

微生物协同 Fe^0 氧化的环境修复作用研究进展

陈杏娟, 郭俊, 许玫英*

广东省微生物研究所, 广东省菌种保藏与应用重点实验室, 广东省微生物应用新技术公共实验室, 广州 510070

摘要: 零价铁(Fe^0)具有高效还原转化多种污染物的能力,但不能实现污染物的矿化作用。微生物与 Fe^0 的协同作用过程,以微生物为主导, Fe^0 起促进作用,可有效提高多种污染物的降解效率,实现污染物的彻底脱毒与无害化,因此利用微生物协同 Fe^0 氧化进行环境修复具有广阔的应用前景。本文从微生物协同 Fe^0 氧化的作用机理、菌种多样性及其在环境修复中的应用等研究进展进行综述,提出微生物协同 Fe^0 氧化的环境修复研究中存在的主要问题和重点研究方向,以期在更全面、深入地认识这一过程的基础上,充分发挥其在环境修复中的作用。

关键词: 零价铁(Fe^0), 微生物, 协同作用, 环境修复

中图分类号: Q935 **文献标识码:** A **文章编号:** 0001-6209 (2011)09-1146-06

零价铁(Fe^0)处理技术是近年来国际上新兴的一种污染修复技术,越来越被广泛应用于环境污染控制与修复领域。 Fe^0 可高效还原转化氯代脂肪烃、含氯含硝基芳烃、多氯联苯、偶氮染料等多种污染物,但这些难降解污染物在 Fe^0 腐蚀氧化过程中仅发生序列脱氯或硝基还原等反应,过程本身并无矿化作用。为了使污染物彻底脱毒与无害化,已有不少研究者先后开展了 Fe^0 -微生物协同降解作用处理氯代脂肪烃/芳香烃、偶氮染料、无机盐等污染物的研究。这些研究发现微生物与 Fe^0 的协同作用可有效提高多种污染物的降解效率,且 Fe^0 /微生物协同环境修复作用以微生物为主导, Fe^0 起促进作用。近年来人们对微生物与 Fe^0 协同的环境修复作用研究越发具有浓厚兴趣,本文就微生物与 Fe^0 协同的环境修复作用的研究进展进行评述,以期对这

一重要过程的理解有更全面、深入的认识。

1 微生物协同 Fe^0 氧化的作用机理

Fe^0 是一种廉价易得的电子供体,可以与氧气或者水发生电化学/腐蚀反应而缓慢地被氧化: $2\text{Fe}^0(\text{s}) + 4\text{H}^+(\text{aq}) + \text{O}_2(\text{aq}) \rightarrow 2\text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{l})$, $\text{Fe}^0(\text{s}) + 2\text{H}_2\text{O}(\text{aq}) \rightarrow \text{Fe}^{2+}(\text{aq}) + \text{H}_2(\text{g}) + 2\text{OH}^-(\text{aq})$;在氧气充足条件下, Fe^{2+} 可以被进一步氧化成 Fe^{3+} ;随着溶液pH的增加, Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 可以形成(氢)氧化铁化合物,释放的电子可用于其他物质的还原^[1-2]。在合适的条件下 Fe^0 可以与氯代有机物、硝基芳香化合物、无机盐离子等发生直接的氧化还原反应,加上生成的氧化铁水合物的吸附作用,可以实现较好的序列脱氯或硝基还原等作用。

基金项目: 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 广东省科学院优秀青年科技人才基金项目(200902); 广东省自然科学基金博士启动项目(10451007002006347); 广东省科学院青年科学研究基金(qnjj201003); 广东省科技成果推广项目(2008B040200015); 广州市科技成果推广项目(2008C13G041)

* 通信作者。Tel/Fax: +86-20-87684471; E-mail: xumy@gdim.cn

作者简介: 陈杏娟(1981-), 女, 广州人, 博士, 主要从事环境微生物学研究。E-mail: xingjuan_chen@yahoo.com.cn

收稿日期: 2011-02-15; **修回日期:** 2011-03-23

氯代有机物、硝基芳香化合物、无机盐离子等环境污染物在 Fe⁰ 的作用下的直接还原途径可能有以下 3 种:

① Fe⁰ 金属表面直接电子转移反应, 即 Fe⁰ 表面的电子转移到上述物质并使之还原。 $\text{Fe}^0 + \text{R} - \text{Cl} + \text{H}^+ \rightarrow \text{R} - \text{H} + \text{Fe}^{2+} + \text{Cl}^-$

② Fe⁰ 腐蚀的直接产物 Fe²⁺ 把电子转移到上述物质, 不过这一反应进行得很慢。

③ Fe⁰ 反应产生的 H₂ 可使上述物质还原。 $\text{H}_2 + \text{R} - \text{Cl} \rightarrow \text{R} - \text{H} + \text{H}^+ + \text{Cl}^-$

虽然这些难降解有机物在 Fe⁰ 腐蚀氧化过程中发生序列脱氯或硝基还原等反应, 但过程本身并无矿化作用, 而 Fe⁰ 与微生物的协同降解作用则能够实现污染物的彻底脱毒与无害化。很多研究都表明 Fe⁰ 与微生物协同作用的降解机理与单纯的 Fe⁰ 处理作用机理是不相同的, Fe⁰ 腐蚀与微生物作用之间相互影响、相互促进。Fe⁰ 与氧气或者水发生电化学/腐蚀反应而缓慢地被氧化, 可造成微环境体系 pH 增加、氧化还原电位降低; 而 Fe⁰ 的腐蚀又能不断产生 Fe²⁺ 和 H₂, 为微生物厌氧降解有机污染物提供更多的电子供体, 促成污染物的生物降解, 有效提高其处理效率。

另一方面, 许多研究都表明 Fe⁰ 的粒径及其与细菌细胞的附着关系对细菌降解污染物的活性产生很大影响。Yu 等的研究先后发现了在反应器中的自养型微生物附着在 Fe⁰ 上可以高效催化高氯酸的还原^[3-4], 但是 Shrout 等的研究却发现 Fe⁰ 对富集培养的厌氧微生物的高氯酸降解起到抑制作用, 这是因为铁析出物包裹在细菌细胞膜表面从而抑制细菌对高氯酸的降解^[5]。Karri 等人使用粒径分别为 1.120 mm、0.149 mm、0.044 mm 和 0.010 mm 的 Fe⁰ 作为厌氧生物反应器活性污泥的电子供体, 研究结果表明 Fe⁰ 的粒径越小反应器中产甲烷活性和硫酸盐还原活性越强^[6]。粒径越小的 Fe⁰ 由于具有越大的比表面积, 因此与污染物发生直接氧化还原反应的能力越强。目前很多学者已经开始尝试使用纳米 Fe⁰ 进行污染物的环境修复^[7], 但是纳米级的 Fe⁰ 往往对微生物细胞产生不利的影响。Lee 等研究发现粒径更小的纳米 Fe⁰ 可以附着在大肠杆菌细胞膜内外, 引起细胞膜结构的破坏以及细胞内含物的外渗。他们推测这很可能是纳米 Fe⁰ 诱导细菌细胞外膜功能蛋白和脂多糖的还原降解造成的^[8]。因此,

既要考虑 Fe⁰ 的化学活性又要考虑其对微生物细胞膜产生的影响, Fe⁰ 的粒径是一个很重要的因素。

虽然目前在微生物协同 Fe⁰ 氧化的作用机理研究方面取得了一些进展, 但是大部分都局限在对还原降解现象的观察, 对于微生物如何利用 Fe⁰、Fe²⁺ 或 H₂ 作为电子供体降解有机污染物、如何适应高 pH 和低氧化还原电位的环境等研究尚未见报道。

2 协同 Fe⁰ 氧化作用的微生物多样性

目前国际上主要是以受污染地区的河床低泥、活性污泥、消化污泥和土壤微生物混合物等微生物群落为实验材料开展 Fe⁰ 与微生物的协同环境修复作用研究, 至于利用微生物纯系菌株进行相关研究的实验为数不多。目前的研究表明协同 Fe⁰ 氧化作用的微生物及微生物群落的最大特点是能够以 Fe⁰、Fe²⁺ 或 H₂ 作为电子供体, 或者能够适应高 pH、低氧化还原电位的环境等。

