

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)

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解三苯基锡的促进机制

黄捷¹, 叶锦韶^{1*}, 尹华², 彭辉¹, 马嘉雯¹, 唐立涛¹, 王惜若¹

(1. 暨南大学环境工程系, 广东省高校水土环境毒性污染防治与生物修复重点实验室, 广州 510632; 2. 华南理工大学环境与能源学院, 工业聚集区污染控制与生态修复教育部重点实验室, 广州 510006)

摘要: 有关内分泌干扰物三苯基锡 (TPhT) 生物降解的强化措施和降解机制的报道较少, TPhT 降解过程中脱苯反应是同步还是逐步发生还不明确. 为阐明这些问题, 研究了吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解 TPhT 及其降解产物的影响. 结果表明, 吐温 80 能明显提高 TPhT 在水中的溶解度. 苏云金芽孢杆菌和 80 mg·L⁻¹ 吐温 80 共同处理 1 mg·L⁻¹ TPhT 2 d 后, TPhT 残余浓度降至 48.4%. 降解过程, 吐温 80 可显著地减少细胞内 Na⁺、NH₄⁺ 和 Mg²⁺ 向胞外的释放, 增加对细胞外 Cl⁻、PO₄³⁻ 和 K⁺ 的吸收. 代谢产物分析表明, 苯基锡的生物降解始于苯环裂解, 而不是苯环和锡原子之间共价键的分裂. TPhT 中各苯环的开环反应可以单独进行, 亦可同步发生, 进而生成二苯基锡、一苯基锡和无机锡.

关键词: 三苯基锡; 吐温 80; 生物降解; 降解途径; 有机锡

中图分类号: X172 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)05-1974-07 DOI: 10.13227/j.hj.kx.2014.05.049

Enhancing Effect of Tween 80 on Degradation of Triphenyltin by *Bacillus thuringiensis*

HUANG Jie¹, YE Jin-shao¹, YIN Hua², PENG Hui¹, MA Jia-wen¹, TANG Li-tao¹, WANG Xi-ruo¹

(1. Key Laboratory of Water/Soil Toxic Pollutants Control and Bioremediation of Guangdong Higher Education Institutes, Department of Environmental Engineering, Jinan University, Guangzhou 510632, China; 2. Key Laboratory of Pollution Control and Ecosystem Restoration in Industry Clusters, Ministry of Education, College of Environment and Energy, South China University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: So far, the information regarding enhanced degradation and biodegradation mechanisms of TPhT, an endocrine disruptor, is severely limited. Whether dearylation during TPhT degradation occurs successively or synchronously is not revealed clearly. To deal with these problems, this study focused on the biodegradation of TPhT and its metabolites by *Bacillus thuringiensis* through the acceleration of Tween 80. The results showed that Tween 80 obviously increased the TPhT solubility. After degradation by cells in the presence of 80 mg·L⁻¹ Tween 80 for 2 d, the residual TPhT at 1 mg·L⁻¹ initially was decreased to 48.4%. During the biodegradation process, Tween 80 significantly reduced intracellular Na⁺, NH₄⁺ and Mg²⁺ release, and increased extracellular Cl⁻, PO₄³⁻ and K⁺ utilization. Metabolites analysis revealed that phenyltin biodegradation initially proceeded by cleaving the aromatic ring, not by splitting the covalent bonds between the benzene rings and tin atom. Ring-cleavage reactions in the benzenes of TPhT occurred individually and synchronously, producing diphenyltin, monophenyltin and tin accordingly.

Key words: triphenyltin (TPhT); Tween 80; biodegradation; degradation pathway; organotin

有机锡类化合物 (organic tin compounds, OTC) 是目前已知唯一的金属化合物类内分泌干扰物, 也是人为引入水环境中最毒的化学物质之一^[1]. 有机锡作为塑料稳定剂、防腐剂、海洋建筑和船舶防污涂料等大量使用, 导致了全球性的水体和沉积物污染. 其中, 在环境中残留量及毒性最大的 OTC 是三丁基锡 (TBT) 和三苯基锡 (TPhT), 其高毒性和持久性使水体有机锡污染受到广泛关注^[2,3].

在适宜条件下, OTC 可通过光解、化学降解及生物降解等途径从环境中去除. 而那些不暴露于紫外线下的 OTC 的去除主要靠微生物作用^[4,5]. 对于 OTC 等疏水性有机污染物而言, 其低水溶性极大地限制了其微生物降解和污染环境生物修复. 目前

OTC 的微生物降解研究大多关注于菌种选育、降解过程中环境及其他影响因素的优化和降解产物检测方法改进等方面^[6-8]. 然而, 有关 TPhT 生物降解机制和通过表面活性剂增强其降解性能的报道较少, TPhT 降解与菌体营养代谢的关系, 以及 TPhT 降解过程中各苯环的脱苯是同步还是逐步发生还不明确. 为解决这些问题, 从而阐明降解菌降解 TPhT 的速效机制, 本研究以 TPhT 作为对象, 选用在食品工

