

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第5期

Vol.35 No.5

2014

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

长三角地区秸秆燃烧排放因子与颗粒物成分谱研究 唐喜斌, 黄成, 楼晟荣, 乔利平, 王红丽, 周敏, 陈明华, 陈长虹, 王倩, 李贵玲, 李莉, 黄海英, 张钢锋 (1623)

南京市大气颗粒物中水溶性离子的粒径分布和来源解析 薛国强, 朱彬, 王红磊 (1633)

2011年春季沙尘天气影响下上海大气颗粒物及其化学组分的变化特征 李贵玲, 周敏, 陈长虹, 王红丽, 王倩, 楼晟荣, 乔利平, 唐喜斌, 李莉, 黄海英, 陈明华, 黄成, 张钢锋 (1644)

结合外场观测分析珠三角二次有机气溶胶的数值模拟 郭晓霜, 司徒淑婷, 王雪梅, 丁翔, 王新明, 闫才青, 李小滢, 郑玫 (1654)

2013年夏季嘉兴市一次光化学事件的观测分析 沈利娟, 李莉, 吕升, 张孝寒, 吴博, 章国骏, 王翡 (1662)

移动监测法测量厦门春秋季节近地面 CO₂ 的时空分布 李燕丽, 邢振雨, 穆超, 杜可 (1671)

秸秆烟尘和灰烬中元素碳的稳定同位素组成 刘刚, 李久海, 徐慧, 吴丹, 刘艳 (1680)

连续测量大气·OH的化学电离飞行时间质谱仪的研制 窦健, 花磊, 侯可勇, 蒋蕾, 谢园园, 赵无垠, 陈平, 王卫国, 田地, 李海洋 (1688)

我国重点城市水源及水厂出水中乙草胺的残留水平 于志勇, 金芬, 李红岩, 安伟, 杨敏 (1694)

巢湖水体组分垂向分布特征及其对水下光场的影响 马孟泉, 张玉超, 钱新, 马荣华, 段洪涛 (1698)

京杭大运河(杭州段)典型断面水生生物多样性调查及其与水环境相关性研究 陆胤, 许晓路, 张德勇, 王莉, 朱旭妮, 冯凤, 周巧君, 谢鹏 (1708)

合肥市区典型景观水体氮磷污染特征及富营养化评价 李如忠, 刘科峰, 钱靖, 杨继伟, 张翩翩 (1718)

重庆园博园龙景湖新建初期内源氮磷分布特征及扩散通量估算 潘延安, 雷沛, 张洪, 单保庆, 李杰 (1727)

千岛湖库区及其主要入库河流水中有机氯农药残留污染特征及健康风险评价 唐访良, 张明, 徐建芬, 阮东德, 陈峰, 吴志旭, 程新良 (1735)

九龙江流域潜在病原菌污染分析 侯丽媛, 胡安谊, 马英, 于昌平 (1742)

江湖关系变化对鄱阳湖沉积物重金属分布及生态风险影响 刘婉清, 倪兆奎, 吴志强, 王圣瑞, 曾清如 (1750)

鄱阳湖-乐安河湿地水土环境中重金属污染的时空分布特征 简敏菲, 李玲玉, 徐鹏飞, 陈朴青, 熊建秋, 周雪玲 (1759)

典型岩溶水系统中溶解性有机质的运移特征 姚昕, 邹胜章, 夏日元, 许丹丹, 姚敏 (1766)

基于扰动分析方法的 AnnAGNPS 模型水文水质参数敏感性分析 席庆, 李兆富, 罗川 (1773)

混合胁迫条件下蓝藻运动特性研究 孙秀秀, 丛海兵, 高郑娟, 崔朝杰, 曹倩倩 (1781)

不同波长和强度光照对水体汞还原的影响 李希嘉, 钟紫旋, 孙荣国, 杨鲲, 王定勇 (1788)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的影响 杨文君, 郭迎庆, 杜尔登 (1793)

溴化铍可见光催化降解高效氯氟菊酯的研究 彭一莱, 赵小蓉, 贾漫珂, 周薇, 黄应平 (1798)

石墨烯基磁性复合材料吸附水中亚甲基蓝的研究 常青, 江国栋, 胡梦璇, 黄佳, 唐和清 (1804)

电化学氧化 PFOA 阳极材料筛选及其机制研究 卓琼芳, 邓述波, 许振成, 余刚 (1810)

典型抗生素在中国西南地区某污水处理厂中的行为和归趋 甘秀梅, 严清, 高旭, 张怡昕, 訾成方, 彭绪亚, 郭劲松 (1817)

颗粒状大孔阴树脂去除有机物以及缓解膜污染的效果与机制 何欢, 董秉直, 许光红, 闫昭辉 (1824)

石墨-活性炭纤维复合电极电吸附处理含盐废水的研究 周贵忠, 王兆丰, 王绚, 李文倩, 李少香 (1832)

靛基氯甲基化聚苯乙烯的制备及废水生化处理应用 张华雨, 许晴, 牛春梅, 王亚君, 侯正浩, 李绍英, 陈延明, 廉静, 吴士彬, 郭建博 (1838)

FePMo₁₂ 催化电化学反应降解染料废水的研究 王栗, 岳琳, 郭建博, 杨景亮, 廉静, 罗晓, 王开红 (1843)

实际污水培养好氧颗粒污泥及其特性研究 杨淑芳, 张健君, 邹高龙, 杜至力 (1850)

SFBR 中好氧颗粒污泥的培养及特性研究 龙焙, 杨昌柱, 濮文虹, 杨家宽, 白俊, 王晶, 周玄月, 蒋国盛, 李春阳, 刘福标 (1857)

不同好/厌氧区容积负荷对生物膜/颗粒污泥耦合工艺脱氮除磷的影响 尹航, 刘畅, 高辉, 高大文 (1866)

黄原酸化废弃污泥吸附 Cu²⁺ 研究 岑艳, 全向春, 姜晓满 (1871)

轮叶黑藻和穗花狐尾藻对铜的吸收机制研究 薛培英, 李国新, 赵全利 (1878)

不同烧制温度下玉米秸秆生物炭的性质及对萘的吸附性能 黄华, 王雅雄, 唐景春, 朱文英 (1884)

北京常见绿化树种叶片富集重金属能力研究 李少宁, 孔令伟, 鲁绍伟, 陈波, 高琛, 石媛 (1891)

