

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第35卷 第6期

Vol.35 No.6

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

北京地区冬夏季持续性雾-霾发生的环境气象条件对比分析..... 廖晓农, 张小玲, 王迎春, 刘伟东, 杜佳, 赵玲慧 (2031)

阜康大气气溶胶中水溶性无机离子粒径分布特征研究 ..... 苗红妍, 温天雪, 王跃思, 刘子锐, 王丽, 兰中东 (2045)

上海地铁站台大气颗粒物中过渡金属研究 ..... 包良满, 雷前涛, 谈明光, 李晓林, 张桂林, 刘卫, 李燕 (2052)

七一冰川地区苔藓中重金属元素含量研究 ..... 马娟娟, 李真 (2060)

冬季东海、南黄海 DMS 和 DMSP 浓度分布及影响因素研究 ..... 宋以柱, 张洪海, 杨桂朋 (2067)

大亚湾石化排污海域重金属污染及生态风险评价 ..... 徐姗姗, 李纯厚, 徐娇娇, 肖雅元, 林琳, 黄小平 (2075)

深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征 ..... 王鑫璇, 张鸿, 何龙, 沈金灿, 柴之芳, 杨波, 王艳萍 (2085)

表层岩溶泉水中多环芳烃污染特征及来源解析 ..... 孙玉川, 沈立成, 袁道先 (2091)

桂江主要离子及溶解无机碳的生物地球化学过程 ..... 唐文魁, 陶贞, 高全洲, 毛海若, 姜光辉, 焦树林, 郑雄波, 张乾柱, 马赞文 (2099)

汾河源区不同景观带水文过程研究 ..... 杨永刚, 李彩梅, 秦作栋, 邹松兵 (2108)

北京市通州区地下水分层质量评价及水化学特征 ..... 郭高轩, 琚宜文, 翟航, 许亮, 沈媛媛, 纪轶群 (2114)

光透法定量两相流中流体饱和度的模型及其应用 ..... 章艳红, 叶淑君, 吴吉春 (2120)

紫色土坡耕地氮淋溶过程及其环境健康效应 ..... 陈维梁, 高扬, 林勇明, 朱波, 徐亚娟, 于贵瑞, 吴承祯 (2129)

基于非点源溶解态氮负荷估算的率水流域土地利用结构优化研究 ..... 陆宇超, 毕孟飞, 李泽利, 沙健, 王玉秋, 钱丽萍 (2139)

镇江老城区古运河沉积物氮及有机质垂向分布及污染评价 ..... 周晓红, 李义敏, 周艺, 卫安平, 周广顺, 肖思思 (2148)

两种沉水植物对上覆水和间隙水中可溶性无机氮的影响 ..... 杨文斌, 李阳, 孙共献 (2156)

湖泊沉积物短时间反复扰动下悬浮物上生物有效磷的动态变化 ..... 武晓飞, 李大鹏 (2164)

不同扰动强度下城市重污染河道底泥对磷吸收和固定的影响 ..... 王尚, 李大鹏 (2171)

池塘残饵对底泥氮、磷释放影响的模拟研究 ..... 吕元蛟, 李瑞娇, 张念, 赵峰, 谢从新, 张敏 (2178)

再悬浮过程中河流底泥 PAHs 的迁移与释放 ..... 王晓慧, 毕春娟, 韩景超 (2185)

低分子有机酸对汞氧化还原反应的影响 ..... 赵士波, 孙荣国, 王定勇, 王小文, 张成 (2193)

活性炭催化过氧化氢去除荧光增白剂 ..... 刘海龙, 张忠民, 赵霞, 焦茹媛 (2201)

准分子灯光照降解水中烷基酚的动力学 ..... 刘玉海, 叶招莲, 文颖频, 毕承路 (2209)

AF + BAF 用于处理树脂化工集中区废水厂尾水的研究 ..... 涂勇, 刘伟京, 张耀辉, 徐军, 唐敏, 陈勇, 白永刚 (2216)

镉(II)-8-羟基喹啉分子印迹聚合物微球的合成及吸附性能研究 ..... 杨春艳, 陈复彬, 赵慧, 常自强, 章竹君 (2223)

微气泡曝气生物膜反应器同步硝化反硝化研究 ..... 刘春, 年永嘉, 张静, 张明, 张磊, 龚鹏飞, 肖太民, 李星 (2230)