收稿日期: 2013-09-18; 修订日期: 2013-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目 (21377047, 21007020); 广东省自然科学基金项目 (S2013010012662); 广州市珠江科技新星专项 (2012J2200056)

作者简介: 黄捷 (1987~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境生物修复技术, E-mail: hj7062538@163.com

* 通讯联系人, E-mail: jsye@jnu.edu.cn

业、化妆品和医药工业中广泛应用的非离子表面活性剂吐温 80 为增溶剂,考察吐温 80 对 TPhT 的增溶作用,探究 TPhT 和降解菌之间的相互影响,分析降解过程菌体的离子释放和吸收,通过产物分析探索 TPhT 的降解途径。

1 材料与方法

1.1 实验材料

TPhT 储备液:称取 1 g TPhT,溶于 1 L 色谱级甲醇,即得 $1 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 TPhT 储备液,4℃ 下保存待用。

实验菌种:TPhT 降解菌由本课题组于有机锡污染的环境中筛选获得。

牛肉膏蛋白胨培养基:牛肉膏 3 g,蛋白胨 10 g, NaCl 5 g,蒸馏水 1 000 mL,调节 pH 至 7.2~7.4。

无机盐培养基: $\text{NaHPO}_4 \cdot 12 \text{ H}_2\text{O}$ 、 KH_2PO_4 、 NH_4Cl 和 MgSO_4 的浓度分别为 150、50、30 和 $15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。

1.2 吐温 80 对 TPhT 的增溶作用

在 50 mL 锥形瓶中,加入 200 μL $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TPhT 标准使用液,待甲醇挥发后加入一定量的吐温 80 母液,补充双蒸水使得体系为 20 mL,吐温 80 的浓度分别为 0、5、10、20、30、40、50 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,将各溶液超声水浴 30 min 后,置于 30℃, $130 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的摇床振荡 24 h,然后静置平衡 12 h,于 $6\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,移取 10 mL 离心的上清液,用等体积的乙酸乙酯超声辅助萃取 2 次,用流动相定容后进行高效液相色谱检测。实验中每一处理设 3 个平行,重复 2 次。

1.3 TPhT 的生物降解实验

1.3.1 菌悬液配制

将降解菌接种于牛肉膏蛋白胨培养液中,于 30℃, $130 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的摇床中活化 24 h,再次接种到牛肉膏蛋白胨培养液扩大培养 12 h 后, $6\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min 获得菌体。菌体用无菌蒸馏水清洗 3 次,配成干重为 $3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的菌悬液待用。

1.3.2 吐温 80 对 TPhT 降解的影响

在锥形瓶中加入 TPhT 待甲醇挥发后加入菌悬液,并加入一定量的吐温 80 母液,补充无机盐培养基至降解体系总体积为 20 mL,使得 TPhT 的浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,投菌量干重为 $0.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,吐温 80 的浓度为 0、5、10、20、30、40、50 和 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,在 30℃、 $130 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的摇床振荡降解 48 h。

1.4 菌体降解 TPhT 过程对 Biolog ECO 板碳源的利用效果

分别取降解 TPhT 1 h 和 48 h 的样品稀释后加入 Biolog ECO 板中,于 30℃ 恒温培养,在 0~168 h 内每间隔 24 h 测定其在 590 nm 处的吸光度值,考察不同条件下菌体降解 TPhT 过程中对碳源的利用能力,并设置不加污染物的对照实验,每组设 3 个平行。

1.5 菌体降解 TPhT 过程中的离子代谢

取实验 1.3.2 节中降解 TPhT 48 h 的实验体系于 $6\,000 \text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心 10 min,所得上清液过 0.22 μm 的滤膜,使用 ICS-900 离子色谱仪检测 Cl^- 、 PO_4^{3-} 、 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 浓度,设置不加 TPhT 作为对照,每组 3 个平行。

1.6 TPhT 降解产物的检测

样品的预处理: $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ TPhT 在投菌量为 $0.3 \text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 20 mL 降解体系中分别降解 1~7 d 后,用 20 mL 正己烷超声萃取 2 次,合并有机相在 25℃ 下旋转蒸发,加入 5 mL 甲醇洗脱,加入 5 mL 醋酸钠/冰乙酸缓冲溶液(pH=4.5)和 2 mL 2% 的四乙基硼化钠溶液,超声 15 min,加入 5 mL 正己烷,超声 15 min,静置分层,取上层有机相进行 GC-MS 分析。

GC 条件:DB-5MS 色谱柱(30 m \times 0.25 mm \times 0.25 μm);柱温采用程序升温。升温程序:初温 50℃,保持 1.5 min 后以 $10 \text{ }^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 速率升至 300℃,保持 4 min;进样口温度 280℃;载气为高纯氦(纯度 >99.999%),流速 $1.1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$;不分流进样,1.0 min 后开阀;进样量为 1 μL 。