泰州市区重金属污染的藜袋法与路尘法评价研究 陈勤, 方炎明, 颜赞, 陈步金 (1901)

放牧对呼伦贝尔草甸草原土壤呼吸温度敏感性的影响 王旭, 闫瑞瑞, 邓钰, 闫玉春, 辛晓平 (1909)

苹果园土壤呼吸的变化及生物和非生物因素的影响 王蕊, 郭胜利, 刘庆芳, 张彦军, 姜继超, 郭慧敏, 李如剑 (1915)

重庆铁山坪森林土壤汞释放通量的影响因子研究 王琼, 罗遥, 杜宝玉, 叶芝祥, 段雷 (1922)

上海市郊区养殖场周边环境砷含量特征 奚功芳, 周守标, 丁海城, 姚春霞, 孔娟娟 (1928)

不同施氮量下水稻分蘖期光合碳向土壤碳库的输入及其分配的量化研究: ¹³C 连续标记法 谭立敏, 吴昊, 李卉, 周萍, 李科林, 王久荣, 葛体达, 袁红朝, 吴金水 (1933)

污灌区盐分累积对土壤汞吸附行为影响的模拟研究 郑顺安, 李晓华, 徐志宇 (1939)

石灰干化污泥稳定后土壤中 Pb、Cd 和 Zn 浸出行为的研究 李翔, 宋云, 刘永兵 (1946)

大连市海产品中短链氯化石蜡的含量与分布研究 虞俊超, 王宝盛, 王亚韡, 孟梅, 陈茹, 江桂斌 (1955)

应用生物配体模型(BLM)研究辽河与太湖水体中铜对大型溞的急性毒性 周腾耀, 曹莹, 覃璐玫, 张亚辉, 曾鸿鸣, 闫振广, 刘征涛 (1962)

氧化铜纳米颗粒对水稻幼苗根系代谢毒性的研究 王淑玲, 张玉喜, 刘汉柱, 辛华 (1968)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制 黄捷, 叶锦韶, 尹华, 彭辉, 马嘉雯, 唐立涛, 王惜若 (1974)

牛粪混合液微生物燃料电池长期运行稳定性研究 焦燕, 张国栋, 赵庆良 (1981)

针铁矿对城市生活垃圾有机组分厌氧发酵的影响 杨露露, 岳正波, 陈天虎, 王进 (1988)

城市生活垃圾集装箱转运过程中污染物产生状况研究 王晓媛, 刘殷华, 汪飞, 黄长缨, 陆峰, 谢冰 (1994)

铈插层黏土负载铁催化剂在 H₂S 选择性催化氧化过程中催化性能的研究 孙超, 张鑫, 郝郑平, 窦广玉, 孙春宝 (2002)

脱硫类水滑石衍生复合氧化物不同方法的制备与表征 祝春蕾, 王海林, 孙春宝 (2010)

固定污染源排气中 PM_{2.5} 采样方法综述 蒋靖坤, 邓建国, 李振, 李兴华, 段雷, 郝吉明 (2018)

产甲烷微生物研究概况 李煜珊, 李耀明, 欧阳志云 (2025)

《环境科学》征稿简则(1961) 《环境科学》征订启事(1967) 信息(1643, 1687, 1803, 1837)

地下水中常见离子对纳米零价铁除 Se(IV) 动力学的 影响

杨文君, 郭迎庆*, 杜尔登

(常州大学环境与安全工程学院, 常州 213164)

摘要: 采用间歇实验对纳米零价铁(nZVI)除四价硒(Se(IV))进行实验性研究,考察了地下水中共存离子对 nZVI 除 Se(IV) 动力学的影响. 结果表明,在厌氧条件下,当 nZVI 投加量为 $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, Se(IV) 浓度为 $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NaCl 浓度为 $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$, $T = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$ 时,投加 CO_3^{2-} 或 SO_4^{2-} 浓度为 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、腐殖酸(humic acid, HA)为 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,明显抑制了 Se(IV) 的去除. 投加 $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ 或 Mg^{2+} 时,对除 Se(IV) 影响不大;而 Ca^{2+} ($3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)、 Mg^{2+} ($3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$) 时, Se(IV) 的去除效率明显下降. 未加共存离子时,Se(IV) 在 20 min 时基本去除完,共存离子存在的情况下, nZVI 对 Se(IV) 的去除率在 30 min 时达到 100%. 反应过程中二价铁(Fe^{2+})随着 Se(IV) 的去除趋于平稳. ORP 在反应过程中快速从正值下降至负值,由此说明 nZVI 除 Se(IV) 的过程发生了还原反应.

关键词: 厌氧; 纳米零价铁; 地下水; 吸附还原; 共存离子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1793-05 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.05.022

Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron

YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng

(School of Environmental and Safety Engineering, Changzhou University, Changzhou 213164, China)

Abstract: Batch experiments are used to research selenite removal from groundwater by nanoscale zero-valent iron (nZVI), and dynamic effects of commonly co-existing anions on the removal of selenite are also investigated. The results showed that under anoxic conditions, when nZVI dose was $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, the concentration of Se(IV)/sodium chloride was $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}/0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$, $T = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$, auto-adding $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ CO}_3^{2-}$ or SO_4^{2-} , $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ humic acid (HA), the removals of Se(IV) were obviously inhibited. The weak effect on the removal of Se(IV) was observed when added $0.5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} \text{ Ca}^{2+}$ or Mg^{2+} , while concentrations of Ca^{2+} and Mg^{2+} were $3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ and $3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ respectively, removal efficiency of Se(IV) were evidently decreased. Without co-existing ions, Se(IV) were totally removed in 20 min, while with co-existing ions, removal efficiency of Se(IV) were achieved 100% in 30 min. Bivalent iron tended to stationary with the remove of Se(IV) in reaction processes. ORP rapidly decreased from positive to negative in the process of reaction, which illustrated the process of remove Se(IV) by nZVI was the reduction reaction.