Gu 等在分析 Fe⁰ 渗透性反应墙的微生物群落结构时发现, 功能微生物主要为产甲烷细菌、硫酸盐还原菌和反硝化细菌^[9]。Novak 等发现产甲烷富集培养物可以加快四氯化碳和氯仿的降解, 并研究了从中分离得到的 3 株产甲烷纯系菌株 *Methanosarcina barkeri*、*Methanosarcina thermophila* 和 *Methanosaeta concillii* 的脱氯活性, 证实上述菌株是利用 Fe⁰ 腐蚀产生的 H₂ 作为电子供体转化四氯化碳和氯仿而生长^[10]。硫酸盐还原菌一方面产生 H₂S 可以使 Fe⁰ 加速腐蚀产生 H₂, 另一方面又可以利用 Fe⁰ 腐蚀产生的 H₂ 作为电子供体生长。也有研究表明硫酸盐还原菌 *Desulfobacterium* 可以直接从 Fe⁰ 表面获得电子而生长, 有别于一些利用 Fe⁰ 腐蚀产生的 H₂ 作为电子供体而生长的硫酸盐还原菌^[11], 这种直接从 Fe⁰ 表面获得电子而生长的现象最近在产甲烷细菌里也有报道^[12]。而自养型的反硝化细菌, 有报道可以利用 Fe⁰ 腐蚀产生的 H₂ 作为电子供体生长^[13], 也有报道可以利用 Fe⁰ 腐蚀产生的 Fe²⁺ 作为电子供体生长^[14]。

除了上述典型的能利用 H₂ 作为电子供体的产甲烷细菌、硫酸盐还原菌和反硝化细菌以外, 还有其他一部分细菌可以协同 Fe⁰ 氧化进行环境修复。脱氯菌株 *Dehalococcoides ethenogenes* strain 195 和 *Dehalococcoides* strain CBDB1 可以利用 Fe⁰ 作为电子

供体使四氯乙烯完全还原为乙烯^[15]。一种自养型的氢细菌也发现能够与 Fe^0 协同作用实现比单独情况下更高效的三氯乙烯脱氯作用^[16]。 Fe^0 的存在使培养基维持了合适的 pH 和氧化还原电势,并且可以产生厌氧脱氯菌和氢细菌最有效的电子供体——氢气^[17-18]。另外, *Dehalococcoides* spp 的还原脱卤基因(*tceA*、*vcrA*)可能被 Fe^0 加强表达从而促进其对三氯乙烯的还原^[19]。

3 微生物协同 Fe^0 氧化在环境修复中的应用

3.1 氯代有机物

自 20 世纪 90 年代 Gillham 等^[20]提出 Fe^0 金属可以促进还原脱氯、金属铁屑可以用于地下水的原位修复以来, Fe^0 作为一种还原脱卤的有效电子供体开始受到人们的关注。近年来许多研究表明, Fe^0 单独处理即可催化还原多种氯代有机物(如氯代烷烃、氯代烯烃、氯代脂肪烃、氯代芳香烃、有机氯农药等)、硝基芳香化合物(硝基苯、偶氮染料等)、无机盐离子(高氯酸盐、硝酸盐、重铬酸盐、砷酸盐等)和重金属离子(Hg^{2+} 、 Ni^{2+} 、 Ag^+ 、 Cd^{2+} 等),使其转化为低毒的化合物。而使用 Fe^0 与微生物的协同处理则能实现更高效、更完全的污染物降解作用。Novak 等利用 Fe^0 与产甲烷细菌协同处理四氯化碳和氯仿,与对照组相比其降解效率得到明显提高^[10]。程婷、刘智勇研究团队的研究结果也表明, Fe^0 与经过驯化的厌氧污泥微生物菌群协同作用处理多氯酚比单独使用 Fe^0 或厌氧污泥微生物的处理效果要好^[21-22]。Ma 等人利用重度污染的河底淤泥来富集得到的厌氧微生物菌群与 Fe^0 协同处理四氯乙烯,比单独使用 Fe^0 处理的获得更高的降解效率和更低氯代程度的产物^[23]。除了上述这些氯代脂肪烃、氯代芳香烃以外,在多氯联苯(polychlorinated biphenyls, PCBs)降解研究方面,Rysavy 也发现 PCBs 污染土壤的厌氧培养物与 Fe^0 协同作用可以加快 PCBs 还原脱氯^[24]。 Fe^0 的处理可以提高这些化合物的可生化性,为进一步生物降解创造了有利条件。