MS 条件:电离方式为电子轰击;电子能量 70 eV,离子源温度 250℃,溶剂延迟 2.6 min,根据各种苯基锡化合物的保留时间及特征离子峰进行定量分析。

2 结果与分析

2.1 吐温 80 对 TPhT 的增溶作用

图 1 显示 TPhT 的溶解度随着吐温 80 浓度的增加而增加,吐温 80 浓度为 $80 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,TPhT 的溶解度最大。非离子型表面活性剂的稳定性高,不易受无机盐干扰,在水与有机溶剂中常有较好的溶解性能。在污染环境修复中,非离子型表面活性剂是被采用最多的一类表面活性剂。吐温 80 是一种非离子表面活性剂,由于其毒性低、用量小等特点已被广泛用作增溶剂、乳化剂等,其临界胶束浓度为 $13\sim 15 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ [9,10]。

当表面活性剂的质量浓度较低时,主要以单体的形式存在;当浓度增大到一定值后,活性剂分子

会形成球状、层状或棒状的胶束,亲油基团彼此靠在一起,而亲水基团向外伸向水相^[11]. 溶液中的表面活性剂胶束和单体对有机物具有增溶作用,可大大提高有机污染物在溶液中的溶解度^[12]. 吐温 80 对 TPhT 的增溶作用有利于菌体对其生物降解.

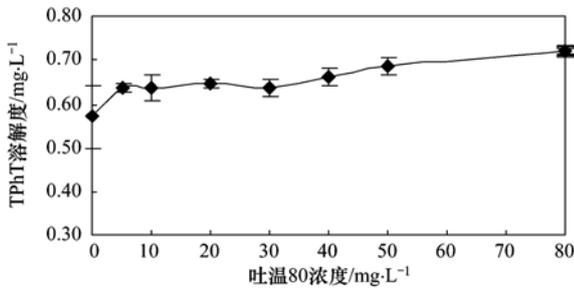


图1 吐温 80 对 TPhT 的增溶作用

Fig. 1 Solubilization effect of Tween 80 on TPhT

2.2 吐温 80 对 TPhT 降解的影响

TPhT 水溶性差、生物有效性差等特点导致了其生物降解延缓. 研究^[13,14]发现 TPhT 需要经过较长的时间才能被降解得较完全. 因此添加一定浓度的吐温 80, 增大 TPhT 在水中的溶解度, 从而快速提高 TPhT 的降解. 图 2 所示, 体系中加入吐温 80 后, 降解 2 d 后 TPhT 的残余浓度均低于菌体单独降解 TPhT 的对照组. 并且当吐温 80 浓度为 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时, 降解效果最好, 20、 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时次之, 但相差不大, TPhT 残余浓度为 50% 左右. 考虑到 $80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 的浓度偏大, 故后续实验中吐温 80 浓度定为 $50 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$.

吐温 80 对苏云金芽孢杆菌降解 TPhT 的促进作用与如下原因有关. 首先, 吐温 80 提高了 TPhT 溶解度(图 1), 从而有利于菌体吸附溶解的 TPhT, 并进一步通过膜运输使之进入细胞内. 由于 TPhT 的生物降解主要发生在细胞内, 因此, 该促进作用有助

于提高 TPhT 的降解率^[8,15]. 吐温 80 对三丁基锡的处理也达到了类似的效果, 1 单位临界胶束浓度的吐温 80 可以将三丁基锡的溶解度提高 13%^[16]. 此外, 吐温 80 能调节细胞表面的疏水性, 提高菌体和 TPhT 的亲水性, 从而增加 TPhT 的生物降解. 除了这些原因, 在本实验中使用的表面活性剂也可作为碳源供细胞新陈代谢过程中使用^[8].

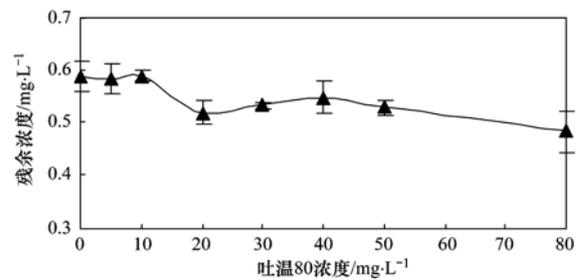


图2 吐温 80 对 TPhT 降解的影响

Fig. 2 Effect of Tween 80 on TPhT degradation

2.3 菌体降解 TPhT 过程对 Biolog-ECO 板碳源的利用效果

图 3 为降解 TPhT 1 h 和 48 h 后菌体对碳源的利用效果. 每孔平均吸光度变化 (AWCD) 是 Biolog-ECO 板上 31 种底物碳源平均颜色变化率, 反映微生物群落代谢的总体活性, 是衡量微生物利用碳源能力的重要指标^[17~19].