Key words: anoxic conditions; nano-zero valent iron; groundwater; adsorption and reduction; co-existing anions

硒是人体内必需的微量元素之一,人体缺硒会导致心脏疾病、免疫系统功能脆弱等,而硒过量则会对人体有伤害. 过去 20 年里人类一直致力于研究从被硒污染的水体中除硒,除硒方法通常包括吸附法,还原法等,虽有研究者对这些技术进行了研究和探索,但要实现对硒污染水的经济、高效处理依然是一个亟待解决的问题. 随着城市化的发展,硒污染水体的现象越来越严重,硒超标的水体也将日趋增多,再加之我国水资源的匮乏,使得开发利用水资源特别是对于含硒量高的水源进行处理势在必行.

水体中的硒主要有两个方面的来源:一是个别水体流经硒含量高的地层,从而造成地下水或泉水的超标;二是含硒工业废水的排放,这也是水体

中硒的主要来源^[1]. 一般在天然水中有六价硒 [Se(VI)]、四价硒 [Se(IV)] 存在,含量大多数在 $1 \mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$ 以下,但是流经富含硒的地层会导致水体中的硒含量严重超标,高达几百 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. 含硒废水主要来自冶炼含硒的金属矿石、炼油、制造硫酸等行业^[2].

在自然界中按硒的结合形态分为无机硒和有机硒. H_2Se 有毒且不稳定,在空气中能迅速被氧化成无毒的单质硒,在强还原条件下,它会形成不溶性金属硒化合物沉淀^[3]. 在硒超标的原水中,硒主要是

收稿日期: 2013-07-31; 修订日期: 2013-12-06

基金项目: 国家自然科学基金项目(21277095)

作者简介: 杨文君(1987~),女,硕士研究生,主要研究方向为水体中硒污染处理技术, E-mail: ideywj@126.com

* 通讯联系人, E-mail: water8820@163.com

以无机的硒酸根离子 $[\text{SeO}_4^{2-}, \text{Se}(\text{VI})]$ 和亚硒酸根离子 $[\text{SeO}_3^{2-}, \text{Se}(\text{IV})]$ 形式存在,通常 SeO_3^{2-} 比 SeO_4^{2-} 更为普遍.在多数情况下,硒是以这两种离子形式共存.地下水中的硒主要有 $\text{Se}(\text{IV})$ 、 $\text{Se}(\text{VI})$ 以及有机硒这几种形态,其中以 $\text{Se}(\text{IV})$ 、 $\text{Se}(\text{VI})$ 为主.废水中的硒以硒酸盐、亚硒酸盐、硒化物、单质硒等形式存在,含量为几十至数百 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$.

$\text{Se}(\text{0})$ 是固体而 $\text{Se}(-\text{II})$ 易与共存的金属离子形成沉淀,易从水中分离,因此去除水中 $\text{Se}(\text{IV})/\text{Se}(\text{VI})$ 的最重要的方法之一就是还原法,即利用还原剂把 $\text{Se}(\text{IV})/\text{Se}(\text{VI})$ 还原为 $\text{Se}(\text{0})$ 或 $\text{Se}(-\text{II})$ 然后从水中分离出去.纳米零价铁不仅具有零价铁的特性,且具有更大的比表面积,其活性中心随表面积的增大而增多,利用nZVI颗粒特有的表面效应和小尺寸效应,可以提高零价铁颗粒的反应活性和处理效率^[4].一些研究表明,纳米铁能有效去除环境中许多常规化学方法或微生物难以降解的污染物^[5].近年来,国内外一些研究者利用nZVI处理水中各种氯代有机物^[6,7]、重金属等进行处理,取得了较好的效果.Zhang等^[8]研究了在 Cl^- 、 NO_3^- 、 HCO_3^- 、 PO_4^{3-} 等离子对零价铁除 $\text{Se}(\text{VI})$ 的影响,该研究表明,不同浓度的共存离子对硒的去除影响不同.由此可见,不同共存离子对零价铁的除污效果有很大影响,因此研究不同离子对纳米零价铁活性的影响

非常重要.

地下水环境中往往存在某些不同的离子,它们的相互作用极易生成沉淀物,覆盖零价铁表面活性位点,阻碍反应进行.鉴于此,本研究选取地下水中常见离子作为对象,考察了不同离子对 $\text{Se}(\text{IV})$ 还原过程的影响,并对影响机制进行讨论和分析.

1 材料与方法

1.1 实验试剂与仪器

纳米零价铁粉(nZVI)粒径大约为50 nm(购于北京德科岛金纳米材料有限公司),nZVI如图1所示; Na_2SeO_3 (国药集团化学试剂有限公司);三羟甲基氨基甲烷(Tris)、 HNO_3 、浓 HCl 、 NaCl 、 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 、 CaCl_2 、 MgCl_2 均来自上海强盛功能化学股份有限公司.

磁力搅拌器(上海国华贸易发展有限公司);扫描式电子显微镜(SEM)、X射线衍射(XRD)(同济大学重点实验室提供).

$\text{Se}(\text{IV})$ 储备液($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$),硝酸储备液($2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$), NaCl 溶液($1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$),HA的浓度为 $2.619\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$; SO_4^{2-} 、 CO_3^{2-} 分别来源于 Na_2SO_4 、 Na_2CO_3 ; Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 分别来源于 CaCl_2 、 MgCl_2 ;所用试剂均为分析纯,实验用水均为去离子水(来源于Milli-Q Water).

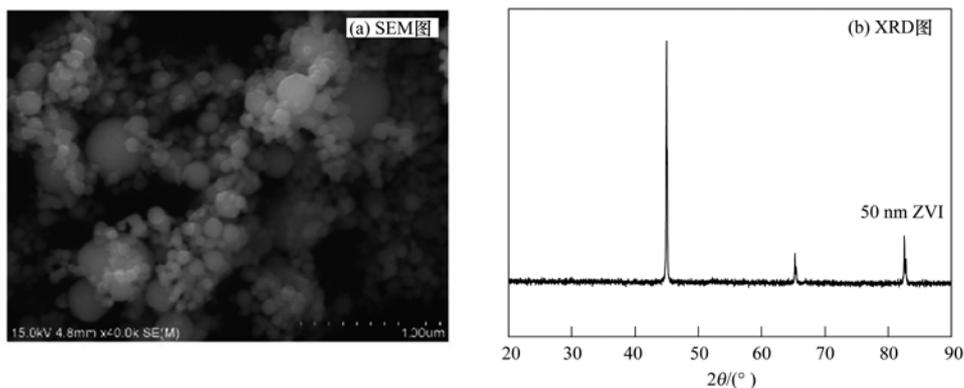


图1 纳米零价铁

Fig. 1 Nanoscale zero-valent iron

1.2 实验步骤

反应在500 mL的广口瓶中进行,反应系统中包含 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Tris缓冲, $100\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 $\text{Se}(\text{IV})$ 储备液, $0.01\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 NaCl 溶液,用浓盐酸调溶液初始pH为7.0.为了模拟地下水厌氧环境,反应前水样先用高纯氮曝气30 min,使其溶解氧值接近 $0\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,反应过程中一直曝氮气,控制反应在厌氧