3.2 硝基芳香化合物

在硝基苯生物厌氧降解过程的研究中,董玲玲等人发现 Fe^0 能够促进硝基苯的厌氧生物转化并主

要生成苯胺,添加 Fe^0 实现了电子催化与生物代谢的协同作用, Fe^0 的作用主要表现为其腐蚀氧化形成 Fe^{2+} 的过程为硝基苯的厌氧生物转化提供了电子以及该过程中生成的 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 的生物营养作用^[25]。Zhang 等的研究也获得了相似的结果, Fe^0 与厌氧污泥协同处理硝基苯的降解率明显高于 Fe^0 或厌氧污泥单独处理的效率^[26]。

另外,国内外对 Fe^0 处理偶氮染料的研究表明,在偏酸性水溶液中 Fe^0 能够直接将染料等含氮有机物还原成胺基有机物。当 Fe^0 在适当的条件下与染料溶液接触时, Fe^0 氧化反应的产物中新生态的 $[\text{H}]$ 和 Fe^{2+} ,可破坏染料的发色或助色基,使之断链并失去发色能力^[27],但该反应并不能实现染料的彻底矿化降解,因此很多学者开始研究 Fe^0 与微生物的协同降解作用处理偶氮染料。汤文琪等利用 Fe^0 -厌氧微生物体系处理活性艳红 X-3B,在相同试验条件下比单用 Fe^0 或厌氧微生物体系达到相同脱色率所需时间分别缩短了约 50% 和 70%^[28]。Saxe 等人先后应用 Fe^0 渗透性反应墙与活性污泥处理实现了多种偶氮染料的高效降解^[29]。Liu 等人把零价的铁床整合在厌氧反应器中,实现了活性污泥对灿烂红 X-3B 的高效还原^[30]。

3.3 无机盐离子

在无机盐污染的环境修复方面,学者们对微生物协同 Fe^0 降解高氯酸盐和硝酸盐的研究较为深入。Son 等人利用 Fe^0 与活性污泥协同作用可以在 8 天内使 65mg/L 的高氯酸盐完全还原,作用效果比单独使用 Fe^0 或活性污泥处理都要高^[31], Fe^0 作为微生物还原高氯酸盐的合适电子来源,实现了高氯酸的自养和异养还原^[32]。Yu 等的研究也先后发现了在反应器中的自养型微生物附着在 Fe^0 上可以高效催化高氯酸的还原^[3-4]。

在硝酸盐研究方面,学者们很早就注意到了 Fe^0 支持的反硝化过程, Fe^0 可以把硝酸根离子直接还原为铵根离子,而自营养的反硝化细菌利用 Fe^0 可以把硝酸根还原为无毒的化合物,如 N_2O 和 N_2 ^[13]。Shin 等利用在废水处理反应器中获得的硝酸还原培养物与 Fe^0 协同作用,在 3 天内即可使硝酸盐完全还原,而仅使用 Fe^0 处理在相同时间内硝酸根还原率仅达到 22%, Fe^0 氧化产生的 Fe^{2+} 很可能作为微生物还原硝酸根的电子供体而促进硝酸还原^[14]。

4 研究展望

微生物协同 Fe^0 氧化的环境修复作用涉及污染物降解以及生物地球化学循环等基础科学理论, 且与资源利用、环境修复等重要社会实践相关, 拓宽并深化此类研究具有一定意义。针对当前我国高速城市化发展过程急需迫切解决的环境污染问题, 笔者认为未来的研究应重点开展以下内容:

①微生物协同 Fe^0 氧化的作用机理研究。目前为止, 有关 Fe^0 与微生物协同作用的研究大多集中在降解效果以及 Fe^0 或 Fe^{2+} 和 Fe^{3+} 对污染物降解的影响上, 而对反应过程中微生物协同 Fe^0 氧化的作用机理研究不足。阐明微生物协同 Fe^0 氧化的作用机理, 可以认识细菌协同 Fe^0 氧化对污染物降解的催化机制, 积累更丰富的环境微生物生理学基础理论。

