

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

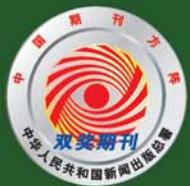
第34卷 第5期

Vol.34 No.5

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版



目次

基于过氧化物的消毒技术研究进展 刁海玲, 赵三平, 周文 (1645)

环境损害评估: 国际制度及对中国的启示 张红振, 曹东, 於方, 王金南, 齐霖, 贾倩, 张天柱, 骆永明 (1653)

不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示 徐猛, 颜增光, 贺萌萌, 张超艳, 侯红, 李发生 (1667)

蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展 张志剑, 刘萌, 朱军 (1679)

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究 刁晓君, 席北斗, 何连生, 邓祥征, 吴锋, 王鹏腾 (1687)

我国东北地区地表水酸化现状 徐光仪, 康荣华, 罗遥, 段雷 (1695)

西安市对渭河水质的影响分析 于婕, 李怀恩 (1700)

极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究 叶丰, 黄小平, 施震, 刘庆霞 (1707)

应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准 韩超南, 秦延文, 郑丙辉, 张雷, 曹伟 (1715)

长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法 蔡文倩, 孟伟, 刘录三, 朱延忠, 周娟 (1725)

温州城市降雨径流中 BOD₅ 和 COD 污染特征及其初始冲刷效应 王骏, 毕春娟, 陈振楼, 周栋 (1735)

影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究 余小龙, 沈芳, 张晋芳 (1745)

香溪河库湾春季 pCO₂ 与浮游植物生物量的关系 袁希功, 黄文敏, 毕永红, 胡征宇, 赵玮, 朱孔贤 (1754)

紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究 雷雨, 龙天渝, 伞磊, 安强, 黄宁秋 (1761)

高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究 马晓雁, 张泽华, 王红宇, 胡仕斐, 李青松 (1767)

纳米 Fe₃O₄-H₂O₂ 非均相 Fenton 反应催化氧化邻苯二酚 何洁, 杨晓芳, 张伟军, 王东升 (1773)

水中萘普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究 马杜娟, 刘国光, 吕文英, 姚锬, 周丽华, 谢成屏 (1782)

酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究 康雅凝, 李华楠, 徐冰冰, 齐飞, 赵伦 (1790)

镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究 柳王荣, 魏清伟, 杨仁斌, 许振成, 曾东 (1797)

基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法 金鹏康, 冯永宁, 王宝宝, 王晓昌 (1802)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究 王金泉, 胡梦蝶, 马邕文, 黄明智 (1808)

壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果 张璐璐, 胡筱敏, 英诗颖, 王芳 (1815)

城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究 孟晓荣, 张海珍, 王磊, 王旭东, 赵亮 (1822)

倒置 A²/O-*MBR* 处理城市污水的中试研究 张健君, 邹高龙, 杨淑芳, 丁星, 王莉, 毛乾庄, 杨丹 (1828)

不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究 袁莹, 周伟丽, 王晖, 何圣兵 (1835)

短程同步硝化反硝化过程的脱氮与 N₂O 释放特性 梁小玲, 李平, 吴锦华, 王向德 (1845)

基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化 张明全, 李锋民, 吴乾元, 胡洪营 (1851)

多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响 陈春, 刘潇威, 郑顺安, 周启星, 李松 (1857)

浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价 徐志荣, 王浙明, 许明珠, 何华飞 (1864)

苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应 赵伟荣, 廖求文, 杨亚楠, 戴九松 (1871)

四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征 邵敏, 陈永亨, 李晓宇 (1877)

咪唑类离子液体毒性的 QSAR/QSPR 研究 赵继红, 赵永升, 张宏忠, 张香平 (1882)

宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征 樊新刚, 米文宝, 马振宁, 王婷玉 (1887)

内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征 郭伟, 付瑞英, 赵仁鑫, 赵文静, 郭江源, 张君 (1895)

福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究 郑桢, 杨冰玉, 吴水平, 王新红, 陈晓秋 (1901)

重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究 王玉玲, 能昌信, 王彦文, 董路 (1908)

丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响 郭伟, 赵仁鑫, 赵文静, 付瑞英, 郭江源, 张君 (1915)

海洋细菌 N3 对几种赤潮藻的溶藻效应 史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 胡维安, 田梓杨, 戴明 (1922)

1 株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌 LY01 的鉴定及其氧化特性研究 刘玉娇, 杨新萍, 王世梅, 梁银 (1930)

1 株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性 蔡瀚, 尹华, 叶锦韶, 常晶晶, 彭辉, 张娜, 何宝燕 (1937)

2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解 张姝, Giulio Franco, 李晓豹, 卢晓霞, 侯珍, 杨君君 (1945)

养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群 B-737 及发酵特性 裴瑞林, 信欣, 张雪乔, 周迎芹, 姚力, 羊依金 (1951)

1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析 陈圆圆, 田贺忠, 杨懂艳, 邹本东, 鹿海峰, 林安国 (1958)

黄山降水酸度及电导率特征分析 石春娥, 邓学良, 吴必文, 洪杰, 张苏, 杨元建 (1964)

夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析 文彬, 银燕, 秦彦硕, 陈魁 (1973)

广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征 谭吉华, 赵金平, 段菁春, 马永亮, 贺克斌, 杨复沫 (1982)

福建省三大城市冬季 PM_{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征 陈衍婷, 陈进生, 胡恭任, 徐玲玲, 尹丽倩, 张福旺 (1988)