降解 TPhT 1 h 后菌体对碳源的利用效果如图 3 (a) 所示, 随着培养时间的延长, AWCD 值呈现先增加后逐渐趋于稳定的趋势. 在 TPhT 存在的情况下, 菌体对 31 种底物碳源的综合利用能力均强于对照组, 说明 TPhT 在一定程度上刺激了菌体的活性, 从而促进了菌体对 ECO 板底物碳源的利用. 而添加了吐温 80 的实验组, 其 AWCD 值低于不加吐温 80 的实验组, 说明在吐温 80 存在的情况下, 菌体将吐温 80 作为碳源加以利用, 而对底物碳源的利用有所

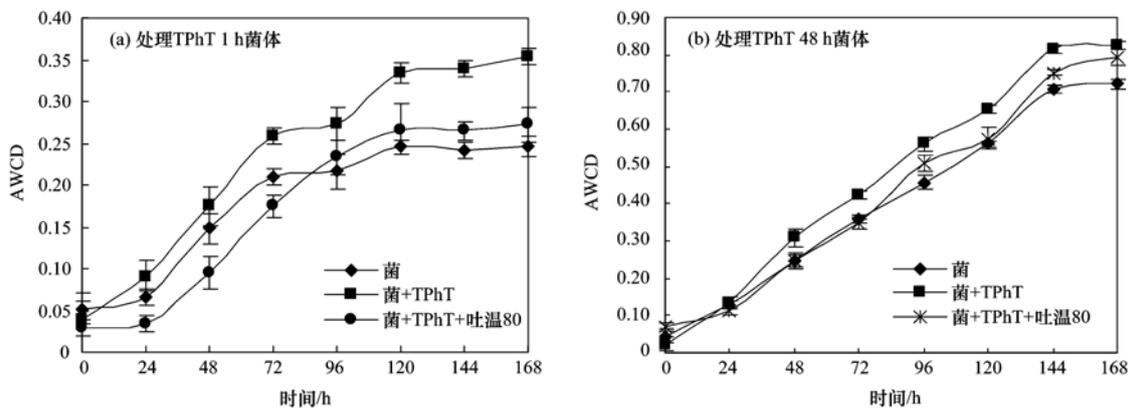


图3 处理 TPhT 1 h 和 48 h 后菌体对碳源的利用效果

Fig. 3 Utilization of carbon nutrients by cells after degradation of TPhT for 1 h and 48 h

降低。

降解 TPhT 48 h 后, AWCD 值也是随时间延长先增加再趋于稳定, 但到达平衡的时间有所延长, 而且平衡时的 AWCD 值高于降解 TPhT 1 h 后的菌体。该结果说明在 48 h 的降解过程中, 菌体已适应了 TPhT 的毒性, 并能够利用 TPhT 做为能源物质进行新陈代谢, 使得体系中菌体含量多于仅短接触 TPhT 的实验组。

2.4 菌体降解 TPhT 过程中的离子代谢

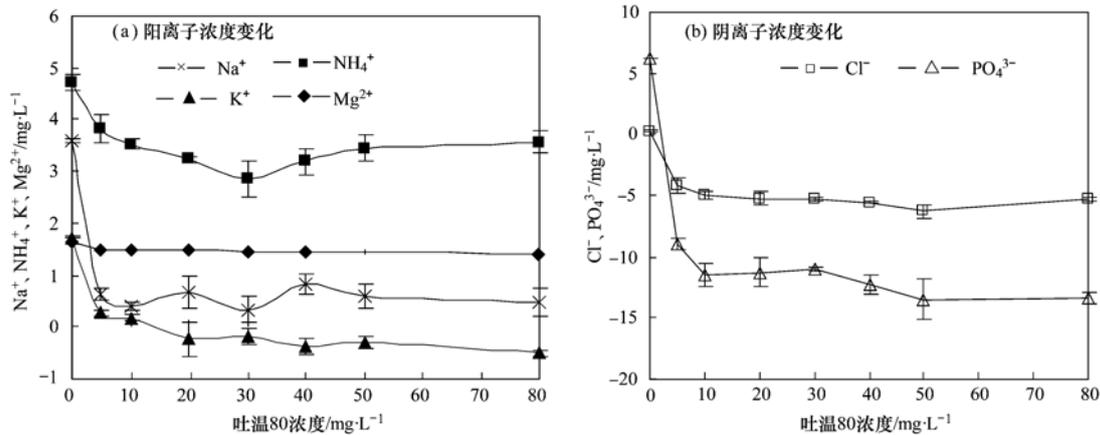


图 4 吐温 80 对 TPhT 降解过程中阴阳离子的影响

Fig. 4 Effect of Tween 80 on ions release during TPhT degradation

受到渗透压或其他胁迫及培养基成分变化时, 细胞会开放膜通道, 使得细胞内外的营养物质或离子发生运输^[21,22]。不同价态离子的膜通道可被众多不同的因素激活, 如胞内和胞外信使、化学试剂和渗透压等^[23]。因此, 在没有 TPhT 和吐温 80 的空白对照体系中, 细菌向体系释放 Cl⁻、PO₄³⁻、Na⁺、NH₄⁺、K⁺ 和 Mg²⁺, 这可能是因为 TPhT 的膜通透性作用, 对菌体产生了一定的毒性影响, 从而促进了胞内离子的释放。在以脂质膜和红细胞膜为代表物开展的研究中, 也证实了 TPhT 可以与细胞膜中的脂质和蛋白质等成分发生作用, 并改变膜结构^[24,25]。实验结果表明, 吐温 80 的投加导致这些离子的释放量减少或吸收量增加, 其中, 菌体对 Cl⁻、PO₄³⁻ 和 K⁺ 呈现了吸收的趋势。随着表面活性剂浓度的增加, 这些离子浓度的变化趋势呈现一定的差异。