条件下发生.反应温度控制在 $25^\circ\text{C}\pm 1^\circ\text{C}$.根据实验需求加入不同浓度的阴阳离子或HA.取初始样后加入 $0.1\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的nZVI,反应开始后间隔一定时间取样,用 $0.22\text{ }\mu\text{m}$ 的滤头过滤后挤入10 mL的聚四氟乙烯小管中,管内装有 $200\text{ }\mu\text{L}$ 的 $2\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 硝酸储备液,使酸化至 $\text{pH}<1$.

1.3 分析方法

反应体系中剩余 Se(IV) 浓度用 ICP-Agilent 720 ES 仪器测定. 用邻菲罗啉法测定 Fe^{2+} 浓度, 所用分光光度计为 TU-1901 型紫外可见分光光度计. 溶液反应过程中 pH 及 ORP (501 型复合电极) 变化用 pH 计 (雷磁, pHS-3C) 监测. 所有实验重复 2 次 (或 2 次以上) 以提高数据重现性.

2 结果与讨论

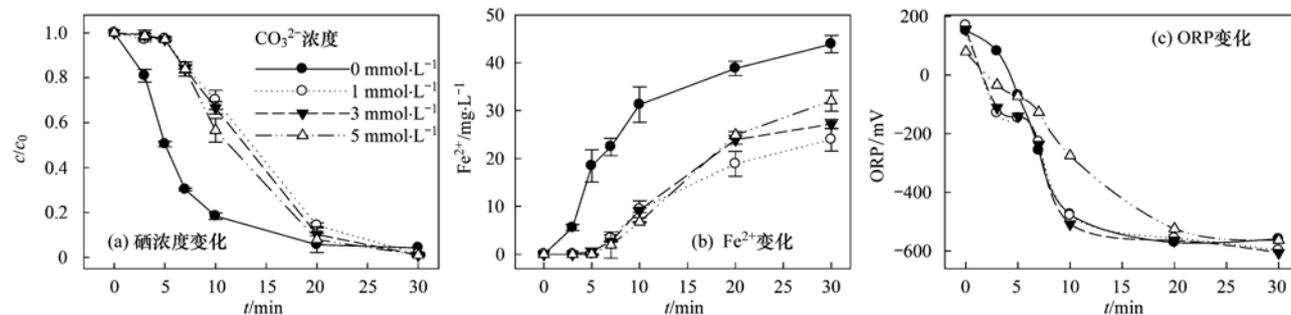
2.1 不同阴离子的影响

反应过程中考察了地下水中常见阴离子 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 或 HA 对 nZVI 除 Se(IV) 的影响.

2.1.1 CO_3^{2-} 影响

在不同 CO_3^{2-} 离子浓度条件下, 反应过程中 Se(IV) 浓度、 Fe^{2+} 浓度、OPR 的变化见图 2. 从图 2 (a) 可以看出, 硒浓度随时间延长呈线性下降趋势, CO_3^{2-} 的投加浓度越低, Se(IV) 浓度降低越缓慢, 可看出 CO_3^{2-} 离子抑制了 nZVI 还原 Se(IV), 且作用大小与投加浓度有关, CO_3^{2-} 离子浓度的抑制作用依次

为: $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} > 3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} > 5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 反应过程中 pH 持续升高至 7.3 左右并基本保持稳定, Fe^{2+} 随着反应进行持续增长, 这是因为离子强度的增大促进了铁的腐蚀并释放 Fe^{2+} 和 OH^- , 同时 Fe^0 还原 Se(IV) 的过程中也释放 Fe^{2+} 和 OH^- , 从而导致溶液 pH 及 Fe^{2+} 升高, 但随后由于它们形成铁氢氧化物沉淀附着在铁粉表面而使反应停止, 从而使溶液 pH 及 Fe^{2+} 保持稳定 [如图 2 (b)]. 分别加入 1、3、5 $\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ CO_3^{2-} 后, 10 min 时硒的去除率分别达到 27%、35%、47%, 而未加 CO_3^{2-} 时硒的去除率达到 82%, 由此可见, CO_3^{2-} 对 nZVI 除硒的抑制作用非常明显, 尤其是投加浓度为 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 时. 这是因为 CO_3^{2-} 在铁氧化物表面与 Se(IV) 形成竞争吸附点位, 降低了 nZVI 表面对 Se(IV) 的吸附, 从而起了抑制作用. 从图 2 (c) 可以看出, 在硒还原过程中, ORP 的变化趋势都是随着反应的进行快速下降至 -600 mV 左右, 由此可知体系开始发生还原反应, 反应生成的 Fe^{2+} 开始释放, 促进反应的快速发生.



nZVI = $0.1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$, Se(IV) = $100 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$, NaCl = $0.01 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$, pH = 7.0, $T = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

图 2 不同初始浓度 CO_3^{2-} 离子对 nZVI 除 Se(IV) 影响

Fig. 2 Effect of different initial CO_3^{2-} concentration on the remove of Se(IV) by nZVI