上海市含碳大气颗粒物的粒径分布 袁宁, 刘卫, 赵修良, 王广华, 姚剑, 曾友石, 刘邃庆 (1995)

上海市浦东新区二次气溶胶生成的估算 崔虎雄, 吴迺名, 段玉森, 伏晴艳, 张懿华, 王东方, 王茜 (2003)

沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义 钱鹏, 郑祥民, 周立旻 (2010)

厦门秋季近郊地面 CO₂ 浓度变化特征研究 李燕丽, 穆超, 邓君俊, 赵淑惠, 杜可 (2018)

GC-MS 和 GC-ECD 同时在线观测本底大气中的 HCFC-142b 郭立峰, 姚波, 周凌晔, 李培昌, 许林 (2025)

城市居家环境空气真菌群落结构特征研究 方治国, 欧阳志云, 刘芄, 孙力, 王小勇 (2031)

城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究 郭薇, 王伯光, 唐小东, 刘舒乐, 何洁, 张春林 (2038)

内河多点分散码头大气污染叠加影响特征 刘建昌, 李兴华, 徐洪磊, 程金香, 王忠岱, 肖杨 (2044)

义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究 刘瑞卿, 王钧伟 (2051)

基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究 谢元博, 李巍 (2057)

《环境科学》征订启事(1652) 《环境科学》征稿简则(1789) 信息(1807, 1821, 1881, 1987) 专辑征稿通知(1863)

不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究

万金泉¹, 胡梦蝶¹, 马邕文², 黄明智¹

(1. 华南理工大学环境科学与工程学院, 广州 510006; 2. 华南理工大学制浆造纸工程国家重点实验室, 广州 510640)

摘要: 研究了葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠这4种电子供体条件下, 2,4,6-三氯苯酚(2,4,6-trichlorophenol, 2,4,6-TCP)的降解效果及其还原脱氯途径。结果表明, 与葡萄糖的作用相比, 乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠均可有效提高2,4,6-TCP的脱氯效果, 其中乳酸钠能作为一类缓释氢物质持续供给2,4,6-TCP还原脱氯所需电子。外加电子供体可提高微生物体内基质代谢脱氢酶活性, 反应240 h后, 4种电子供体体系中脱氢酶活性增长依次为21.49%、25.78%、136.85%和139.3%。2,4,6-TCP还原脱氯的主要产物包括2,4-二氯苯酚(2,4-dichlorophenol, 2,4-DCP)、4-氯苯酚(4-chlorophenol, 4-CP)和苯酚, 其中乙酸钠作为电子供体时, 4-CP为其主要降解产物, 转化率达到22%以上。

关键词: 2,4,6-三氯苯酚; 还原脱氯; 电子供体; 电子传递体系活性; 脱氢酶

中图分类号: X172 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2013)05-1808-07

Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors

WAN Jin-quan¹, HU Meng-die¹, MA Yong-wen², HUANG Ming-zhi¹

(1. College of Environmental Science and Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China; 2. National Key Laboratory of Pulping and Papermaking Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: A test was conducted to examine the degradation effect and reductive dechlorination pathway of 2,4,6-trichlorophenol (2,4,6-TCP) in the presence of different electron donors, such as glucose, sodium lactate, sodium pyruvate and sodium acetate. The results showed that, compared with the effect of glucose, sodium lactate, sodium pyruvate and sodium acetate enhanced the dechlorination of 2,4,6-TCP effectively, among which sodium lactate could serve as a kind of hydrogen release compound, and the electrons required for reductive dechlorination were released in a sustained way. Substrate metabolism dehydrogenase activity was improved by the external electron donor; after reaction for 240 h, the activity of dehydrogenase was increased in the four electron donor systems, by 21.49%, 25.78%, 136.85% and 139.3%, respectively. The main reductive dechlorination products of 2,4,6-TCP included 2,4-dichlorophenol (2,4-DCP), 4-chlorophenol (4-CP) and phenol; when sodium acetate was used as the electron donor, 4-CP was the main degradation product, and the transformation ratio from 2,4,6-TCP to 4-CP was more than 22%.

Key words: 2,4,6-TCP; reductive dechlorination; electron donor; electron transport system activity; dehydrogenase

氯酚是一类具有致癌性、致畸性、致突变性的有机氯化物。现有的含氯酚废水的处理方法包括光催化降解^[1,2]、超声波降解^[3,4]、Fenton降解^[5,6]、金属及金属化合物降解^[7,8]、电化学降解^[9-11]、臭氧降解^[12,13]、生物降解^[14-17]等。厌氧微生物还原脱氯降解氯酚因其经济、易管理而得到广泛的研究和应用。

在厌氧条件下氯酚降解的关键步骤是还原脱氯, 还原脱氯是一个电子消耗过程, 不少研究者致力于电子供体的研究, 主要集中在两个方面: 一方面是有有机基质作为电子供体。Aulenta等^[18]利用乳酸盐、“H₂ + 醋酸盐”、丁酸盐作为电子供体时, 体系中副反应(如挥发酸的积累, 其它选择性电子受体对电子供体的竞争)对四氯乙烷(1,1,2,2-TeCA)、四氯乙烯(PCE)、三氯乙烯(TCE)还原脱氯的影响。研究表明, 还原脱氯微生物在“H₂ + 醋酸盐”作为电子

供体的微生物体系中占主导, 电子供体的利用率最高。Aulenta等^[19]分别比较了以较低浓度的甲醇、H₂和丁酸, 以及酵母浸出物作为电子供体, 在500 d内, 对还原脱氯效率的影响。结果表明, H₂作为电子供体还原脱氯效率最高, 但在反应100 d后, 其他微生物对H₂竞争作用的加强, 还原脱氯速度下降。