由于 Na⁺ 和 K⁺ 在细胞中含量丰富, 其释放被看做是膜通透性改变的标志^[26]。例如, TPhT 对假丝酵母的毒性评估依据就是 K⁺ 的释放和膜流动性的改变^[27]。图 4(a) 显示, 吐温 80 致使 Na⁺ 和 K⁺ 的释放显著减少, 说明吐温 80 减轻了 TPhT 对菌体的毒性作用, 避免了菌体大量死亡或膜通透性过大出现

TPhT 的高脂溶性导致了其易于与细胞接触并侵入细胞^[20], 进而引起细胞内外阴阳离子的变化。同时, 由于 TPhT 微生物降解是代谢依赖过程, TPhT 的降解效果在一定程度上与营养物质的利用相关。为了分析 TPhT 生物降解与离子代谢的关系, 本实验检测了降解 2 d 后体系中几种常规代谢离子的浓度。图 4 中的离子浓度是减去对照后的结果, 故正值表示菌体释放离子, 负值意味着细菌从无机盐体系中吸收离子。

的胞内离子大量外流。K⁺ 的吸收则进一步说明了吐温 80 改善了菌体在降解 TPhT 过程的代谢。该改善作用也与吐温 80 对菌体降解 TPhT 的促进有关。菌体对 TPhT 降解量的增加相应地也需要增加对胞外离子的吸收。5 mg·L⁻¹ 的吐温 80 使得 Mg²⁺ 释放量略有减少, 之后随着吐温 80 浓度的增加而保持稳定状态。在许多生物过程中, Mg²⁺ 是不可或缺的辅助因子, 特别在酶活性、代谢调控和维持核酸结构稳定性等方面^[28,29]。Mg²⁺ 释放量的减少有利于维持菌体的正常生理代谢。NH₄⁺ 是菌体蛋白 N 末端结构域的组成成分, 这些成分可以降解产生氨基酸残基和 NH₄⁺。而 NH₄⁺ 的释放可能是因为 TPhT 导致部分含 NH₄⁺ 的细胞分子降解引起的。图 4(b) 证实所有检测的离子中, PO₄³⁻ 的浓度变化最为明显, 未加吐温 80 时菌体向体系释放 PO₄³⁻, 添加吐温 80 后, 菌体从体系中吸收 PO₄³⁻, 且 PO₄³⁻ 的吸收量随着吐温 80 的浓度增加而增加。细胞内存在大量的磷酸盐, 如磷酸肌酸、磷酸肌、ATP 和 ADP 等^[30]。在细胞内磷酸化反应中, 活细胞可以通过细胞膜吸收 PO₄³⁻。菌体从体系中吸收 PO₄³⁻ 说明细胞在降解 TPhT 的过程中需要大量的能量。Cl⁻ 的变化

规律与 PO_4^{3-} 相似. 有报道称有机锡化合物可以调节卤化物和其他无机阴离子通过生物膜的交换扩散^[31], 还可以通过氯化物的交换扩散机制运输有机阴离子通过脂双层^[15]. 表 1 的相关性分析显示, 吐

温 80 浓度与 Mg^{2+} 在 0.05 水平上显著负相关. 此外, 这些离子相互之间在 0.01 水平上具有显著性, 意味着一些离子的释放可能同其他离子的外排相耦合.

表 1 吐温 80 的浓度与各离子浓度变化的相关关系¹⁾

Table 1 Correlation between Tween 80 concentration and ion concentration

	Tween 80	Cl^-	PO_4^{3-}	Na^+	NH_4^+	K^+	Mg^{2+}
Tween 80	1						
Cl^-	-0.576	1					
PO_4^{3-}	-0.599	0.988 **	1				
Na^+	-0.442	0.942 **	0.964 **	1			
NH_4^+	-0.415	0.882 **	0.851 **	0.853 **	1		
K^+	-0.697	0.967 **	0.975 **	0.913 **	0.877 **	1	
Mg^{2+}	-0.739 *	0.960 **	0.970 **	0.906 **	0.839 **	0.990 **	1