聚乳酸/淀粉固体缓释碳源生物反硝化研究 ..... 唐丹琦, 王娟, 郑天龙, 刘建国, 汪群慧 (2236)

丝状菌膨胀对无纺布生物反应器处理效果及膜污染特征的影响 ..... 侍宽, 薛罡, 高品, 吴凡 (2241)

聚合氯化铝去除污泥水中磷的工艺优化 ..... 周振, 胡大龙, 乔卫敏, 陈冠翰, 蒋玲燕, 李震, 麦穗海 (2249)

鄱阳湖持久性有机污染物 (POPs) 长距离传输潜力模拟 ..... 弓晓峰, 向洪锐, 陈春丽, 周文斌, 王佳佳, 刘春英, 曾艳 (2256)

基于不确定性分析的垃圾焚烧烟气中重金属的土壤沉积及生态风险评估 ..... 廖志恒, 孙家仁, 吴兑, 范绍佳, 任明忠, 吕家扬 (2264)

农药企业场地土壤中苯系物污染风险及管理对策 ..... 谭冰, 王铁宇, 李奇锋, 张海燕, 庞博, 朱朝云, 王道涵, 吕永龙 (2272)

渤海湾海域 10 种鱼类中二噁英类及指示性多氯联苯的污染特征研究及风险评价 ..... 王莎莎, 高丽荣, 田益玲, 朱帅, 张芹 (2281)

基于荧光传感器 F<sub>rex</sub> 的特性检测水质环境中生物毒性物质 ..... 赵巍, 汪钊, 蔡强, 欧文斌, 孟凡国 (2287)

对苯二酚抑制铜绿微囊藻生长下藻毒素的产生与释放 ..... 张元春, 梁文艳, 赵远, 李飞贞, 曹敬灿, 胡绍杰 (2294)

基于沼液的培养基及产油小球藻藻种选育 ..... 赵凤敏, 梅帅, 曹有福, 丁进锋, 徐嘉杰, 李树君 (2300)

酸性矿山废水库周边土壤微生物多样性及氨氧化菌群落研究 ..... 刘莹, 王丽华, 郝春博, 李璐, 李思远, 冯传平 (2305)

河蚬 (*Corbicula fluminea*) 扰动对表层沉积物中氨氧化菌群落结构和丰度的影响 ..... 王雪, 赵大勇, 曾巾, 余多慰, 吴庆龙 (2314)

海洋油气田沉积物产甲烷活性及微生物生态 ..... 田琪, 王佳, 范晓蕾, 罗生军, 郭荣波, 邱艳玲 (2322)

DGGE 及 T-RFLP 分析光照下电位对细菌群落的影响 ..... 吴义诚, 邓欢, 肖勇, 赵峰 (2328)

重金属抗性解磷细菌的磷溶解特性研究 ..... 田江, 彭霞薇, 李霞, 孙雅君, 冯红梅, 江泽平 (2334)

1 株耐冷兼性嗜碱好氧反硝化菌的分离鉴定及反硝化特性 ..... 王兆阳, 陈国耀, 姜珂, 许培雅 (2341)

黑麦草-丛枝菌根对不同番茄品种抗氧化酶活性、镉积累及化学形态的影响 ..... 江玲, 杨芸, 徐卫红, 王崇力, 陈蓉, 熊仕娟, 谢文文, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体 (2349)

黄河三角洲区土壤活性氮对盐分含量的响应 ..... 李玲, 仇少君, 陈印平, 赵西梅, 刘京涛, 陆兆华 (2358)

宁南山区不同草地土壤原位矿化过程中氮素的变化特征 ..... 蒋跃利, 赵彤, 闫浩, 黄懿梅 (2365)

长期施用四环素残留猪粪对土壤中耐药菌及抗性基因形成的影响 ..... 张俊, 杨晓洪, 葛峰, 王娜, 焦少俊, 叶波平 (2374)

长期不同耕作方式对紫色水稻土重金属含量及有效性的影响 ..... 常同举, 崔孝强, 阮震, 赵秀兰 (2381)

伊犁河流域土壤重金属环境地球化学基线研究及污染评价 ..... 赵新儒, 特拉津·那斯尔, 程永毅, 詹江渝, 杨剑虹 (2392)

江苏如东互花米草盐沼湿地重金属分布及其污染评价 ..... 张龙辉, 杜永芬, 王丹丹, 高抒, 高文华 (2401)