另一类是以纳米零价铁和零价铁为代表的电子供体研究。金盛杨等^[20]研究了在反应表面积相近条件下, 纳米与微米级零价铁降解水中2,4,6-三氯酚(TCP)的动力学差异。程婷等^[21]以葡萄糖、乙酸钠、Fe⁰、Fe⁰ + 葡萄糖、Fe⁰ + 乙酸钠作为电子供体, 接种未驯化厌氧混合菌, 考察2,4-二氯酚(2,4-

收稿日期: 2012-08-07; 修订日期: 2012-09-25

基金项目: 2011年广东省高层次人才基金项目(2011); 广东省战略性新兴产业核心技术攻关项目(2012A032300015)

作者简介: 万金泉(1965~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为制浆造纸污染控制理论与技术, E-mail: ppjwan@scut.edu.cn

DCP)的还原脱氯特性及 Fe^0 作为电子供体的最佳作用条件与持续性特征。然而,大部分研究仅停留在电子供体对还原脱氯作用的宏观参数条件上,如不同电子供体投加量、pH、脱氯效果等。在电子供体对还原脱氯的作用机制上的理论研究尚有欠缺。因此,本研究以 2,4,6-TCP 作为目标污染物,分析其不同电子供体下的还原脱氯途径,以及不同电子供体在还原脱氯过程中的作用,探讨微生物作用机制与电子供体之间的关系。

1 材料与amp;方法

1.1 接种污泥及驯化培养

种泥取自广州造纸污水处理厂的 IC 反应塔接种污泥,种泥在自制 IC 厌氧反应器中经葡萄糖配水培养成熟以后 $\text{SS} = 118.1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$, $\text{VSS} = 106.8 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ($\text{VSS}/\text{SS} = 0.904$),取适量到摇瓶进行驯化。培养液用葡萄糖、氯化铵、磷酸二氢钾、微量元素配制 ($\text{C}:\text{N}:\text{P} = 200:5:1$),葡萄糖浓度控制在 $1 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 。驯化过程中逐渐增加 2,4,6-TCP 的投入量,其质量浓度为 $5 \sim 30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 。摇瓶置于水浴摇床中培养 (30°C , $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),每 5 d 更新一次培养基,更新培养基时充入氮气以保持摇瓶内为厌氧状态。经两个月驯化后,2,4,6-TCP 的去除率在 60% 以上,说明经驯化的颗粒污泥中存在大量的还原脱氯微生物,已具有降解 2,4,6-TCP 的能力。

将上述驯化培养的厌氧颗粒污泥进行二次驯化培养。培养液由葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠、氯化铵、磷酸二氢钾、微量元素配制 ($\text{C}:\text{N}:\text{P} = 200:5:1$),葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠的浓度均控制在 $5 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 。投加质量浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的 2,4,6-TCP,摇瓶置于水浴摇床中培养 ($28 \sim 30^\circ\text{C}$, $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$),每 10 d 更新一次培养基并充入氮气。

1.2 实验方法

分别取 30 g 二次驯化后的厌氧颗粒污泥到 4 个 500 mL 摇瓶中,培养液与 2,4,6-TCP 标准溶液总体积为 250 mL。4 个反应瓶中培养液按表 1 进行配制,分别投加葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作为碳源,其浓度均为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$;微量元素母液每组加入 1 mL;2,4,6-TCP 标准溶液质量浓度为 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$;调节各反应瓶中的 pH 在 8 左右。将 4 个反应瓶置于摇床中反应,恒温 30°C ,摇床转速 $160 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$,分别在 24、48、96、144、192 h 进行取样分析。

表 1 人工配制培养液成分

Table 1 Composition of the artificial culture medium			
主要营养物及碳源	质量浓度 / $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$	微量元素母液	质量浓度 / $\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$
KH_2PO_4	16.2	$\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$	1.12
K_2HPO_4	21.0	$\text{MnCl}_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	0.20
NH_4Cl	31.8	$\text{NiCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.02
NaHCO_3	1 800	$(\text{NH}_4)_6\text{Mo}_7\text{O}_{24}$	3.60
葡萄糖	1 800	$\text{CoCl}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$	0.80
乳酸钠	1 120.6	ZnCl_2	0.02
丙酮酸钠	1 104	$\text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$	0.018
乙酸钠	820.3	H_3BO_3	0.02
		乙二胺四乙酸	0.40

1.3 分析方法

本研究分别采用 GC-MS (美国 Agilent7890A/5975C) 和 HPLC (美国 Agilent 1100series) 对 2,4,6-TCP 及其降解产物进行定性和定量分析。通过氯化三苯基四氮唑 (Triphenyltetrazolium Chloride, TTC) 电子体系传递活性间接反映体系内脱氢酶的活性大小^[22]。采用 ICS-3000 (美国戴安) 测定不同电子供体的中间代谢产物。

GC-MS 分析方法:取 10 mL 水样加入 10% 盐酸调节 pH 至 2 以下,再加入 5 mL 正己烷萃取,取萃取液加入 0.4 mL 乙酸酐于恒温水浴 60°C 衍生 20 min;加入适量无水硫酸钠进行脱水,经 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,置于 4°C 环境中保存,用于 GC-MS 分析。GC-MS 分析条件:色谱柱为 Agilent Hp-5MS ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$);进样口温度 250°C ;不分流进样;柱温, 40°C (保持 3 min), $15^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 升温至 280°C (保持 5 min);载气,高纯氦气, $1 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$;质谱检测器 EI;离子源温度 230°C ;全扫描 (m/z 35 ~ 550);溶剂延迟 4 min。