1) * 表示在 $P=0.05$ 水平时的相关性; ** 表示在 $P=0.01$ 水平时的相关性

2.5 TPhT 降解产物分析及机制研究

图 5 显示, 在 7 d 内 TPhT 逐渐被菌体降解转化成毒性较小的二苯基锡 (DPhT) 和一苯基锡 (MPhT). 但是在降解后的溶液中, 没有检测到苯, 这意味着苏云金芽孢杆菌对 TPhT 的降解是从裂解苯环开始的, 而不是始于苯环和锡原子之间共价键的断裂. 第 3~7 d TPhT 的降解速度明显低于前两天. 造成该结果的原因主要与以下 3 个方面原因有关: ①随着浓度的下降, 残余的 TPhT 接触细胞并与官能团或酶等结合的机会也相应减少; ②随着 TPhT 的降解, 无机盐营养体系中养分被消耗而逐渐减少, 图 4 已证实了体系离子浓度的变化情况; ③菌体的生物量和细胞代谢活性受到 TPhT 的负面影响. 在短芽孢杆菌对 TPhT 的生物降解中已经发现在 TPhT 和其代谢产物作用下一些细胞发生了凋亡^[8].

随着时间的延长, DPhT 的浓度几乎呈线性下降, 说明 TPhT 转化为 DPhT 后被进一步降解. 然而, MPhT 的初始浓度较低, 大概在 $0.08 \sim 0.11 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$. 这有可能是因为 MPhT 快速转化为无机锡, 又或者是在第一天 TPhT 和 DPhT 降解为 MPhT 的速率缓慢. 降解 3 d 后, MPhT 的浓度高于 DPhT. 由于 TPhT 的结构中 3 个苯环均直接与锡原子相连接, 所以这些苯环可能同步裂解或是分别裂解, 从而导致了 TPhT 可以同时降解成 DPhT 和 MPhT; 而且 DPhT 也可以降解为 MPhT, 从而导致了此时 MPhT 的累积.

为了验证上述推论, 用苏云金芽孢杆菌分别降解了初始浓度为 $1 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 DPhT 和 MPhT (图 6). 图 6 表明, 苏云金芽孢杆菌不仅能降解 TPhT, 而且

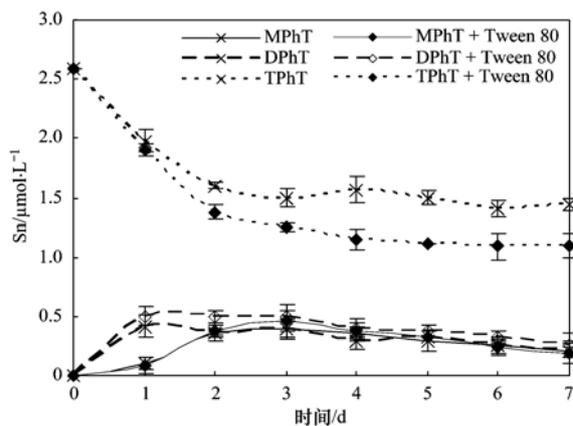


图 5 三苯基锡及其降解产物的浓度随时间的变化

Fig. 5 Changes in the concentration of TPhT and its degradation products with time

能降解其产物 DPhT 和 MPhT. 从图 6(b) 可以看出菌体在降解 DPhT 的过程中会产生 MPhT, 且随着降解时间的推移, 生成的 MPhT 又被进一步降解. 而自第 3 d 起 MPhT 的浓度便逐渐降低, 说明 MPhT 的降解速率要高于生成速率, 因此, MPhT 被生物转化成无机锡的过程不是 TPhT 降解的限速步骤. MPhT 在第 3 d 的累积 (图 5) 证实了 MPhT 是 DPhT 的降解产物外, 还有一部分 MPhT 是由 TPhT 直接降解而成的. 相对于 TPhT 而已, MPhT 的毒性较低. 此外, 就 3 种苯基锡的分子结构复杂程度来说, TPhT 的结构最复杂, 分子最大, 菌体对其利用不如 DPhT、MPhT 容易. 故随着降解时间的延长, MPhT 降解率显示逐渐增加的趋势.