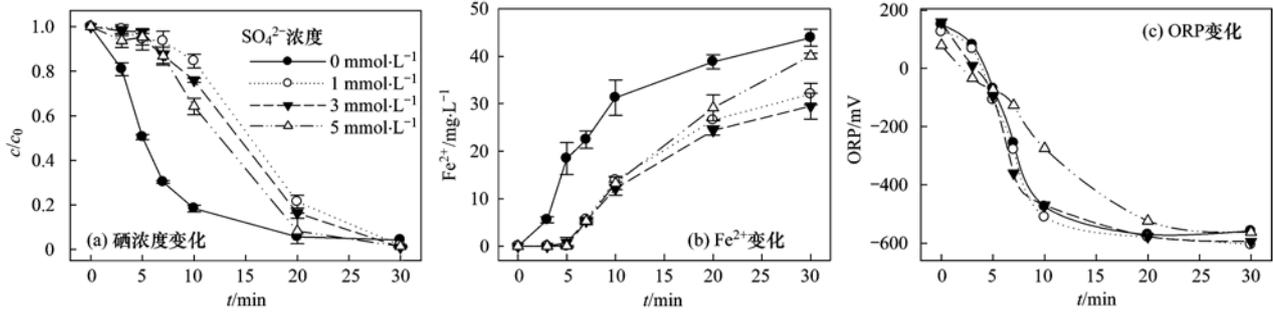
2.1.2 SO_4^{2-} 影响

如图 3 (a) 硒浓度变化可知, 分别加入 $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$ SO_4^{2-} 后, 都不可避免的起到了抑制作用, 且抑制作用依次为: $1 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} > 3 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1} > 5 \text{ mmol}\cdot\text{L}^{-1}$. 10 min 时硒的去除率分别达到 18%、25%、33%, 而未加 SO_4^{2-} 时硒的去除率达到 82%. Fe^{2+} 随着反应进行持续增长, 这是因为 nZVI 还原 Se(IV) 的过程中释放了 Fe^{2+} , nZVI 本身也腐蚀生产了 Fe^{2+} , 由此 Fe^{2+} 在前 20 min 时快速上升, 而 20 min 后 Se(IV) 基本去除完时, Fe^{2+} 变化也趋于平稳 [如图 3 (b)], 这也可以从 ORP 的变化中看出来 [如图 3 (c)], ORP 随着 nZVI 的投加, 快速地发生了还原反应, 由此 ORP 值快速地从 200 mV 左右下降至 -600 mV 左右, 而

20 min 后 ORP 也趋于稳定, 维持在 -600 mV 左右. SO_4^{2-} 是二价离子, 具有较强的离子竞争能力, SO_4^{2-} 的投加在铁氢氧化物表面形成竞争吸附点位, 由此延迟和限制了 Se(IV) 的去除, 另一方面, 纳米铁还原 Se(IV) 速率降低有可能是纳米铁的快速腐蚀导致 pH 值较快增高, 在含有 SO_4^{2-} 溶液中, 高 pH 值可降低 Se 的吸附, 从而抑制了 Se(IV) 的去除.

2.1.3 HA 影响

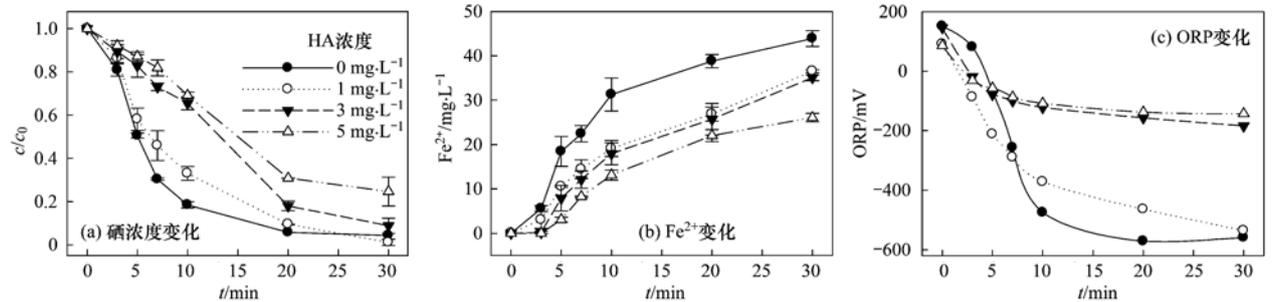
从图 4 (a) 可以看出, nZVI 的还原速率随着 HA 浓度的增加而降低, 但是在一定范围内不明显. 当 HA 浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时, 反应 10 min 时, 其去除率达到 69%, 而相比不加 HA 时降低了十几个百分点. 可见在 HA 存在时, 会对 nZVI 还原 Se(IV) 产生一定的抑制作用. 而 HA 浓度为 $3 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 、 $5 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,



$nZVI = 0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Se}(\text{IV}) = 100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaCl} = 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$, $T = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

图3 不同初始浓度 SO_4^{2-} 离子对 nZVI 除 $\text{Se}(\text{IV})$ 影响

Fig. 3 Effect of different initial SO_4^{2-} concentration on the remove of $\text{Se}(\text{IV})$ by nZVI



$nZVI = 0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Se}(\text{IV}) = 100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaCl} = 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$, $T = 25^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$

图4 不同初始浓度 HA 对 nZVI 除 $\text{Se}(\text{IV})$ 影响

Fig. 4 Effect of different initial HA concentration on the remove of $\text{Se}(\text{IV})$ by nZVI

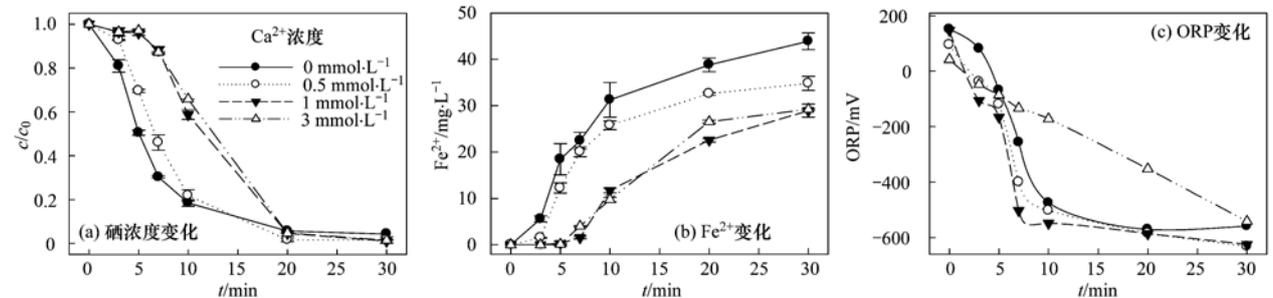
对应的硒浓度曲线明显高于其他低 HA 浓度的曲线, $\text{Se}(\text{IV})$ 的去除率仅分别为 32.51%、31.97%。可能由于 HA 作为一种水溶性大分子胶体, 其本身会在 nZVI 等颗粒表面进行吸附修饰, 从而会对水体污染物在纳米铁上的吸附性能产生抑制作用, 浓度增加抑制作用越强。所以随着 HA 浓度的增加, 即 $5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 铁表面吸附物增多占主导, 使得反应效率有所降低。

