782): 94-97.
- [31] Childers S E, Ciufó S, Lovley D R. *Geobacter metallireducens* accesses insoluble Fe(III) oxide by chemotaxis [J]. Nature, 2002, **416**(6882): 767-769.
- [32] Afkar E, Reguera G, Schiffer M, *et al.* A novel *Geobacteraceae*-specific outer membrane protein J (OmpJ) is essential for electron transport to Fe(III) and Mn(IV) oxides in *Geobacter sulfurreducens* [J]. BMC Microbiology, 2005, **5**: 41.
- [33] Malvankar N S, Lovley D R. Microbial nanowires: a new paradigm for biological electron transfer and bioelectronics [J]. ChemSusChem, 2012, **5**(6): 1039-1046.
- [34] Lovley D R. Bioremediation of organic and metal contaminants with dissimilatory metal reduction [J]. Journal of Industrial Microbiology, 1995, **14**(2): 85-93.
- [35] Dubiel M, Hsu C H, Chien C C, *et al.* Microbial iron respiration can protect steel from corrosion [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2002, **68**(3): 1440-1445.
- [36] Anderson R T, Vrionis H A, Ortiz-Bernad I, *et al.* Stimulating the in situ activity of *Geobacter* species to remove uranium from the groundwater of a uranium-contaminated aquifer [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2003, **69**(10): 5884-5891.
- [37] Liu C X, Gorby Y A, Zachara J M, *et al.* Reduction kinetics of Fe(III), Co(III), U(VI), Cr(VI), and Tc(VII) in cultures of dissimilatory metal-reducing bacteria [J]. Biotechnology and Bioengineering, 2002, **80**(6): 637-649.
- [38] Nealson K H, Saffarini D. Iron and manganese in anaerobic respiration: environmental significance, physiology, and regulation [J]. Annual Review of Microbiology, 1994, **48**: 311-343.
- [39] Tseng J K, Bielefeldt A R. Low-temperature chromium(VI) biotransformation in soil with varying electron acceptors [J]. Journal of Environmental Quality, 2002, **31**(6): 1831-1841.
- [40] 曲东, 毛晖, 曾辰. 添加铬、铁及葡萄糖对土壤中异化铁还原的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2004, **32**(10): 43-46.
- [41] Wrighton K C, Thrash J C, Melnyk R A, *et al.* Evidence for direct electron transfer by a gram-positive bacterium isolated from a microbial fuel cell [J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, **77**(21): 7633-7639.
- [42] Gu B H, Bian Y R, Miller C L, *et al.* Mercury reduction and complexation by natural organic matter in anoxic environments [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2011, **108**(4): 1479-1483.
- [43] 陈宁, 陈艳, 田超, 等. 无机汞和甲基汞在土壤中的吸附-解吸特性研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32**(6): 1159-1165.
- [44] Deonaraine A, Hsu-Kim H. Precipitation of mercuric sulfide nanoparticles in NOM-containing water: implications for the natural environment [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(7): 2368-2373.
- [45] 陈艳, 王卉, 司友斌. *Shewanella oneidensis* MR-1 对硫化汞的生物利用性研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(11): 4466-4472.
- [46] 陈艳, 黄潇, 司友斌. 腐殖酸和半胱氨酸对 *Shewanella oneidensis* MR-1 生物转化硫化汞的影响[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(2): 526-531.
- [47] 邹嫣, 司友斌, 颜雪, 等. *Geobacter sulfurreducens* 对汞的甲基化及其影响因素研究[J]. 环境科学, 2012, **33**(9): 3247-3252.
- [48] Merritt K A, Amirbahman A. Mercury methylation dynamics in estuarine and coastal marine environments—A critical review [J]. Earth-Science Reviews, 2009, **96**(1-2): 54-66.
- [49] Si Y B, Zou Y, Liu X H, *et al.* Mercury methylation coupled to iron reduction by dissimilatory iron-reducing bacteria [J]. Chemosphere, 2015, **122**: 206-212.
- [50] Laverman A M, Blum J S, Schaefer J K, *et al.* Growth of strain SES-3 with arsenate and other diverse electron acceptors [J]. Applied and Environmental Microbiology, 1995, **61**(10): 3556-3561.
- [51] Amstaetter K, Borch T, Larese-Casanova P, *et al.* Redox transformation of arsenic by Fe(II)-activated goethite ( $\alpha$ -FeOOH) [J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(1): 102-108.
- [52] 汪明霞, 王娟, 司友斌. *Shewanella oneidensis* MR-1 异化还原 Fe(III) 介导的 As(III) 氧化转化[J]. 中国环境科学, 2014, **34**(9): 2368-2373.