运用动力学模型中常用的准一级动力学方程和准二级动力学方程对 MPhT、DPhT、TPhT 这 3 种苯基锡的降解过程进行拟合, 发现准二级动力学方程

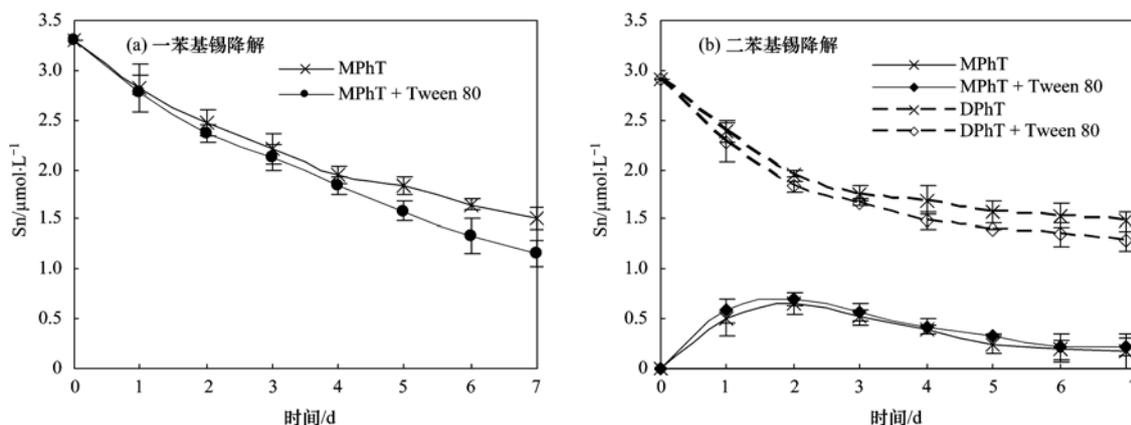


图 6 一苯基锡和二苯基锡的生物降解效果

Fig. 6 Changes in the concentration of MPhT and DPhT with time

能够很好地描述 3 种苯基锡的降解规律(表 2), 其中 r^2 值均大于 0.960. 而拟合结果表明可以利用准

二级动力学模型预测菌体在不同时间里对 3 种苯基锡的降解规律.

表 2 3 种有机锡微生物降解过程的动力学方程拟合参数

Table 2 Parameters of the kinetic models used to describe the biodegradation of three kinds of OTC

处理	准一级动力学方程 $\lg(q_e - q) = \lg q_e - kt/2.303$			准二级动力学方程 $t/q_t = 1/(kq_e^2) + t/q_e$		
	k	q_e	r^2	k	q_e	r^2
MPhT	0.429	0.008	0.967	15.963	0.011	0.994
MPhT + Tween 80	0.421	0.010	0.929	10.343	0.014	0.960
DPhT	0.537	0.005	0.988	67.427	0.006	0.983
DPhT + Tween 80	0.535	0.006	0.996	60.961	0.007	0.994
TPT	0.475	0.002	0.815	255.886	0.004	0.985
TPhT + Tween 80	0.850	0.006	0.995	117.948	0.006	0.984

3 结论

(1) 投加量在 $5 \sim 80 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 范围内, TPhT 的溶解度随着吐温 80 浓度的增加而增加. 苏云金芽孢杆菌和吐温 80 共同处理 $1 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ TPhT 2 d 后, TPhT 残余浓度降为 48.4%.

(2) 菌体处理 TPhT 过程会向无机盐体系释放一定量的 Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 PO_4^{3-} 和 Cl^- , 吐温 80 的加入可显著地降低细胞内 Na^+ 、 NH_4^+ 和 Mg^{2+} 的释放, 增加菌体对细胞外 Cl^- 、 PO_4^{3-} 和 K^+ 的吸收.

(3) 苯基锡的生物降解始于苯环裂解, TPhT 中各苯环的开环反应可以单独进行, 亦可同步发生, 进而产生 DPhT、MPhT 和无机锡.

参考文献:

- [1] Cruz A, Caetano T, Suzuki S, *et al.* *Aeromonas veronii*, a tributyltin (TBT)-degrading bacterium isolated from an estuarine environment, Ria de Aveiro in Portugal [J]. *Marine Environmental Research*, 2007, **64**(5): 639-650.
- [2] Rantakokko P, Hallikainen A, Airaksinen R, *et al.*

- Concentrations of organotin compounds in various fish species in the Finnish lake waters and Finnish coast of the Baltic Sea [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408**(12): 2474-2481.
- [3] Sakultantimetha A, Keenan H E, Beattie T K, *et al.* Acceleration of tributyltin biodegradation by sediment microorganisms under optimized environmental conditions [J]. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 2010, **64**(6): 467-473.
- [4] Dubey S K, Roy U. Biodegradation of tributyltins (organotins) by marine bacteria [J]. *Applied Organometallic Chemistry*, 2003, **17**(1): 3-8.
- [5] Stasinakis A S, Thomaidis N S, Nikolaou A, *et al.* Aerobic biodegradation of organotin compounds in activated sludge batch reactors [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **134**(3): 434-438.
- [6] Liscio C, Carro M D, Magi E. Comparison of two analytical methods for the determination of organotin compounds in marine organisms [J]. *Comptes Rendus Chimie*, 2009, **12**(8): 831-840.
- [7] Zachariadis G A, Rosenberg E. Speciation of organotin compounds in urine by GC-MIP-AED and GC-MS after ethylation and liquid-liquid extraction [J]. *Journal of Chromatography B Analytical Technologies in the Biomedical and Life Sciences*,