2.2 不同阳离子的影响

在反应过程中, 考察了地下水中常见阳离子 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对纳米零价铁除硒的影响。

2.2.1 Ca^{2+} 影响

如图 5 (a) 所示, 考察了 0.5 、 1 、 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ Ca^{2+} 对 nZVI 除 $\text{Se}(\text{IV})$ 过程的影响。从中可以看出 Ca^{2+} 的投加总体上减缓了 $\text{Se}(\text{IV})$ 的去除, 未加 Ca^{2+} 时 $\text{Se}(\text{IV})$ 在 20 min 时已被去除完。不同浓度的 Ca^{2+} 离子的抑制作用大小不同, 当 Ca^{2+} 离子投加量为 $0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 抑制不明显, 而投加量为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 对应的硒浓度去除率从没投加 Ca^{2+} 离子时的 82% 降低为 34%。这可能是因为 Ca^{2+} 在反应过程中生成了氢氧化物沉淀, 阻碍了反应的发生, 从而 $\text{Se}(\text{IV})$ 去除率下降。



$nZVI = 0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{Se}(\text{IV}) = 100 \text{ } \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{NaCl} = 0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{pH} = 7.0$, $T = 25 \pm 1^\circ\text{C}$

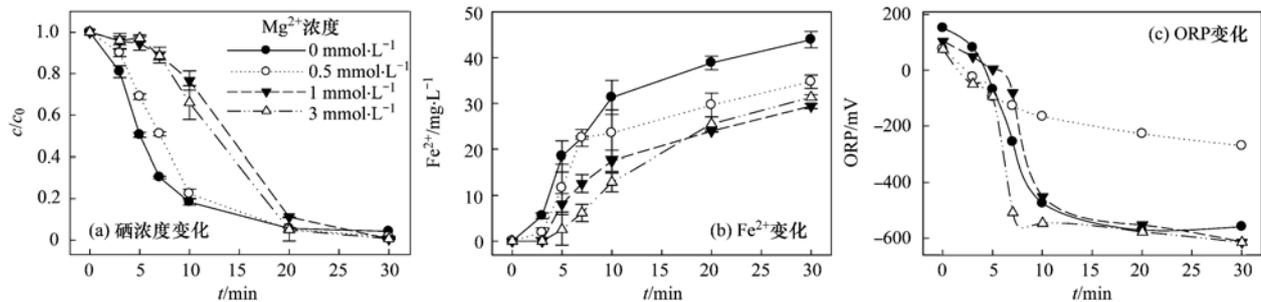
图5 不同初始浓度 Ca^{2+} 离子对 nZVI 除 $\text{Se}(\text{IV})$ 影响

Fig. 5 Effect of different initial Ca^{2+} concentration on the remove of $\text{Se}(\text{IV})$ by nZVI

2.2.2 Mg^{2+} 影响

由图 6(c) 可知, ORP 随着反应的进行呈下降趋势, 从初始的 200 mV 左右下降至 -600 mV 左右, 表明了该体系发生了还原反应, 随着反应的进行, nZVI 被氧化成二价铁, 二价铁快速释放, 促进了反应的快速发生, 由图 6(a) 中浓度的变化可知, 30 min 时反应已经终止, Se(IV) 被完全去除. 投加不同浓度的 Mg^{2+} 离子后可看出, 投加浓度为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 时抑制

作用最明显, 10 min 时投加 0.5 、 1 、 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 Mg^{2+} 离子, Se(IV) 去除率分别为 76%、39.69%、20.06%, 由此可看出抑制作用大小为 $3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} > 1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1} > 0.5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$. Mg^{2+} 离子起抑制作用可能是所投加的 Mg^{2+} 覆盖在铁表面上, 镁离子与氢氧根离子结合在 nZVI 表面形成氢氧化镁沉淀, 该钝化的化合物抑制了电子在铁表面的转移, 所以降低了 nZVI 还原 Se(IV) 的速率.



nZVI = $0.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, Se(IV) = $100 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, NaCl = $0.01 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH = 7.0, $T = 25 \pm 1^\circ\text{C}$

图 6 不同初始浓度 Mg^{2+} 离子对 nZVI 除 Se(IV) 影响

Fig. 6 Effect of different initial Mg^{2+} concentration on the remove of Se(IV) by nZVI

3 结论

(1) 纳米零价铁是一种有效的除硒材料, 对去除受污染水体中重金属的效能也明显优于其它技术.

(2) 未有共存离子存在的前提下用纳米零价铁处理 Se(IV), 30 min 内 Se(IV) 被完全去除, 表明纳米零价铁具有强还原性, 可用于污染水体中硒的去除.

(3) 一些常见的共存离子, 如 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 、HA 以及 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 对纳米零价铁还原 Se(IV) 过程都有一定的抑制作用. 低浓度的 CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} ($1 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、高浓度的 HA ($5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)、高浓度的 Ca^{2+} ($3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$)、 Mg^{2+} ($3 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$) 明显抑制了纳米零价铁还原 Se(IV). CO_3^{2-} 、 SO_4^{2-} 离子的抑制作用影响规律一致, 都是高浓度下抑制作用更小, 可能是因为铁表面的等电点是在 6~8 左右, 所以表面带正电荷, 可以吸附负电荷的阴离子, 有利于负电荷的亚硒酸根吸附, 加入阴离子会竞争吸附位点, 所以导致抑制作用. 理论上应该是阴离子浓度越高反应越慢, 但是出现了快的过程, 可能是由于这些离子在浓度高的时候促进了铁的腐蚀, 所以稍有提高, 但

是整体上还是以抑制为主. 因此在对硒污染的地下水零价铁修复实践中, 应充分考虑地下水中常见离子产生的抑制影响.