水样在转速为 $5000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 15 min,再经 $0.22 \mu\text{m}$ 微孔滤膜过滤,置于 4°C 环境中保存,用于 HPLC 和 ICS 分析。

HPLC 分析条件:色谱柱为 Hyper Clone 5U ODS (C18) 柱,流动相由 80% 甲醇和 20% 的超纯水组成,流速为 $0.7 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,进样体积为 20 μL ,检测波长为 280 nm 和 290 nm。ICS 分析条件:色谱柱为 AS11-HC 分析柱和 AS11-HC 保护柱,流动相由 1.0% 200mmol NaOH 和 99% 超纯水组成,流速为 $0.8 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$,柱温 30°C ,检测器抑制电流 180 mA。

2 结果与分析

2.1 不同电子供体对 2,4,6-TCP 降解率的影响

分别以葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作

为电子供体,对各体系中 2,4,6-TCP 的浓度进行 HPLC 检测,2,4,6-TCP 的降解率表示为:

$$\text{降解率} = (c_0 - c) / c_0 \times 100\%$$

式中, c 为 2,4,6-TCP 在反应过程中的浓度; c_0 为 2,4,6-TCP 的初始浓度,即 $30 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

各电子供体的投加量均为 $10 \text{ mmol} \cdot \text{L}^{-1}$, pH 控制在 8 左右,各体系中 2,4,6-TCP 的降解率随时间的变化如图 1 所示. 从中可以看出,在反应 192 h 后,各电子供体体系中 2,4,6-TCP 的降解率均可达到 80% 以上,这说明厌氧颗粒污泥经过长期驯化培养后,葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠均可作为有效的电子供体. 在不同电子供体条件下 2,4,6-TCP 的降解率从高到低依次为:乳酸钠 > 丙酮酸钠 \geq 乙酸钠 > 葡萄糖. 其中,在反应 144 h 后,乳酸钠作为电子供体时,其降解率可达到 79.45%,而以葡萄糖作为电子供体时,2,4,6-TCP 的降解率仅为 58.33%. 在反应 192 h 后,葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠的电子供体体系中,2,4,6-TCP 的降解率分别为 80.25%、88.8%、89.41%、89.50%. 乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作为电子供体对 2,4,6-TCP 的降解率明显高于葡萄糖,这可能是因为葡萄糖厌氧产氢速度较快,使得体系内氢浓度较高,刺激了嗜氢微生物的生长,与还原脱氯所需电子供体形成了竞争机制,还原脱氯效率下降,从而降低了 2,4,6-TCP 的降解.

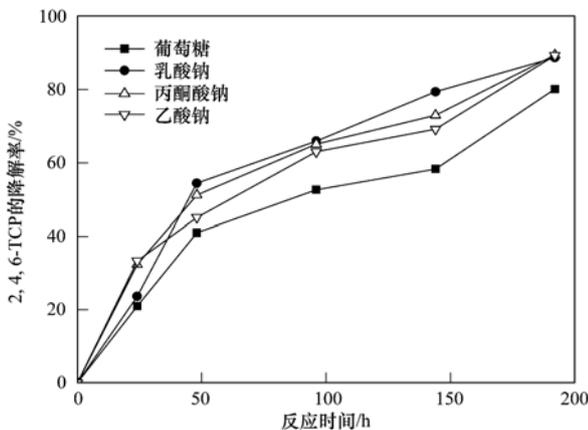


图 1 不同电子供体下 2,4,6-TCP 的降解率

Fig. 1 Degradation rate of 2,4,6-TCP with different electron donors

2.2 不同电子供体下的电子传递体系活性

污泥的电子传递体系 (electron transport system, ETS) 活性,也叫脱氢酶活性,脱氢酶是生物细胞内催化有机物氧化(脱氢),并将其传递给最终电子受体的氧化还原酶. 在废水生物处理中,由于它可以反映处理体系中活性微生物量及其对有机物的降解

活性,因而成为一项考察污泥活性的重要指标^[22,23].

分别以葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作为电子供体,在反应前后分别各体系中电子体系传递活性进行检测,检测结果如图 2 所示. 从中可知,不同电子供体体系中 EST 不同. 反应后各体系中 EST 都增大,葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠各体系中 EST 分别从 3.11 、 3.88 、 4.62 、 $7.10 \mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$ 增加到 3.77 、 4.88 、 10.93 、 $16.99 \mu\text{g} \cdot (\text{mg} \cdot \text{h})^{-1}$. 以丙酮酸钠和乙酸钠作为电子供体时,体系中 EST 迅速增加,分别增长了 136.85% 和 139.3%,而葡萄糖和乳酸钠体系中仅增长了 21.49% 和 25.78%. 这是因为:脱氢酶活性 = 基质代谢脱氢酶活性 + 内源呼吸代谢脱氢酶活性^[24],外加电子供体能加速基质代谢脱氢酶的释放,并且小分子类电子供体为微生物的利用率高,可释放较多的基质代谢脱氢酶,表现为脱氢酶活性的增加. 结合图 1 可知,EST 越高,脱氢酶含量越高,体系中还原脱氯能力越强,2,4,6-TCP 的降解率越高.