②微生物协同 Fe^0 降解卤族溴代化合物的研究。随着电子行业的迅猛发展、大量电子垃圾的无序拆解, 具有生物积蓄毒性的溴代阻燃剂释放到环境中造成了严重的环境污染问题, 威胁着生物多样性及人类健康。虽然溴原子与有机物的共价键作用力比氯原子与有机物的共价键作用力弱, 但是微生物协同 Fe^0 氧化对溴代化合物脱溴降解的研究却未见报道, 而关于 Fe^0 对溴代化合物的化学催化机理研究也才刚刚起步。这些研究发现多溴联苯醚可以被纳米级的零价铁转化为低溴代化合物^[33-35], 这证明了 Fe^0 在溴代化合物的环境修复方面具有很高的应用潜力。因此开展微生物协同 Fe^0 降解卤族溴代化合物的研究具有重要的意义。

本实验室目前针对全球电子垃圾污染日益严重的问题, 采集广东汕头溴代阻燃剂严重污染地区的底泥, 富集分离得到一个利用零价铁作为电子供体来降解溴代阻燃剂的微生物菌群, 对其中的微生物群落结构进行了分析, 并分离了多株可以与 Fe^0 协同作用实现更高效脱溴作用的纯系菌株, 开展了零价铁颗粒大小与降解作用的关系研究 (数据尚未发表), 这将为利用微生物协同 Fe^0 氧化进行溴代阻燃剂污染的环境修复奠定了重要的理论基础。

③ $\text{Fe}^0/\text{Fe}^{3+}$ 微生物氧化还原循环潜能研究。 Fe^0 /微生物协同作用可能促进 Fe 元素的生物地球化学循环, 产生的 Fe^{3+} 可以作为电子受体被环境中

大量存在的铁还原细菌利用进行厌氧呼吸从而实现污染物的氧化降解。本实验室从广州某印染厂污水处理系统中分离鉴定了 1 株具有明显铁还原功能的希瓦氏菌新种——脱色希瓦氏菌 (*Shewanella. decolorationis*) S12^[36], 利用该菌已经开展了多项研究, 取得了显著的成果, 研究结果表明 *S. decolorationis* 12 在利用三价铁进行厌氧呼吸的同时, 实现腐殖质、偶氮染料等的污染降解。耦合微生物/ Fe^0 氧化和微生物/ Fe^{3+} 还原的生物修复作用研究具有广阔的应用前景, 开展 $\text{Fe}^0/\text{Fe}^{3+}$ 微生物氧化还原循环潜能研究可以为开发以铁元素的微生物氧化还原循环为基础的污染物生物降解和转化的新技术奠定理论基础, 为人类更合理利用自然资源和进行环境修复提供理论依据。

参考文献

- [1] Noubactep C. The fundamental mechanism of aqueous contaminant removal by metallic iron. *Water SA*, 2010, 36(5): 663-670.
- [2] Lee C, Keenan CR, Sedlak D. Polyoxometalate-enhanced oxidation of organic compounds by nanoparticulate zero-valent iron and ferrous ion in the presence of oxygen. *Environmental Science and Technology*, 2008, 42(13): 4921-4926.
- [3] Yu X, Amrhein C, Deshusses MA, Matsumoto MR. Perchlorate reduction by autotrophic bacteria in the presence of zero-valent iron. *Environmental Science and Technology*, 2006, 40(4): 1328-1334.
- [4] Yu X, Amrhein C, Deshusses MA, Matsumoto MR. Perchlorate reduction by autotrophic bacteria attached to zerovalent iron in a flow-through reactor. *Environmental Science and Technology*, 2007, 41(3): 990-997.
- [5] Shrout JD, Williams AGB, Scherer MM, Parkin GF. Inhibition of bacterial perchlorate reduction by zero-valent iron. *Biodegradation*, 2005, 16(1): 23-32.
- [6] Karri S, Sierra-Alvarez R, Field JA. Zero valent iron as an electron-donor for methanogenesis and sulfate reduction in anaerobic sludge. *Biotechnology and Bioengineering*, 2005, 92(7): 810-819.
- [7] Grieger KD, Fjordbøge A, Hartmann NB, Eriksson E, Poul LB, Baun A. Environmental benefits and risks of zero-valent iron nanoparticles (nZVI) for *in situ* remediation: Risk mitigation or trade-off? *Journal of Contaminant Hydrology*, 2010, 118(3-4): 165-183.