参考文献:

- [1] 毛云. 离子交换法去除水中硒的研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2004.
- [2] 降林华, 段宁, 王允雨, 等. 我国硒污染分析与电解锰行业控制对策[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(12): 393-396.
- [3] 何靖海. 浅谈废水除硒的主要方法[J]. 中国科技博览, 2011, (35): 4.
- [4] 李小燕, 刘义保, 花明, 等. 纳米零价铁去除溶液中 U(VI) 的研究[J]. 核动力工程, 2013, 34(2): 160-163.
- [5] 田海风, 王静波. 纳米零价铁在水处理中的应用研究[J]. 山西水利, 2012, (3): 36-38.
- [6] Mueller N C, Braun J, Bruns J, et al. Application of nanoscale zero valent iron (NZVI) for groundwater remediation in Europe [J]. Environment Science Pollution Research, 2012, 19(2): 550-558.
- [7] Ritu S, Misra V, Singh R P. Removal of Cr(VI) by nanoscale Zero-valent Iron (nZVI) from soil contaminated with tannery wastes [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2012, 88(2): 210-214.
- [8] Zhang Y Q, Wang J F, Amrhein C, et al. Removal of selenate from water by zerovalent iron [J]. Journal of Environmental Quality, 2005, 34(2): 487-495.