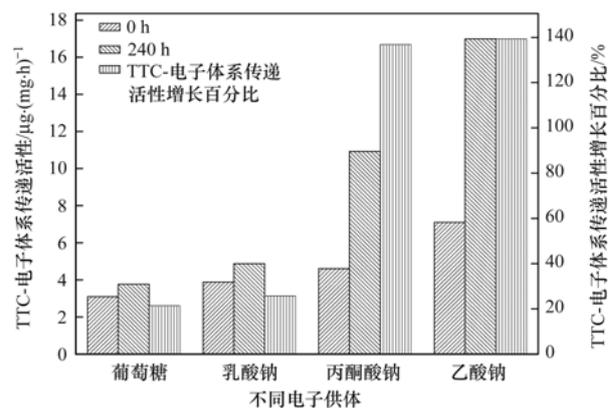


图 2 不同电子供体下电子体系传递活性及其增长百分比

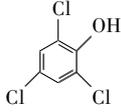
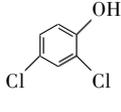
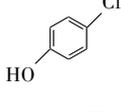
Fig. 2 Electron transport system activity and its percentage increase with different electron donors

2.3 不同电子供体下 2,4,6-TCP 降解产物的分析

分别以葡萄糖、乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作为电子供体,对各体系中 2,4,6-TCP 的中间降解产物进行 GC-MS 和 HPLC 检测,GC-MS 检测结果如表 2 所示. 从中可知,2,4,6-TCP 在不同电子供体体系中经厌氧微生物降解,发生了脱氯反应,主要降解产物为 2,4-DCP、4-CP 和苯酚.

结合 HPLC 检测结果,如图 3 所示. 从中可以看出,当葡萄糖和乳酸钠作为电子供体时,2,4,6-TCP 的中间降解产物主要包括 2,4-DCP、4-CP 和苯酚. 反应 24 h 后,苯酚的浓度均达到最大(且葡萄

表 2 2,4,6-TCP 降解后的溶液 GC-MS 分析¹⁾
Table 2 Degradation products of 2,4,6-TCP identified by GC-MS

样品	序号	停留时间/min	化合物名称	结构式	分子式
2,4,6-TCP	1	12.016	2,4,6-三氯苯酚		$C_6H_3Cl_3O$
	2	11.180	2,4-二氯苯酚		$Cl_2C_6H_3OH$
	3	—	4-氯苯酚		ClC_6H_4OH
	4	10.584	苯酚		C_6H_6O

1) “—”表示没有相关数据

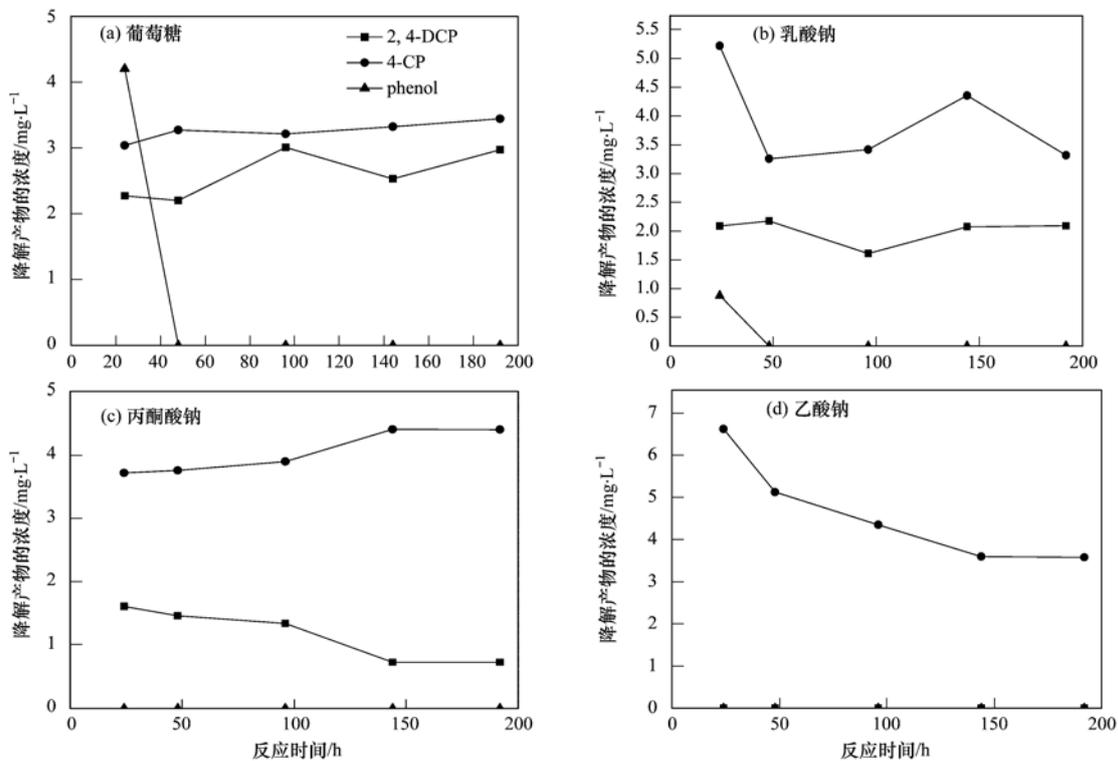


图 3 不同电子供体下 2,4,6-TCP 的降解产物

Fig. 3 Degradation products of 2,4,6-TCP with different electron donors

糖体系大于乳酸钠体系), 之后几乎没有检测到苯酚的存在; 并且整个反应过程中, 4-CP 的浓度始终高于 2,4-DCP. 乳酸钠体系中 2,4-DCP 的浓度为 $1.61 \sim 2.07 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4-CP 的浓度为 $3.26 \sim 5.22 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$; 葡萄糖体系中 2,4-DCP 的浓度为 $2.20 \sim 3.01 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 4-CP 的浓度为 $3.04 \sim 3.44 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$. 乳酸钠体系中 4-CP 的浓度较葡萄糖体系高, 而 2,4-