- [8] Lee C, Kim JY, Lee WII, Nelson KL, Yoon J, Sedlak DL. Bactericidal effect of zero-valent iron nanoparticles on *Escherichia coli*. *Environmental Science and Technology*. 2008, 42(13): 4927-4933.
- [9] Gu B, Watson DB, Wu L, Phillips DH, White DC, Zhou J. Microbiological characteristics in a zero-valent iron reactive barrier. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2002, 77(3): 293-309.
- [10] Novak PJ, Daniels L, Parkin GF. Enhanced dechlorination of carbon tetrachloride and chloroform in the presence of elemental iron and *Methanosarcina barkeri*, *Methanosarcina thermophila*, or *Methanosaeta concillii*. *Environmental Science and Technology*, 1998, 32(10): 1438-1443.
- [11] Dinh HT, Kuever J, Mussmann M, Hassel AW, Stratmann M, Widdel F. Iron corrosion by novel anaerobic microorganisms. *Nature*, 2004, 427(6977): 829-832.
- [12] Uchiyama T, Ito K, Mori K, Tsurumaru H, Harayama S. Iron-corroding methanogen isolated from a crude-oil storage tank. *Applied and Environmental Microbiology*, 2010, 76(6): 1783-1788.
- [13] An Y, Li T, Jin Z, Dong M, Li Q. Nitrate degradation and kinetic analysis of the denitrification system composed of iron nanoparticles and hydrogenotrophic bacteria. *Desalination*, 2010, 252(1-3): 71-74.
- [14] Shin KH, Cha DK. Microbial reduction of nitrate in the presence of nanoscale zero-valent iron. *Chemosphere*, 2008, 72(2): 257-262.
- [15] Rosenthal H, Adrian L, Steiof M. Dechlorination of PCE in the presence of Fe^0 enhanced by a mixed culture containing two *Dehalococcoides* strains. *Chemosphere*, 2004, 55(5): 661-669.
- [16] Wang S, Tseng S. Reductive dechlorination of trichloroethylene by combining autotrophic hydrogen-bacteria and zero-valent iron particles. *Bioresource Technology*, 2009, 100(1): 111-117.
- [17] Xiu Z, Jin Z, Li T, Mahendra S, Lowry GV, Alvarez PJJ. Effects of nano-scale zero-valent iron particles on a mixed culture dechlorinating trichloroethylene. *Bioresource Technology*, 2010, 101(4): 1141-1146.
- [18] Zemb O, Lee M, Low A, Manefield M. Reactive iron barriers: a niche enabling microbial dehalorespiration of 1, 2-dichloroethane. *Applied Microbiology and Biotechnology*, 2010, 88(1): 319-325.
- [19] Xiu ZM, Gregory KB, Lowry GV, Alvarez PJ. Effect of bare and coated nanoscale zerovalent iron on *tceA* and *vcrA* gene expression in *Dehalococcoides* spp. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(19): 7647-7651.
- [20] Gillham RW, O'Hannesin SF. Enhanced degradation of halogenated aliphatics by zero valent iron. *Ground Water*, 1994, 32(6): 958-967.
- [21] 程婷, 戴友芝, 刘智勇, 张良长. 零价铁对 2,4-二氯酚生物还原脱氯的影响研究. *微生物学通报 (Microbiology China)*, 2008, 35(3): 332-335.
- [22] 刘智勇, 戴友芝, 程婷. Fe^0 /厌氧微生物联合体系处理 2,4,1-三氯酚影响因素的研究. *环境工程学报 (Chinese Journal of Environmental Engineering)*, 2008, 2(3): 349-352.
- [23] Ma C, Wu Y. Dechlorination of perchloroethylene using zero-valent metal and microbial community. *Environmental Geology*, 2008, 55(1): 47-54.
- [24] Rysavy JR, Yan T, Novak PJ. Enrichment of anaerobic polychlorinated biphenyl dechlorinators from sediment with iron as a hydrogen source. *Water Research*, 2005, 39(4): 569-578.
- [25] 董玲玲, 吴锦华, 吴海珍, 吴超飞, 韦潮海. 硝基苯厌氧生物降解过程中 Fe^0 的促进作用. *环境化学 (Environmental Chemistry)*, 2005, 24(6): 643-646.
- [26] Zhang W, Chen L, Chen H, Xia SQ. The effect of $\text{Fe}^0/\text{Fe}^{2+}/\text{Fe}^{3+}$ on nitrobenzene degradation in the anaerobic sludge. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, 143(1-2): 57-64.
- [27] Lin Y, Weng C, Chen F. Effective removal of AB24 dye by nano/micro-size zero-valent iron. *Separation and Purification Technology*, 2008, 64(1): 26-30.
- [28] 汤文琪, 肖利平, 戴友芝, 郭燕. Fe^0 -厌氧微生物体系处理活性艳红 X-3B 的试验研究. *环境工程学报 (Chinese Journal of Environmental Engineering)*, 2009, 3(8): 1425-1428.
- [29] Saxe JP, Lubenow BL, Chiu PC, Huang CP, Cha DK. Enhanced biodegradation of azo dyes using an integrated elemental iron-activated sludge system: I. Evaluation of system performance. *Water Environment Research*, 2006, 78(1): 19-25.
- [30] Liu Y, Zhang Y, Quan X, Zhang J, Zhao H, Chen S. Effects of an electric field and zero valent iron on anaerobic treatment of azo dye wastewater and microbial community structures. *Bioresource Technology*, 2011, 102(3): 2578-2584.