小流域农业面源氮污染时空特征及与土壤呼吸硝化关系分析 ..... 欧阳威, 蔡冠清, 黄浩波, 耿晓君 (2411)

保护性耕作下小麦田土壤呼吸及碳平衡研究 ..... 张赛, 王龙昌, 黄召存, 贾会娟, 冉春燕 (2419)

米楮天然林和人工林土壤呼吸的比较研究 ..... 吴君君, 杨智杰, 翁发进, 刘小飞, 陈朝琪, 林伟盛, 王小红, 陈坦 (2426)

水力停留时间对复合式厌氧折流板反应器乙醇型发酵制氢系统的影响 ..... 刘晓焯, 张洪, 李永峰 (2433)

《环境科学》征订启事 (2208) 《环境科学》征稿简则 (2400) 信息 (2084, 2200, 2229, 2391)

# 深圳水库群表层水中全氟化合物的分布特征

王鑫璇<sup>1,2</sup>, 张鸿<sup>2\*</sup>, 何龙<sup>3</sup>, 沈金灿<sup>4</sup>, 柴之芳<sup>5</sup>, 杨波<sup>6</sup>, 王艳萍<sup>1</sup>

(1. 天津科技大学食品工程与生物技术学院, 天津 300457; 2. 深圳大学物理科学与技术学院, 深圳 518060; 3. 深圳市环境监测中心站, 深圳 518049; 4. 深圳出入境检验检疫局食品检验检疫技术中心, 深圳 518045; 5. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 6. 深圳大学化学与化工学院, 深圳 518060)

**摘要:** 为探究深圳市水库群表层水中全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)的含量水平,应用 WAX 固相萃取分离富集与高效液相色谱-质谱联用相结合的方法,分析了 2012 年 11 月及 2013 年 1 月采自深圳 12 个水库库区中心与取水口共 25 个位点表层水中 14 种 PFCs 的含量及变化规律. 结果表明全氟己烷磺酸(perfluorohexane sulfonate, PFHxS)及碳链 $\geq 11$ 的长链 PFCs 均未检出,全氟辛酸(perfluorooctane acid, PFOA)为主要单体,库区中心和取水口  $\sum$  PFCs 未见显著性差异;强降水对水库表层水 PFCs 有稀释作用,同时也可输入 PFOA;水库群表层水 PFCs 含量主要受其进水口位置、水源环境及水库地理位置等因素的影响. 虽水温与  $\sum$  PFCs 含量间也有正相关关系,但影响作用弱于强降水.

**关键词:** 全氟化合物; 水库群; 表层水; 强降水; 水源环境; 水质参数; 高效液相色谱-质谱

中图分类号: X524; X832 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2014)06-2085-06 DOI: 10.13227/j.hjxx.2014.06.007

## Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups

WANG Xin-xuan<sup>1,2</sup>, ZHANG Hong<sup>2</sup>, HE Long<sup>3</sup>, SHEN Jin-can<sup>4</sup>, CHAI Zhi-fang<sup>5</sup>, YANG Bo<sup>6</sup>, WANG Yan-ping<sup>1</sup>

(1. College of Food Engineering and Biotechnology, Tianjin University of Science and Technology, Tianjin 300457, China; 2. College of Physics Science and Technology, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China; 3. Shenzhen Environmental Monitoring Center, Shenzhen 518049, China; 4. Food Inspection Center of Shenzhen Entry-exit Inspection and Quarantine Bureau, Shenzhen 518045, China; 5. Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. College of Chemistry and Chemical Engineering, Shenzhen University, Shenzhen 518060, China)

**Abstract:** In order to study the concentrations of 14 perfluorinated compounds (PFCs) in 25 surface water samples collected from 12 Shenzhen reservoirs in November of 2012 and January of 2013, high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry was combined with solid phase extraction enrichment in this research. The results indicated that perfluorohexane sulfonate and long-chain ( $C \geq 11$ ) PFCs were below the detection limit in all samples and perfluorooctane acid was the primary species. No significant difference in concentration was found between samples from the center of the reservoir and the outlet. Heavy precipitations diluted PFCs concentrations in surface water, but also led to PFOA input. PFCs concentrations in surface water of the reservoir were mainly affected by water inlet, source environment and geography. Although the water temperature had positive correlations with  $\sum$  PFCs concentration, the influence of heavy precipitations was stronger than that of water temperature.