DCP 的浓度较葡萄糖体系低. 这可能是因为乳酸钠能作为一类缓释氢物质, 缓慢的释放氢, 保证还原脱氯过程能持续进行^[25]. 而葡萄糖体系中释氢速率较快, 2,4,6-TCP 迅速脱氯转化为 2,4-DCP, 而减缓了 2,4-DCP 向 4-CP 的转化.

当丙酮酸钠作为电子供体时, 2,4,6-TCP 的中间降解产物为 2,4-DCP 和 4-CP. 随反应的进行,

2,4-DCP的浓度逐渐降低,而4-CP的浓度逐渐增高;144 h后,2,4-DCP和4-CP的浓度分别维持在 $0.73 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $4.41 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,二者浓度达到平衡,几乎都不再发生转化和降解.当乙酸钠作为电子供体时,整个过程中仅检测到4-CP,其浓度随反应的进行逐渐从 $6.62 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 降低到 $3.58 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,转化率可达到22%.

不同电子供体体系中2,4,6-TCP转化为2,4-DCP和4-CP的转化率如图4和图5所示.从中可以看出,不同电子供体中,2,4,6-TCP转化为2,4-DCP的转化率从高到低依次为:葡萄糖>乳酸钠>丙酮酸钠>乙酸钠.2,4,6-TCP转化为4-CP的转化率从高到低依次为:乙酸钠>丙酮酸钠>乳酸钠>葡萄糖,这与不同电子供体体系中电子传递体系活性的结论相一致.

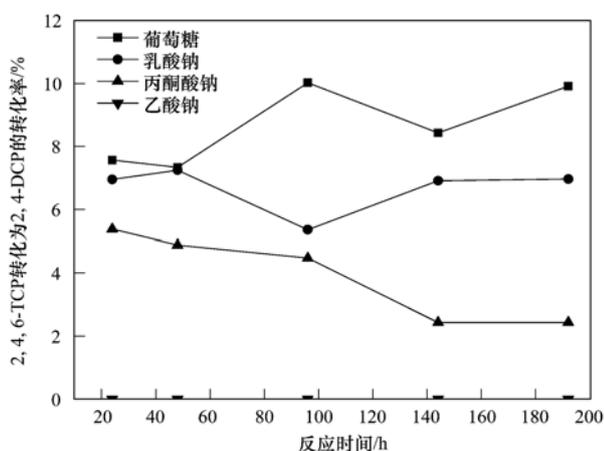


图4 不同电子供体下2,4,6-TCP向2,4-DCP的转化率

Fig. 4 Transformation ratio from 2,4,6-TCP to 2,4-DCP

2.4 不同电子供体的降解中间产物分析

分别以乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠作为电子供体,对其中间产物进行了ICS检测,检测结果如表3所示.由表3可知,乳酸钠的中间代谢产物包括:丙酮酸根、乙酸根、丙酸根和甲酸根,由此可以推测乳酸钠的代谢途径可能是:乳酸根水解脱氢生成丙酮酸根,丙酮酸根氧化生成乙酸根和 CO_2 ,反应式如图6所示.与文献[16]结论一致.这说明乳酸钠具有缓释氢的功能,而丙酮酸也可以发生氧化反应,

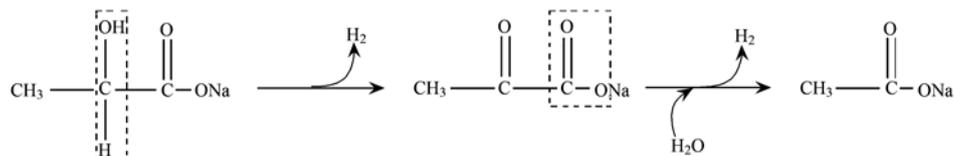


图6 乳酸钠缓释氢过程

Fig. 6 hydrogen release process of sodium lactate

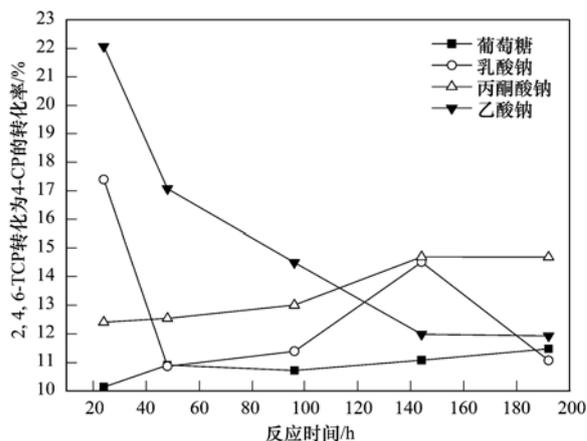


图5 不同电子供体体系中2,4,6-TCP向4-CP的转化率

Fig. 5 Transformation ratio from 2,4,6-TCP to 4-CP

表3 不同电子供体的降解产物 ICS 分析

Table 3 Degradation products of different electron donors identified by ICS

样品	序号	出峰时间/min	产物名称	分子式
乳酸钠	1	14.113	甲酸根	HCOO^-
	2	12.837	乙酸根	CH_3COO^-
	3	21.870	丙酮酸根	$\text{CH}_3\text{COCOO}^-$
	4	18.733	丙酸根	$\text{CH}_3\text{CH}_2\text{COO}^-$
丙酮酸钠	1	14.113	甲酸根	HCOO^-
	2	12.837	乙酸根	CH_3COO^-
乙酸钠	1	14.113	甲酸根	HCOO^-

夺取水分子中的氧,释放氢.