- [53] 王兆苏, 王新军, 陈雪萍, 等. 微生物铁氧化作用对砷迁移转化的影响[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(2): 328-333.
- [54] Katsoyiannis I A, Zouboulis A I, Mitrakas M, *et al.* A hybrid system incorporating a pipe reactor and microfiltration for biological iron, manganese and arsenic removal from anaerobic groundwater [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2013, **22** (12C): 3848-3853.
- [55] 王小立, 黄显怀. 地下水中铁锰钙协同除砷作用研究[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2010, **18**(4): 56-59.
- [56] 王寅, 孙林, 司友斌. 铁还原菌 *Shewanella oneidensis* MR-1 和 MR-4 对铁砷矿物的还原溶解与砷释放机制[A]. 见: 2014 年中国土壤学会土壤化学专业委员会学术研讨会论文摘要集[C]. 广州: 广州出版社, 2014. 76-77.
- [57] Weckhuysen B M, Keller D E. Chemistry, spectroscopy and the role of supported vanadium oxides in heterogeneous catalysis [J]. *Catalysis Today*, 2003, **78**(1-4): 25-46.
- [58] Li H R, Feng Y L, Zou X Y, *et al.* Study on microbial reduction of vanadium metallurgical waste water [J]. *Hydrometallurgy*, 2009, **99**(1-2): 13-17.
- [59] Ortiz-Bernad I, Anderson R T, Vrionis H A, *et al.* Vanadium respiration by *Geobacter metallireducens*: novel strategy for in situ removal of vanadium from groundwater [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(5): 3091-3095.
- [60] Carpentier W, Sandra K, De Smet I, *et al.* Microbial reduction and precipitation of vanadium by *Shewanella oneidensis* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2003, **69**(6): 3636-3639.
- [61] Carpentier W, De Smet L, Van Beeumen J, *et al.* Respiration and growth of *Shewanella oneidensis* MR-1 using vanadate as the sole electron acceptor [J]. *Journal of Bacteriology*, 2005, **187** (10): 3293-3301.
- [62] 段骏, 贾蓉, 曲东. 厌氧培养体系中V(V)与Fe(III)还原之间的电子竞争[J]. 水土保持学报, 2014, **28**(3): 264-270.
- [63] Zhang J, Dong H L, Zhao L D, *et al.* Microbial reduction and precipitation of vanadium by mesophilic and thermophilic *methanogens* [J]. *Chemical Geology*, 2014, **370**: 29-39.
- [64] Lloyd J R, Lovley D R. Microbial detoxification of metals and radionuclides [J]. *Current Opinion in Biotechnology*, 2001, **12** (3): 248-253.
- [65] Lovley D R, Phillips E J. Reduction of uranium by *Desulfovibrio desulfuricans* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1992, **58**(3): 850-856.
- [66] 吴唯民, Carley J, Watson D, *et al.* 地下水铀污染的原位微生物还原与固定: 在美国能源部田纳西橡树岭放射物污染现场的试验[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 449-459.
- [67] Singh G, Şengör S S, Bhalla A, *et al.* Reoxidation of biogenic reduced uranium: a challenge toward bioremediation [J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2014, **44**(4): 391-415.
- [68] Fredrickson J K, Zachara J M, Kennedy D W, *et al.* Reduction of U(VI) in goethite ( $\alpha$ -FeOOH) suspensions by a dissimilatory metal-reducing bacterium [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 2000, **64**(18): 3085-3098.
- [69] Choppala G, Bolan N, Kunhikrishnan A, *et al.* Concomitant reduction and immobilization of chromium in relation to its bioavailability in soils [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, doi: 10.1007/s11356-013-1653-6.
- [70] Wiatrowski H A, Ward P M, Barkay T. Novel reduction of mercury(II) by mercury-sensitive dissimilatory metal reducing bacteria [J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, **40** (21): 6690-6696.
- [71] 孙丽蓉. 水稻土中异化铁还原过程及其影响因素研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2007. 36-39.
- [72] Fleming E J, Mack E E, Green P G, *et al.* Mercury methylation from unexpected sources: molybdate-inhibited freshwater sediments and an iron-reducing bacterium [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(1): 457-464.
- [73] Coates J D, Phillips E J P, Lonergan D J, *et al.* Isolation of geobacter species from diverse sedimentary environments [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1996, **62**(5): 1531-1536.
- [74] Arnold R G, Hoffmann M R, DChristina T J, *et al.* Regulation of dissimilatory Fe(III) reduction activity in *Shewanella putrefaciens* [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1990, **56**(9): 2811-2817.