- [31] Son A, Lee J, Chiu PC, Kim BJ, Cha DK. Microbial reduction of perchlorate with zero-valent iron. *Water Research*, 2006, 40(10): 2027-2032.
- [32] Son A, Schmidt CJ, Shin H, Cha DK. Microbial community analysis of perchlorate-reducing cultures growing on zero-valent iron. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, 185(2-3): 669-676.
- [33] Shih Y, Tai Y. Reaction of decabrominated diphenyl ether by zerovalent iron nanoparticles. *Chemosphere*, 2010, 78(10): 1200-1206.
- [34] Zhuang Y, Ahn S, Luthy RG. Debromination of polybrominated diphenyl ethers by nanoscale zerovalent iron: pathways, kinetics, and reactivity. *Environmental Science and Technology*, 2010, 44(21): 8236-8242.
- [35] Fang Z, Qiu X, Chen J, Qiu X. Degradation of the polybrominated diphenyl ethers by nanoscale zero-valent metallic particles prepared from steel pickling waste liquor, *Desalination*, 2011, 267(1): 34-41.
- [36] Xu M, Guo J, Cen Y, Zhong X, Cao W, Sun G. *Shewanella decolorationis* sp. nov., a dye-decolorizing bacterium isolated from activated sludge of a waste-water treatment plant. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 2005, 55(1): 363-368.

Advance in the integrated microbial- Fe^0 treatment processes for environmental remediation—A review

Xingjuan Chen, Jun Guo, Meiying Xu*

Guangdong Institute of Microbiology, Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Provincial Key Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China

Abstract: Zero-valent iron (Fe^0) is very effective for the transformation of a wide variety of common environmental contaminants. No contaminant mineralization happened only by Fe^0 corrosion, but the pollutants would be completely detoxified and degraded by the integrated microbial- Fe^0 treatment, which represent a new generation of environmental remediation technologies. In this paper, the mechanism, microbial diversity and application of the integrated microbial- Fe^0 treatment processes were reviewed. In addition, we also discussed the main problems and challenges in this filed.

Keywords: zero-valent iron (Fe^0), microorganism, integrated treatment, environmental remediation

(本文责编:王晋芳)

Supported by the Team Project of the Natural Science Foundation of Guangdong (9351007002000001), by the Outstanding Scholarship Foundation of Guangdong Academy of Sciences (200902), by the Doctorial Start-up Project of the Natural Science Foundation of Guangdong (10451007002006347), by the Youth Research Foundation of Guangdong Academy of Sciences (qnjj201003), by the Guangdong Provincial Programs of Scientific and Technological Achievement Promotion (2008B040200015) and by the Guangzhou Programs of Scientific and Technological Achievement Promotion (2008C13G041)

* Corresponding author. Tel/Fax: +86-20-87684471; E-mail: xumy@gdim.cn

Received: 15 February 2011/ Revised: 23 March 2011