3 不同电子供体下2,4,6-TCP还原脱氯途径的分析

根据2,4,6-TCP的降解产物以及不同电子供体的中间产物,经分析可推断2,4,6-TCP的还原脱氯代谢途径如图7所示.

2,4,6-TCP的还原脱氯产物主要包括2,4-DCP、4-CP和苯酚.当葡萄糖和乳酸钠作为电子供体时,可检测到这3种代谢产物;当以丙酮酸钠作为电子供体时,检测到代谢产物有2,4-DCP和4-CP;当以乙酸钠作为电子供体时,代谢产物仅检测到4-CP.根据空间位阻效应的理论依据,2,4,6-TCP在分子结构上,邻位的氯会产生较大的分子内张力,发生邻位脱氯将使得分子更为稳定.因此

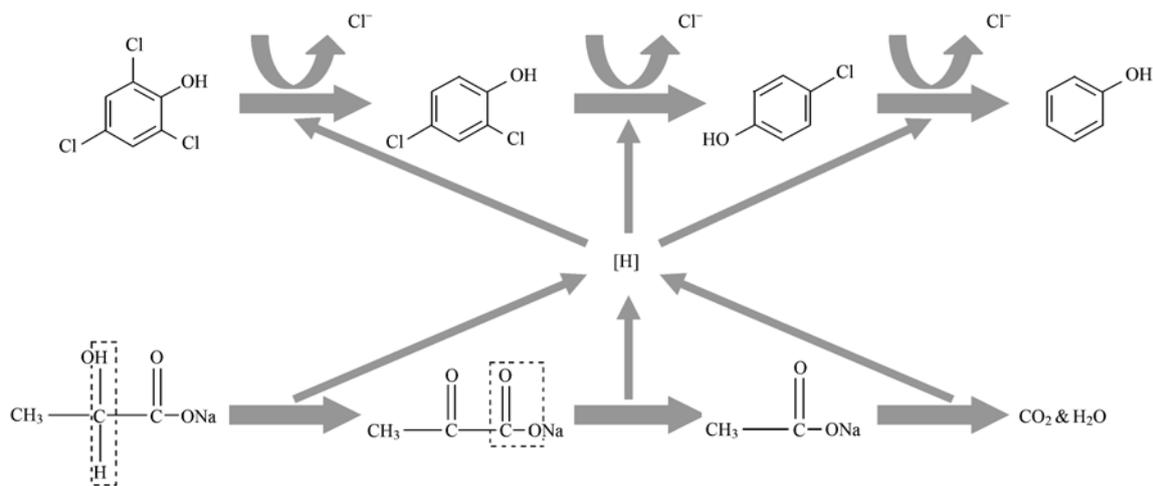


图7 2,4,6-TCP 的还原脱氯途径

Fig. 7 Reductive dechlorination pathway of 2,4,6-TCP

2,4,6-TCP 先是逐个脱去邻位的氯,然后再脱去对位. 根据单位不同电子供体提供电子的理论最大值进行换算^[26] [$e_{\max}(1 \text{ mol 葡萄糖}) = e_{\max}(2 \text{ mol 乳酸钠}) = e_{\max}(2.4 \text{ mol 丙酮酸钠}) = e_{\max}(3 \text{ mol 乙酸钠})$],在投加等摩尔浓度的电子供体时,葡萄糖理论提供的电子量最大,因此降解产物苯酚的浓度较乳酸钠体系中高;但是其水解酸化、释放电子的速度过快,微生物之间竞争电子机制占主导,2,4,6-TCP 的降解率降低.

丙酮酸钠和乙酸钠体系中均未检测到苯酚,可能是由于其提供电子量较少,因此目标污染物与电子供体之间的电子传递占主导,故电子传递体系活性较高. 乙酸钠体系中仅检测到 4-CP,有文献指出还原脱氯微生物在乙酸钠作为电子供体的微生物体系中占主导,其电子利用率最高^[18]. 因此推断可能是 2,4,6-TCP 同时脱去两个邻位的氯,生成对氯苯酚;也可能是在 24 h 内完成了 2,4,6-TCP 经 2,4-DCP 向 4-CP 的转化,这有待进一步研究.

4 结论

(1) 与葡萄糖相比,乳酸钠、丙酮酸钠、乙酸钠均可有效提高 2,4,6-TCP 的脱氯效果,其中乳酸钠能作为一类缓释物质持续供给 2,4,6-TCP 还原脱氯所需电子使得 2,4,6-TCP 降解率较高.

(2) 外加电子供体可提高微生物体内基质代谢脱氢酶活性,从而电子传递体系活性增强,2,4,6-TCP 还原脱氯增强,2,4,6-TCP 的降解率提高. 反应 240 h 后,4 种电子供体体系中脱氢酶活性增长依次为 21.49%、25.78%、136.85% 和 139.3%.

(3) 2,4,6-TCP 还原脱氯的主要产物包括 2,4-二氯苯酚(2,4-DCP)、4-氯苯酚(4-CP)和苯酚,其中乙酸钠作为电子供体时,4-CP 为其主要降解产物,转化率达到了 22% 以上.