- [75] Bentley R, Chasteen T G. Microbial methylation of metalloids: Arsenic, antimony, and bismuth [J]. *Microbiology and Molecular Biology Reviews*, 2002, **66**(2): 250-271.
- [76] Hayakawa T, Kobayashi Y, Cui X, *et al.* A new metabolic pathway of arsenite: arsenic-glutathione complexes are substrates for human arsenic methyltransferase Cyt19 [J]. *Archives of Toxicology*, 2005, **79**(4): 183-191.
- [77] Naranmandura H, Suzuki N, Suzuki K T. Trivalent arsenicals are bound to proteins during reductive methylation [J]. *Chemical Research in Toxicology*, 2006, **19**(8): 1010-1018.
- [78] Nakamura K, Hisaeda Y, Pan L, *et al.* Methyl transfer from a hydrophobic vitamin B<sub>12</sub> derivative to arsenic trioxide [J]. *Journal of Organometallic Chemistry*, 2009, **694**(6): 916-921.
- [79] Smedley P L, Kinniburgh D G, Macdonald D M J, *et al.* Arsenic associations in sediments from the loess aquifer of La Pampa, Argentina [J]. *Applied Geochemistry*, 2005, **20**(5): 989-1016.
- [80] Zobrist J, Dowdle P R, Davis J A, *et al.* Mobilization of arsenite by dissimilatory reduction of adsorbed arsenate [J]. *Environmental Science & Technology*, 2000, **34**(22): 4747-4753.
- [81] Chen X P, Zhu Y G, Hong M N, *et al.* Effects of different forms of nitrogen fertilizers on arsenic uptake by rice plants [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2008, **27**(4): 881-887.
- [82] Borch T, Kretzschmar R, Kappler A, *et al.* Biogeochemical redox processes and their impact on contaminant dynamics [J]. *Environmental Science & Technology*, 2010, **44**(1): 15-23.
- [83] 刘贝贝, 曲东. 不同重金属离子对异化铁(III)还原过程的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2006, **34** (9): 115-120.

## CONTENTS

Estimation of PM <sub>2.5</sub> Concentration over the Yangtze Delta Using Remote Sensing: Analysis of Spatial and Temporal Variations .....	XU Jian-hui, JIANG Hong (3119)
Seasonal and Spatial Variations of Carbon Fractions in PM <sub>2.5</sub> in Ningbo and the Estimation of Secondary Organic Carbon .....	DU Bo-han, HUANG Xiao-feng, HE Ling-yan, <i>et al.</i> (3128)
Concentrations of Acidic Gases, Ammonia and Related Water-Soluble Ions in PM <sub>2.5</sub> and Gas-Particle Partitioning in Qingdao .....	ZHOU Jia-jia, SHI Jin-hui, LI Li-ping, <i>et al.</i> (3135)
Concentration and Particle Size Distribution of Microbiological Aerosol During Haze Days in Beijing .....	HU Ling-fei, ZHANG Ke, WANG Hong-bao, <i>et al.</i> (3144)
Air Quality Characteristics in Beijing During Spring Festival in 2015 .....	CHENG Nian-liang, CHEN Tian, ZHANG Da-wei, <i>et al.</i> (3150)
Chemical Loss of Volatile Organic Compounds and Its Impact on the Formation of Ozone in Shanghai .....	WANG Hong-li (3159)
Removal of Waste Gas Containing Mixed Chlorinated Hydrocarbons by the Biotrickling Filter .....	CHEN Dong-zhi, MIAO Xiao-ping, OUYANG Du-juan, <i>et al.</i> (3168)
A Three Band Chlorophyll-a Concentration Estimation Model Based on GOCI Imagery .....	GUO Yu-long, LI Yun-mei, LI Yuan, <i>et al.</i> (3175)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Dissolved Organic Matter and Influencing Factors in Lake Chaohu .....	YE Lin-lin, WU Xiao-dong, LIU Bo, <i>et al.</i> (3186)
Spectral Characteristic of Dissolved Organic Matter in Xiaohe River, Hebei .....	YU Min-da, ZHANG Hui, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (3194)
Spatial Variation of Ammonia-N, Nitrate-N and Nitrite-N in Groundwater of Dongshan Island .....	WU Hai-yan, FU Shi-feng, CAI Xiao-qiong, <i>et al.</i> (3203)
Sources, Migration and Conversion of Dissolved Alkanes, Dissolved Fatty Acids in a Karst Underground River Water, in Chongqing Area .....	LIANG Zuo-bing, SUN Yu-chuan, WANG Zun-bo, <i>et al.</i> (3212)