- 2009, **877**(11-12): 1140-1144.
- [8] Ye J S, Yin H, Peng H, *et al.* Biosorption and biodegradation of triphenyltin by *Brevibacillus brevis* [J]. *Bioresource Technology*, 2013, **129**: 236-241.
- [9] Kim I S, Park J S, Kim K W. Enhanced biodegradation of polycyclic aromatic hydrocarbons using nonionic surfactants in soil slurry [J]. *Applied Geochemistry*, 2001, **16** (11 - 12): 1419-1428.
- [10] 支银芳, 陈家军, 杨官光, 等. 表面活性剂溶液清洗油污土壤试验研究 [J]. *土壤*, 2007, **39** (2): 252-256.
- [11] 马满英, 刘有势, 施周. 生物与化学表面活性剂对多氯联苯的协同增溶作用 [J]. *生态环境*, 2008, **17** (2): 466-470.
- [12] 赵保卫. 增效试剂对难降解有机物的增溶作用、机理及生物可利用性影响 [D]. 杭州: 浙江大学, 2004. 4-5.
- [13] Heroult J, Nia Y, Denaix L, *et al.* Kinetic degradation processes of butyl- and phenyltins in soils [J]. *Chemosphere*, 2008, **72** (6): 940-946.
- [14] Marcic C, Hecho I L, Denaix L, *et al.* TBT and TPhT persistence in a sludged soil [J]. *Chemosphere*, 2006, **65** (11): 2322-2332.
- [15] Ortiz A, Teruel J A, Aranda F J. Effect of triorganotin compounds on membrane permeability [J]. *Biochimica et Biophysica Acta BBA-Biomembranes*, 2005, **1720** (1 - 2): 137-142.
- [16] Sakultantimetha A, Keenan H E, Beattie T K, *et al.* Bioremediation of tributyltin contaminated sediment: degradation enhancement and improvement of bioavailability to promote treatment processes [J]. *Chemosphere*, 2011, **83** (5): 680-686.
- [17] 王强, 戴九兰, 吴大千, 等. 微生物生态研究中基于 BIOLOG 方法的数据分析 [J]. *生态学报*, 2010, **30** (3): 817-823.
- [18] 叶锦韶, 田云, 尹华, 等. 三苯基锡的微生物降解及其对降解菌的影响 [J]. *环境科学*, 2013, **34** (9): 3607-3612.
- [19] 李跃鹏, 尹华, 叶锦韶, 等. 外源微生物对土壤中镉形态及微生物多样性的影响 [J]. *化工学报*, 2012, **63** (6): 1850-1858.
- [20] Gadd G M. Microbial interactions with tributyltin compounds: detoxification, accumulation, and environmental fate [J]. *Science of the Total Environment*, 2000, **258** (1 - 2): 119-127.
- [21] Monti J L E, Montes M R, Rossi R C. Alternative cycling modes of the Na^+/K^+ -ATPase in the presence of either Na^+ or Rb^+ [J]. *Biochimica et Biophysica Acta BBA-Biomembranes*, 2013, **1828** (5): 1374-1383.
- [22] Gopalani N K, Meena R N, Prasad D N, *et al.* Cooperativity between inhibition of cytosolic K^+ efflux and AMPK activation during suppression of hypoxia-induced cellular apoptosis [J]. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*, 2012, **44** (1): 211-223.
- [23] Song H D, Beck T L. Temperature dependence of gramicidin channel transport and structure [J]. *The Journal of Physical Chemistry C*, 2013, **117** (8): 3701-3712.
- [24] Man D. Fluidity of liposome membranes doped with organic tin compounds: ESR study [J]. *Journal of Liposome Research*, 2008, **18** (3): 225-234.
- [25] Bonarska-Kujawa D, Kleszczyńska H, Przystalski S. The location of organotins within the erythrocyte membrane in relation to their toxicity [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2012, **78** (1): 232-238.
- [26] Buckel W, Thauer R K. Energy conservation via electron bifurcating ferredoxin reduction and proton/ Na^+ translocating ferredoxin oxidation [J]. *Biochimica et Biophysica Acta BBA-Bioenergetics*, 2013, **1827** (2): 94-113.
- [27] White J S, Tobin J M. Role of speciation in organotin toxicity to the yeast *Candida maltosa* [J]. *Environmental Science & Technology*, 2004, **38** (14): 3877-3884.
- [28] Zorbas Y G, Kakuris K K, Federenko Y F, *et al.* Utilization of magnesium during hypokinesia and magnesium supplementation in healthy subjects [J]. *Nutrition*, 2010, **26** (11 - 12): 1134-1138.
- [29] Romani A. Regulation of magnesium homeostasis and transport in mammalian cells [J]. *Archives of Biochemistry and Biophysics*, 2007, **458** (1): 90-102.
- [30] Barat R, Montoya T, Borrás L, *et al.* Interactions between calcium precipitation and the polyphosphate-accumulating bacteria metabolism [J]. *Water Research*, 2008, **42** (13): 3415-3424.
- [31] Gabrielska J, Kral T, Langner M, *et al.* Different effects of di- and triphenyltin compounds on lipid bilayer dithionite permeabilization [J]. *Zeitschrift für Naturforschung C*, 2000, **55** (9 - 10): 758-763.

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