参考文献:

- [1] Peill N J, Hoffmann M R. Chemical and physical characterization of a TiO_2 -coated fiber optic cable reactor [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(9): 2806-2812.
- [2] 孙霞, 张永明. 一体式光催化氧化与生物降解反应器处理含苯酚和 2,4,6-三氯酚废水 [J]. *上海师范大学学报 (自然科学版)*, 2011, **40**(2): 207-212.
- [3] Petrier C, David B, Laguian S. Ultrasonic degradation at 20 kHz and 500 kHz of atrazine and pentachlorophenol in aqueous solution: preliminary results [J]. *Chemosphere*, 1996, **32**(9): 1709-1718.
- [4] Gondrexon N, Renaudin V, Petrier C, *et al.* Degradation of pentachlorophenol aqueous solutions using a continuous flow ultrasonic reactor: experimental performance and modelling [J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 1999, **5**(4): 125-131.
- [5] Oturan M A, Oturan N, Lahitte C, *et al.* Production of hydroxyl radicals by electrochemically assisted Fenton's reagent: Application to the mineralization of an organic micropollutant, pentachlorophenol [J]. *Journal of Electroanalytical Chemistry*, 2001, **507**(1-2): 96-102.
- [6] McKinzi A M, Dichristina T J. Microbially driven Fenton reaction for transformation of pentachlorophenol [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(11): 1886-1891.
- [7] Marshall W D, Kubítová A, Lagadec A J M, *et al.* Zero-valent metal accelerators for the dechlorination of pentachlorophenol (PCP) in subcritical water [J]. *Green Chemistry*, 2002, **4**(1): 17-23.
- [8] Shin E J, Keane M A. Gas-phase hydrodechlorination of pentachlorophenol over supported nickel catalysts [J]. *Catalysis*

- Letters, 1999, **58**(2-3): 141-145.
- [9] Gattrell M, MacDougall B. The anodic electrochemistry of pentachlorophenol[J]. Journal of the Electrochemical Society, 1999, **146**(9): 3335-3348.
- [10] Dabo P, Cyr A, Laplante F, *et al.* Electrocatalytic dehydrochlorination of pentachlorophenol to phenol or cyclohexanol[J]. Environmental Science & Technology, 2000, **34**(7): 1265-1268.
- [11] Lin C H, Tseng S K. Electrochemically reductive dechlorination of pentachlorophenol using a high overpotential zinc cathode[J]. Chemosphere, 1999, **39**(13): 2375-2389.
- [12] Kim J Y, Moon S H. A kinetic study on oxidation of pentachlorophenol by ozone [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2000, **50**(4): 555-562.
- [13] 皮运正, 王建龙. 臭氧氧化水中 2,4,6-三氯酚的反应机理研究[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1619-1623.
- [14] 马涛. α -Fe₂O₃ 的制备、负载及对五氯苯酚的作用研究[D]. 武汉: 武汉理工大学, 2006.
- [15] Häggblom M M, Bossert I D. Dehalogenation: Microbial processes and environmental applications. Boston/Dordrecht/London: Kluwer Academic Publishers, 2003. 3-29.
- [16] 左剑恶, 肖晶华, 陈莉莉. 氯代有机污染物在厌氧条件下还原脱氯的研究进展[J]. 环境污染治理技术与设备, 2003, **4**(6): 43-48.
- [17] 王建龙, Hagemann W. 微生物群落对多氯酚的脱氯特性及机理研究[J]. 中国科学 B 辑, 2003, **33**(1): 47-53.
- [18] Aulenta F, Pera A, Rossetti S, *et al.* Relevance of side reactions in anaerobic reductive dechlorination microcosms amended with different electron donors [J]. Water Research, 2007, **41**(1): 27-38.
- [19] Aulenta F, Gossett J M, Papini M P, *et al.* Comparative study of methanol, butyrate, and hydrogen as electron donors for long-term dechlorination of tetrachloroethene in mixed anaerobic cultures[J]. Biotechnology and Bioengineering, 2005, **91**(6): 744-753.
- [20] 金盛杨, 王玉军, 李连祯, 等. 纳米与微米级零价铁降解 2,4,6-三氯酚动力学比较[J]. 中国环境科学, 2010, **30**(1): 82-87.
- [21] 程婷, 戴友芝, 罗春香, 等. 不同电子供体对 2,4-二氯酚还原脱氯的影响[J]. 微生物学通报, 2008, **35**(8): 1209-1213.
- [22] 尹军, 谭学军, 任南琪. 用 TTC 与 INT-电子传递体系活性表征重金属对污泥活性的影响[J]. 环境科学, 2005, **26**(1): 56-62.
- [23] 朱南文, 闵航华, 陈美慈, 等. TTC-脱氢酶测定方法的探讨[J]. 中国沼气, 1996, **14**(2): 3-5.
- [24] 尹军, 付瑶, 王翠兰, 等. 活性污泥的基质代谢脱氢酶活性测定[J]. 中国给水排水, 2002, **18**(9): 50-52.
- [25] Koenigsberg S S, Sandefur C A. The use of hydrogen release compound for the accelerated bioremediation of anaerobically degradable contaminants: The advent of time-release electron donors[J]. Remediation Journal, 1999, **10**(1): 31-53.
- [26] 刘智勇. 零价铁/厌氧微生物联合体系降解 2,4,6-三氯酚及其机理[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2008.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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)

2013年5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 15, 2013

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