**Key words:** perfluorinated compounds (PFCs); reservoir groups; surface water; heavy precipitation; source environment; water quality parameters; high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS)

继 2009 年 5 月全氟辛酸磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)及其盐、全氟辛酸磺酰氟(perfluorooctane sulfonyl fluoride, PFOSF)被列入新增持久性有机污染物(persistent organic pollutants, POPs)名单之后,2012 年中国环境保护部连同监察部等十二部委联合印发了《POPs 十二五规划》,并于 2013 年 5 月将 PFOS 等修正案正式报送人大审议. 可见全氟辛酸磺酸、全氟辛酸(perfluorooctane acid, PFOA)等全氟化合物(perfluorinated compounds, PFCs)造成的环境污染和生态风险等

问题已引起社会各界的高度关注. 由于 PFCs 具有一定的水溶性,故水环境被认为是 PFCs 的重要研究对象. 水中的 PFCs 主要来自工业排污、干湿沉降以及水中 PFCs 前体物质的转化等<sup>[1]</sup>. 近年江河<sup>[2,3]</sup>、湖<sup>[4]</sup>、海<sup>[5,6]</sup>、地下水<sup>[7]</sup>及污水<sup>[8]</sup>中 PFCs

收稿日期: 2013-10-09; 修订日期: 2013-11-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(11275130, 21177089, 31201444); 国家科技基础性工作专项(2013FY113100-3)

作者简介: 王鑫璇(1989~),女,硕士研究生,主要研究方向为环境持久性有机污染物, E-mail: wangxinxuan89@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: zhangh@szu.edu.cn

的研究众多,也有涉及个别水库的报道<sup>[9~11]</sup>,但针对区域范围水库群 PFCs 含量的研究则鲜有报道.众所周知,水库是城镇居民生活用水的直接来源,加之饮水是人体 PFCs 的主要暴露途径之一<sup>[12]</sup>,故研究水库水中 PFCs 的含量水平及分布特征,对于 PFCs 来源及其暴露风险评价具有重要意义.

本研究应用 WAX 固相萃取分离富集与高效液相色谱-质谱联用 (high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry, HPLC-MS/MS) 相结合的方法,分析了深圳市 12 个水库取水口与库区中心共 25 个位点表层水中 PFCs 的含量,探讨了其水系分布特征和强降水产生的影响,以期水库水中 PFCs 的来源及其污染控制和暴露风险评价提供重要的参考数据.

## 1 材料与方法

### 1.1 仪器与试剂

HPLC-MS/MS 联用仪为 Agilent 1100-API 3000 (美国 AB 公司). 固相萃取采用 12 管真空萃取装置(美国 BESEP 公司)及 Oasis WAX (150 mg, 6 cc) 固相萃取柱 (美国 Waters 公司). PFCs 标样 (2 000 ng·mL<sup>-1</sup>) 购自加拿大 wellington 公司,14 种 PFCs 混合外标包括全氟戊酸 (perfluoropentanoic acid, PFPeA)、全氟己酸 (perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟己烷磺酸 (perfluorohexane sulfonate, PFHxS)、全氟庚酸 (perfluoroheptanoic acid, PFHpA)、全氟辛酸 (perfluorooctane acid, PFOA)、全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全

氟壬酸 (perfluorononanoic acid, PFNA)、全氟癸酸 (perfluorodecanoic acid, PFDA)、全氟十一酸 (perfluoroundecanoic acid, PFUDA)、全氟十二酸 (perfluorododecanoic acid, PFDoA) 和全氟十三酸 (perfluorotridecanoic acid, PFTrDA)、全氟十四酸 (Perfluorotetradecanoic acid, PFTeDA)、全氟十六酸 (Perfluorohexadecanoic acid, PFHxDA)、全氟十八酸 (Perfluorooctadecanoic acid, PFODA) 用甲醇逐级稀释为 5、10、20、40、60 ng·mL<sup>-1</sup> 这 5 个浓度,用于 HPLC-MS/MS 标准工作曲线; 8 种混合内标包括 perfluoro-*n*-[1,2-<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] hexanoic acid (MPFHxA)、perfluoro-*n*-[1,2,3,4-<sup>13</sup>C<sub>4</sub>] octanoic acid (MPFOA)、perfluoro-*n*-[1,2,3,4,5-<sup>13</sup>C<sub>5</sub>] nonanoic acid (MPFNA)、perfluoro-*n*-[1,2-<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] decanoic acid (MPFDA)、perfluoro-*n*-[1,2-<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] undecanoic acid (MPFUDA)、perfluoro-*n*-[1,2-<sup>13</sup>C<sub>2</sub>] dodecanoic acid (MPFDoA)、sodium perfluoro-1-hexane [<sup>18</sup>O<sub>2</sub>] sulfonate (MPFHxS) 和 sodium perfluoro-1-[1,2,3,4-<sup>13</sup>C<sub>4</sub>] octanesulfonate (MPFOS) 用甲醇稀释至 100 ng·mL<sup>-1</sup>, 备用. 实验用甲醇(美国 J. T. Baker 公司)、甲酸(96%, 美国 Dikma 公司)和醋酸铵(美国 Dikma 公司)为色谱纯,氨水(25%, 比利时 Acros 公司)为优级纯,水为电阻率 18.2 MΩ·cm 的超纯水.