Influence of Sulfuric Acid to Karst Hydrochemical and $\delta^{13}\text{C}_{\text{DIC}}$ in the Upper and Middle Reaches of the Wujiang River .....	HUANG Qi-bo, QIN Xiao-qun, LIU Peng-yu, <i>et al.</i> (3220)
Hydrochemical Characteristic and Reasoning Analysis in Siyi Town, Langzhong City .....	ZHANG Yan, WU Yong, YANG Jun, <i>et al.</i> (3230)
Seasonal Variation on Nutrient Limitation for Phytoplankton Growth in a Coastal River-Reservoir System, Southeast China .....	CHEN Cong-cong, RAO La, HUANG Jin-liang, <i>et al.</i> (3238)
Physiological Effect of <i>Vallisneria natans</i> Under Different Concentrations of Nitrogen, Phosphorus and Chloramphenicol .....	HU Zhen-zhen, CUI Yi-bin, LI Mei, <i>et al.</i> (3248)
Effects of Algicidal Substance on <i>Phaeocystis globosa</i> and Its Fatty Acids by the Simulation Experiment .....	YANG Qiu-chan, ZHAO Ling, YIN Ping-he, <i>et al.</i> (3255)
Agricultural Non-Point Source Pollutants Removal by Enhanced Riverbank Interception Facilities Under Different Operating Conditions .....	LI Huai-zheng, CHEN Ke-li, WEI Zhong, <i>et al.</i> (3262)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Typical Material Roof Dusts .....	LI Dun-zhu, GUAN Yun-tao, LIU An, <i>et al.</i> (3269)
Formation of Disinfection By-Products During Chlor(am)ination of Danjiangkou Reservoir Water and Comparison of Disinfection Processes .....	ZHANG Min-sheng, XU Bin, ZHANG Tian-yang, <i>et al.</i> (3278)
Effects of Interaction of Ozonation and Coagulation on Coagulation Results .....	LIU Hai-long, GUO Xue-feng, WANG Min-hui, <i>et al.</i> (3285)
Effects of Anions on Bromate Formation During Ozonation of Bromide-Containing Water .....	WU Yue, WU Chun-de, LIU Li-gang, <i>et al.</i> (3292)
XAS Analysis upon Dissolved Species of Orpiment in Anoxic Environment .....	WANG Ying, XU Li-ying, WANG Shao-feng, <i>et al.</i> (3298)
AOX Pollution in Wastewater Treatment Process of Dyeing and Dyestuff Chemical Industries .....	SHEN Yang-yang, LIU Rui, XU Can-can, <i>et al.</i> (3304)
Fate of ARB and ARGs During Wastewater Treatment Process of Spiramycin Production .....	QIN Cai-xia, TONG Juan, SHEN Pei-hong, <i>et al.</i> (3311)
A Comparative Study on Two Membrane Bioreactors for the Treatment of Digested Piggyery Wastewater .....	SHUI Yong, Kawagishi Tomoki, SONG Xiao-yan, <i>et al.</i> (3319)
Analysis of Microbial Community in the Membrane Bio-Reactor (MBR) Rural Sewage Treatment System .....	KONG Xiao, CUI Bing-jian, JIN De-cai, <i>et al.</i> (3329)
Start-up Characteristics of Four-zone Integrated Reactor for Nitrogen Removal in Winter and Analysis of Nitrobacteria Community .....	ZHANG Yan, SUN Feng-xia, XIE Hang-ji, <i>et al.</i> (3339)
Achievement of Sulfate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation Reactor Started with Nitrate-Reducing Anaerobic Ammonium Oxidation .....	LIU Zheng-chuan, YUAN Lin-jiang, ZHOU Guo-biao, <i>et al.</i> (3345)
Effect of Increasing Organic Loading Rate on the Formation and Stabilization Process of Aerobic Granular Sludge .....	LIU Xiao-peng, WANG Jian-fang, QIAN Fei-yue, <i>et al.</i> (3352)
Nitrogen Loss Through Different Ways in Cropland Under Conventional Fertilization: An <i>In-situ</i> Study of Summer Maize Season in the Middle and Lower Reaches of the Yangtze River .....	SANG Meng-meng, FAN Hui, JIANG Shan-shan, <i>et al.</i> (3358)
Effects of Water and Nitrogenous Fertilizer Coupling on CH <sub>4</sub> and N <sub>2</sub> O Emission from Double-Season Rice Paddy Field .....	FU Zhi-qiang, LONG Pan, LIU Yi-yi, <i>et al.</i> (3365)
Characteristics of N <sub>2</sub> , N <sub>2</sub> O, NO, CO <sub>2</sub> and CH <sub>4</sub> Emissions in Anaerobic Condition from Sandy Loam Paddy Soil .....	CAO Na, WANG Rui, LIAO Ting-ting, <i>et al.</i> (3373)
Characteristics of Soil Respiration along Eroded Sloping Land with Different SOC Background on the Hilly Loess Plateau .....	CHEN Gai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (3383)