CONTENTS

Emission Factors and PM Chemical Composition Study of Biomass Burning in the Yangtze River Delta Region	TANG Xi-bin, HUANG Cheng, LOU Sheng-rong, <i>et al.</i> (1623)
Size Distributions and Source Apportionment of Soluble Ions in Aerosol in Nanjing	XUE Guo-qiang, ZHU Bin, WANG Hong-lei (1633)
Characteristics of Particulate Matters and Its Chemical Compositions During the Dust Episodes in Shanghai in Spring, 2011	LI Gui-ling, ZHOU Min, CHEN Chang-hong, <i>et al.</i> (1644)
Numerical Modeling Analysis of Secondary Organic Aerosol (SOA) Combined with the Ground-based Measurements in the Pearl River Delta Region	GUO Xiao-shuang, SITU Shu-ping, WANG Xue-mei, <i>et al.</i> (1654)
Observation of a Photochemical Event in Jiaying During Summer 2013	SHEN Li-juan, LI Li, LÜ Sheng, <i>et al.</i> (1662)
Spatial and Temporal Variations of Near Surface Atmospheric CO ₂ with Mobile Measurements in Fall and Spring in Xiamen, China	LI Yan-li, XING Zhen-yu, MU Chao, <i>et al.</i> (1671)
Isotope Compositions of Elemental Carbon in the Smoke and Ash from Crop Straw Combustion	LIU Gang, LI Jiu-hai, XU Hui, <i>et al.</i> (1680)
Development of a Chemical Ionization Time-of-Flight Mass Spectrometer for Continuous Measurements of Atmospheric Hydroxyl Radical	DOU Jian, HUA Lei, HOU Ke-yong, <i>et al.</i> (1688)
Residual Levels of Acetochlor in Source Water and Drinking Water of China's Major Cities	YU Zhi-yong, JIN Fen, LI Hong-yan, <i>et al.</i> (1694)
Vertical Distribution of Water Quality and Its Influence on Underwater Light Field in Lake Chaohu	MA Meng-xiao, ZHANG Yu-chao, QIAN Xin, <i>et al.</i> (1698)
Correlation Between Aquatic Plant Diversity and Water Environment in the Typical Sites of Hangzhou Section of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	LU Yin, XU Xiao-lu, ZHANG De-yong, <i>et al.</i> (1708)
Nitrogen and Phosphate Pollution Characteristics and Eutrophication Evaluation for Typical Urban Landscape Waters in Hefei City	LI Ru-zhong, LIU Ke-feng, QIAN Jing, <i>et al.</i> (1718)
Distribution of Nitrogen and Phosphorus in the Sediments and Estimation of the Nutrients Fluxes in Longjinghu Lake, Chongqing City, During the Initial Impoundment Period	PAN Yan-an, LEI Pei, ZHANG Hong, <i>et al.</i> (1727)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Organochlorine Pesticides (OCPs) in the Water of Lake Qiandao and Its Major Input Rivers	TANG Fang-liang, ZHANG Ming, XU Jian-fen, <i>et al.</i> (1735)
Distribution of Potential Pathogenic Bacteria in the Jiulong River Watershed	HOU Li-yuan, HU An-yi, Ma Ying, <i>et al.</i> (1742)
Influence of the River-lake Relation Change on the Distribution of Heavy Metal and Ecological Risk Assessment in the Surface Sediment of Poyang Lake	LIU Wan-qing, NI Zhao-kui, WU Zhi-qiang, <i>et al.</i> (1750)
Spatiotemporal Variation Characteristics of Heavy Metals Pollution in the Water, Soil and Sediments Environment of the Lean River-Poyang Lake Wetland	JIAN Min-fei, LI Ling-yu, XU Peng-fei, <i>et al.</i> (1759)
Dissolved Organic Matter (DOM) Dynamics in Karst Aquifer Systems	YAO Xin, ZOU Sheng-zhang, XIA Ri-yuan, <i>et al.</i> (1766)
Sensitivity Analysis of AnnAGNPS Model's Hydrology and Water Quality Parameters Based on the Perturbation Analysis Method	XI Qing, LI Zhao-fu, LUO Chuan (1773)
Movement Characteristics of <i>Cyanobacteria</i> Under Stress of Water-Lifting Aeration	SUN Xiu-xiu, CONG Hai-bing, GAO Zheng-juan, <i>et al.</i> (1781)
Influence of Light Wavelength and Intensity on the Reduction of Divalent Mercury in Aquatic System	LI Xi-jia, ZHONG Zi-xuan, SUN Rong-guo, <i>et al.</i> (1788)
Dynamic Effects of Commonly Co-Existing Anions on the Removal of Selenite from Groundwater by Nanoscale Zero-Valent Iron	YANG Wen-jun, GUO Ying-qing, DU Er-deng (1793)
BiOBr Promoted the Photocatalytic Degradation of Beta-cypermethrin Under Visible Light	PENG Yi-zhu, ZHAO Xiao-rong, JIA Man-ke, <i>et al.</i> (1798)
Adsorption of Methylene Blue from Aqueous Solution onto Magnetic Fe ₃ O ₄ /Graphene Oxide Nanoparticles	CHANG Qing, JIANG Guo-dong, HU Meng-xuan, <i>et al.</i> (1804)
Selection of Electrochemical Anodic Materials for PFOA Degradation and Its Mechanism	ZHUO Qiong-fang, DENG Shu-bo, XU Zhen-cheng, <i>et al.</i> (1810)
Occurrence and Fate of Typical Antibiotics in a Wastewater Treatment Plant in Southwest China	GAN Xiu-mei, YAN Qing, GAO Xu, <i>et al.</i> (1817)
Effects and Mechanism on Removing Organics and Reduction of Membrane Fouling Using Granular Macro-Porous Anion Exchange Resin in Drinking Water Treatment	HE Huan, DONG Bing-zhi, XU Guang-hong, <i>et al.</i> (1824)
Research on Treatment of High Salt Wastewater by the Graphite and Activated Carbon Fiber Composite Electrodes	ZHOU Gui-zhong, WANG Zhao-feng, WANG Xuan, <i>et al.</i> (1832)
Preparation and Application of the Quinonyl Chloromethylation Polystyrene in Biological Treatment of Wastewater	ZHANG Hua-yu, XU Qing, NIU Chun-mei, <i>et al.</i> (1838)
Enhanced Electro-Catalytic Oxidation of Dye Wastewater with FePMo ₁₂ Adopted Catalyst	WANG Li, YUE Lin, GUO Jian-bo, <i>et al.</i> (1843)
Formation and Characterization of Aerobic Granules in a Pilot-scale Reactor for Real Wastewater Treatment	YANG Shu-fang, ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, <i>et al.</i> (1850)
Research on Cultivation of Aerobic Granular Sludge and Its Characteristics in Sequencing Fed Batch Reactor	LONG Bei, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1857)
Effect of Different Volume Loading of Aerobic/Anaerobic Zone on Nitrogen and Phosphorus Removal by Biofilm and Granular Sludge Coupling Process	YIN Hang, LIU Chang, GAO Hui, <i>et al.</i> (1866)
Adsorption of Cu ²⁺ by Xanthate-Functionalized Waste Sludge	CEN Yan, QUAN Xiang-chun, JIANG Xiao-man (1871)
Mechanisms of Copper Uptake by Submerged Plant <i>Hydrilla verticillata</i> (L. f.) Royle and <i>Myriophyllum spicatum</i> L.	XUE Pei-ying, LI Guo-xin, ZHAO Quan-li (1878)
Properties of Maize Stalk Biochar Produced Under Different Pyrolysis Temperatures and Its Sorption Capability to Naphthalene	HUANG Hua, WANG Ya-xiong, TANG Jing-chun, <i>et al.</i> (1884)
Beijing Common Green Tree Leaves' Accumulation Capacity for Heavy Metals	LI Shao-ming, KONG Ling-wei, LI Shao-wei, <i>et al.</i> (1891)
Assessment of Heavy Metal Contamination by Moss-bag Method and Road-dust Method for Taizhou Urban Area	CHEN Qin, FANG Yan-ming, YAN Yun, <i>et al.</i> (1901)
Effect of Grazing on the Temperature Sensitivity of Soil Respiration in Hulunber Meadow Steppe	WANG Xu, YAN Rui-rui, DENG Yu, <i>et al.</i> (1909)
Variation Characteristic in Soil Respiration of Apple Orchard and Its Biotic and Abiotic Influencing Factors	WANG Rui, GUO Sheng-li, LIU Qing-fang, <i>et al.</i> (1915)
Influencing Factors of Mercury Emission Flux from Forest Soil at Tieshanping, Chongqing	WANG Qiong, LUO Yao, DU Bao-yu, <i>et al.</i> (1922)
Characteristics of Arsenic Content in the Livestock Farms' Surrounding Environment in Shanghai Suburbs	XI Gong-fang, ZHOU Shou-biao, DING Hai-cheng, <i>et al.</i> (1928)
Input and Distribution of Rice Photosynthesized Carbon in the Tillering Stage Under Different Nitrogen Application Following Continuous ¹³ C Labeling	TAN Li-min, WU Hao, LI Hui, <i>et al.</i> (1933)
Simulation Study on the Effect of Salinity on the Adsorption Behavior of Mercury in Wastewater-Irrigated Area	ZHENG Shun-an, LI Xiao-hua, XU Zhi-yu (1939)
Leaching Behavior of Pb, Cd and Zn from Soil Stabilized by Lime Stabilized Sludge	LI Xiang, SONG Yun, LIU Yong-bing (1946)
Levels and Distribution of Short Chain Chlorinated Paraffins in Seafood from Dalian, China	YU Jun-chao, WANG Thanh, WANG Ya-wei, <i>et al.</i> (1955)
Application of Biotic Ligand Model for the Acute Toxicity of Copper to <i>Daphnia magna</i> in Water of Liaohe River and Taihu Lake	ZHOU Teng-yao, CAO ying, QIN Lu-mei, <i>et al.</i> (1962)
Phytotoxicity of Copper Oxide Nanoparticles to Metabolic Activity in the Roots of Rice	WANG Shu-ling, ZHANG Yu-xi, LIU Han-zhu, <i>et al.</i> (1968)
Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by <i>Bacillus thuringiensis</i>	HUANG Jie, YE Jin-shao, YIN Hua, <i>et al.</i> (1974)
Long-term Performance of Microbial Fuel Cell Using Manure as Substrate	JIAO Yan, ZHANG Guo-dong, ZHAO Qing-liang (1981)
Influence of Goethite on Anaerobic Fermentation of Organic Fraction of Municipal Solid Waste (OFMSW)	YANG Lu-lu, YUE Zheng-bo, CHEN Tian-hu, <i>et al.</i> (1988)
Pollutants Produced in Municipal Refuse Container During Transfer Process	WANG Xiao-yuan, LIU Yin-hua, WANG Fei, <i>et al.</i> (1994)
Selective Catalytic Oxidation of H ₂ S over Supported Fe Catalysts on CeO ₂ -Intercalated Laponite Clay	SUN Chao, ZHANG Xin, HAO Zheng-ping, <i>et al.</i> (2002)
Preparation by Different Methods and Characterization of Desulfurization Mixed Oxides Derived from Hydrotalcites	ZHU Chun-lei, WANG Hai-lin, SUN Chun-bao (2010)
Sampling Methods for PM _{2.5} from Stationary Sources: a Review	JIANG Jing-kun, DENG Jian-guo, LI Zhen, <i>et al.</i> (2018)
A Research Overview of Methanogens	LI Yu-shan, LI Yao-ming, OUYANG Zhi-yun (2025)

《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 汤鸿霄 陈吉宁 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)

2014年5月15日 35卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 5 May 15, 2014

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: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行