### 1.2 样品采集制备与分析

基于水库的分布与规模, 25 份水库表层水(距水平面 15 cm 以内)样品于 2012 年 11 月(平水季)及 2013 年 1 月(枯水季)分别采自深圳市 12 个水库

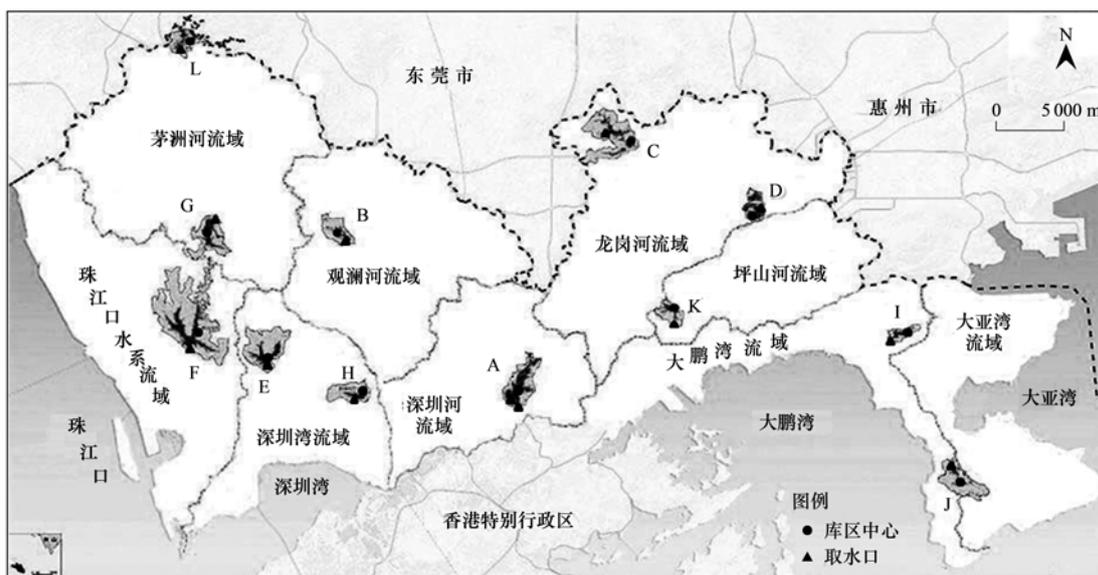


图 1 深圳市水库群表层水采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of surface water sampling sites in Shenzhen reservoirs

(A~L)的取水口和库区中心,其中水库 A 采集了供港、供深两个取水口位点(图 1)。每份采集约 1 500 mL,装入聚丙烯瓶。

水样经 0.45  $\mu\text{m}$  聚酰胺纤维膜过滤,容量瓶定容 1 000 mL 滤后水,再以 2% 甲酸水溶液调节其 pH 至 3,加入 5 ng 的 PFCs 内标液,混匀,上活化后的 Polymer WAX 固相萃取柱(依次用 2 mL 甲醇及 2 mL 超纯水活化),控制流速为 2 滴 $\cdot\text{s}^{-1}$ ,待流干,先后用 2 mL 2% 甲酸水溶液、2 mL 2% 甲酸水溶液比甲醇(1:1, 体积比)溶液淋洗,抽干,再用 2 mL 甲醇淋洗,流干,最后用 4 mL 9% 氨水甲醇溶液洗脱并抽干,收集洗脱液,氮吹至干,甲醇定容至 1 mL,转入样品瓶,待 HPLC-MS/MS 分析。