Effect of Biochar on Soil Greenhouse Gas Emissions in Semi-arid Region .....	GUO Yan-liang, WANG Dan-dan, ZHENG Ji-yong, <i>et al.</i> (3393)
Characteristics and Coupling Relationship of Soil Carbon and Nitrogen Transformation During <i>In-situ</i> Mineralization Cultivation in Forestlands in the Mountain Area of Southern Ningxia .....	NI Yin-xia, HUANG Yi-mei, NIU Dan, <i>et al.</i> (3401)
Nitrogen Fraction Distributions and Impacts on Soil Nitrogen Mineralization in Different Vegetation Restorations of Karst Rocky Desertification .....	HU Ning, MA Zhi-min, LAN Jia-cheng, <i>et al.</i> (3411)
Distribution and Dynamics of Cropland Soil Organic Carbon in Jiangnan Plain: A Case Study of Qianjiang City .....	WANG Yu-zhu, XIAO He-ai, ZHOU Ping, <i>et al.</i> (3422)
Impact of Land Utilization Pattern on Distributing Characters of Labile Organic Carbon in Soil Aggregates in Jinyun Mountain .....	LI Rui, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju (3429)
Magnetic Responses of Heavy Metals in Street Dust of Typical Mine-Based City, Northwest China .....	NIE Yan, WANG Xin, WANG Bo, <i>et al.</i> (3438)
Distribution Characteristics of Heavy Metals in Environmental Samples Around Electroplating Factories and the Health Risk Assessment .....	GUO Peng-ran, LEI Yong-qian, ZHOU Qiao-li, <i>et al.</i> (3447)
Homologues Levels and Distribution Pattern of Polychlorinated Biphenyls in Typical Capacitor Contaminated Soil .....	LIU Jie, LI Xiao-dong, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (3457)
Adsorption and Desorption Characteristics of Endosulfan in Purple Soil .....	ZHAO Yan, ZHENG Guo-can, ZHU Heng, <i>et al.</i> (3464)
Influence of <i>Mirabilis jalapa</i> Linn. Growth on the Microbial Community and Petroleum Hydrocarbon Degradation in Petroleum Contaminated Saline-alkali Soil .....	JIAO Hai-hua, CUI Bing-jian, WU Shang-hua, <i>et al.</i> (3471)
Al <sup>3+</sup> Absorption and Assimilation by Four Ectomycorrhizal Fungi .....	WANG Ming-xia, YUAN Ling, HUANG Jian-guo, <i>et al.</i> (3479)
Contamination of Organophosphorus Pesticides Residue in Fresh Vegetables and Related Health Risk Assessment in Changchun, China .....	YU Rui, LIU Jing-shuang, WANG Qi-cun, <i>et al.</i> (3486)
Community Structure and Succession of Methanogens in Beishenshu Landfill, Beijing .....	SONG Li-na, WANG Lei, XIA Meng-jing, <i>et al.</i> (3493)
Fertility and Environmental Impacts of Urban Scattered Human Feces Used as Organic Granular Fertilizer for Leaf Vegetables .....	LÜ Wen-zhou, QIAO Yu-xiang, YU Ning, <i>et al.</i> (3501)
Degradation of PCDD/Fs by the Mixture of V <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -WO <sub>3</sub> /TiO <sub>2</sub> Catalyst and Activated Carbon .....	REN Yong, JI Sha-sha, YU Ming-feng, <i>et al.</i> (3508)
Energy Conservation and Emissions Reduction Benefits Analysis for Battery Electric Buses Based on Travel Services .....	LIN Xiao-dan, TIAN Liang, LÜ Bin, <i>et al.</i> (3515)
Definition and Control Indicators of Volatile Organic Compounds in China .....	JIANG Mei, ZOU Lan, LI Xiao-qian, <i>et al.</i> (3522)
Influence of Dissimilatory Iron Reduction on the Speciation and Bioavailability of Heavy Metals in Soil .....	SI You-bin, WANG Juan (3533)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军  
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞  
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年9月15日 第36卷 第9期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 9 Sep. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science ( HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel:010-62941102, 010-62849343; Fax:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301  
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行