HPLC 分析:色谱柱为 Agilent Eclipse XDB C18 (3.5  $\mu\text{m}$ , 2.1 mm  $\times$  150 mm),进样体积 20  $\mu\text{L}$ 。在 50 $^{\circ}\text{C}$  柱温,0.3 mL $\cdot\text{min}^{-1}$  流速下,流动相 A(甲醇)与 B(2 mmol $\cdot\text{L}^{-1}$  醋酸铵水溶液)的梯度洗脱程序为:起始时 20% A、80% B,8 min 时 95% A、5% B,13 min 时 100% A,14 min 时 20% A、80% B,保持 6 min。

MS/MS 分析:使用 API 3000 三重四极杆串联质谱,选择电喷雾负离子化模式、负离子扫描方式及多反应监测模式,在 4 500 V 电喷雾电压、10 L $\cdot\text{min}^{-1}$  雾化气流速、9.0 L $\cdot\text{min}^{-1}$  气帘气流速、5.0 L $\cdot\text{min}^{-1}$  辅助气流速和 450 $^{\circ}\text{C}$  离子源温度下,内标法定量。目标化合物及内标物的质谱参数同文献[13]报道。

### 1.3 质量控制与保证

实验器皿均采用聚丙烯材质,使用前先经甲醇

淋洗。为控制前处理过程可能引入的外源性污染,每批样品都进行全程空白实验,空白基质为 18.2 M $\Omega\cdot\text{cm}$  的超纯水,仅检出 0.079 ng $\cdot\text{L}^{-1}$  水平的 PFOS,所有实验结果均为扣除基质空白后的数据。水样中 14 种 PFCs 在 5.0 ng $\cdot\text{L}^{-1}$  浓度水平的基质加标回收率范围为 69%~110%,相对标准偏差范围为 0.53%~6.5%。在 5~60 ng $\cdot\text{mL}^{-1}$  浓度范围的线性相关系数( $R^2$ )在 0.990 7~0.999 7 之间,检测限(detection limit, DL)范围 0.094~0.41 ng $\cdot\text{L}^{-1}$ 。当 PFCs 单体分析浓度低于 DL 时,以“<DL”标示,统计分析时计 1/2 DL<sup>[14]</sup>。

数据的统计分析及作图采用 SPSS 和 Origin 软件, $\alpha\leq 0.05$ 。

## 2 结果与讨论

### 2.1 深圳市水库群表层水中 PFCs 的含量与组成

2012 年 11 月及 2013 年 1 月采自深圳 12 个水库共 25 个位点的表层水中 PFCs 含量测定结果见表 1。2012 年 11 月样品中  $\sum$  PFCs 含量范围为 1.2~15 ng $\cdot\text{L}^{-1}$ ,2013 年 1 月样品为 0.14~7.2 ng $\cdot\text{L}^{-1}$ ,12 个水库库区中心与取水口表层水  $\sum$  PFCs 组间 T 检验,未见位点间显著性差异。所有样品中均未检出 PFHxS 及碳链  $\geq 11$  的长链 PFUDA、PFDOA、PFTrDA、PFTeDA、PFHxDA 和 PFOA。检出的 PFCs 均呈中链( $7\leq C\leq 10$ ) >> 短链( $C\leq 6$ )的分布。中链占 PFCs 总量( $\sum$  PFCs)的 67%~100%,PFOA 又占中链 PFCs 的 67%,为水库表层水中 PFCs 主要残留单体。

表 1 深圳水库群表层水中 PFCs 含量水平<sup>1)</sup>/ng $\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of PFCs in surface water of Shenzhen reservoir groups/ng $\cdot\text{L}^{-1}$

项目	短链( $C\leq 6$ )			中链( $7\leq C\leq 10$ )				$\sum$ PFCs
	PFPeA	PFHxA	PFHpA	PFOA	PFOS	PFNA	PFDA	
A	1.3/nd <sup>2)</sup>	0.60/nd	<DL/nd	5.7/0.76	6.3/2.8	0.68/nd	0.39/nd	15/3.6
B	1.9/nd	1.1/nd	nd/nd	1.8/1.2	5.3/2.9	0.80/nd	0.56/nd	12/4.1
C	nd/nd	0.77/nd	0.41/nd	7.2/1.1	1.5/nd	0.58/nd	0.38/nd	11/1.1
D	nd/nd	0.62/nd	nd/nd	0.77/0.7	1.5/nd	0.52/nd	0.31/nd	3.7/0.7
E	0.67/nd	0.74/nd	<DL/nd	1.2/0.33	1.4/nd	0.51/nd	0.34/nd	5.0/0.33
F	nd/nd	0.84/nd	0.27/nd	2.0/1.3	1.7/nd	0.58/nd	0.28/nd	5.7/1.3
G	nd/nd	1.4/nd	1.2/nd	7.3/6.9	2.7/0.32	0.74/nd	0.45/nd	14/7.2
H	0.64/nd	0.82/nd	<DL/nd	2.4/2.2	1.4/nd	0.61/nd	0.37/<DL	6.4/2.3
I	nd/nd	<DL/nd	nd/nd	3.4/<DL	0.75/nd	0.17/nd	nd/nd	4.5/0.09
J	nd/nd	nd/nd	nd/nd	0.22/0.29	0.94/nd	nd/nd	nd/nd	1.2/0.29
K	nd/nd	<DL/nd	<DL/nd	1.2/0.56	1.1/nd	0.37/nd	0.15/nd	3.1/0.56
L	nd/nd	1.1/nd	0.31/nd	7.2/1.8	1.6/nd	0.72/nd	0.41/nd	11/1.8
水库群平均值	0.38/nd	0.71/nd	0.21/nd	3.4/1.4	2.2/0.50	0.52/nd	0.30/nd	7.7/1.9
DL	0.41	0.39	0.22	0.18	0.15	0.11	0.10	

1) 左侧为 2012 年 11 月样品数值; 右侧为 2013 年 1 月样品数值; 2) nd: 未检出

PFCs 单体间 Spearman 相关分析结果显示, 水库表层水中 PFOS 分别与 PFOA、PFPeA、PFHxA、PFNA、PFDA 呈显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 及 PFPeA、PFHxA、PFHpA、PFOA、PFNA、PFDA 呈两两间正相关 ( $P < 0.05$ ,  $P < 0.01$ ), 与 PFOS 相关产品的生产过程中常产生 PFOA 等全氟羧酸 (perfluorinated carboxylic acids, PFCAs) 类副产物<sup>[15,16]</sup>, 以及 PFCAs 自身的降解行为相符<sup>[17]</sup>.

## 2.2 深圳市水库群表层水两时间批次 PFCs 含量的差异分析

两批次水库表层水中  $\sum$  PFCs 含量显示, 采自 2012 年 11 月的表层水中  $\sum$  PFCs 平均值为  $7.7 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 是 2013 年 1 月平均值  $1.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  的 4.0 倍. 同时, 检出的 PFCs 单体也由 2012 年 11 月的 PFOA、PFOS、PFNA、PFHxA、PFDA、PFHpA、PFPeA 7 种锐减至 2013 年 1 月的 PFOA、PFOS、PFDA 3 种 (表 1). 此外, 表层水中 PFOS/PFOA 比值  $< 1$  的水库数量则由 2012 年 11 月的 7 个增至 2013 年 1 月的 10 个 (图 2). 根据《2012 年深圳市气候公报》, 在 2012 年 11 月 1~8 日第一次采样后, 同月 17 日、23 日、26~27 日、29 日共有 4 次强降水, 致该月降水量达 106.5 mm, 是往年同期平均降水 (35.4 mm) 的 3 倍; 同年 12 月 2~5 日、18 日、29~30 日也有 3 次降水, 月降水量为 41.2 mm, 是

往年同期 (27.2 mm) 的 1.5 倍. 由于 PFOA 是雨水中 PFCs 最主要的种态<sup>[18]</sup>, 因此 2013 年 1 月深圳 12 水库表层水中  $\sum$  PFCs 含量与 PFCs 单体检出率显著降低以及 PFOS/PFOA 比值  $< 1$  的水库增加, 是受强降水稀释及其 PFOA 输入的影响. 为进一步论证降雨与水库表层水中 PFCs 含量间的关系, 取两时间批次各水库  $\sum$  PFCs 差值与各水库同期总水容积 (表 2) 进行相关性分析, 结果显示两者呈正相关 ( $P < 0.05$ ), 证实了强降水对水库表层水中 PFCs 含量的影响.

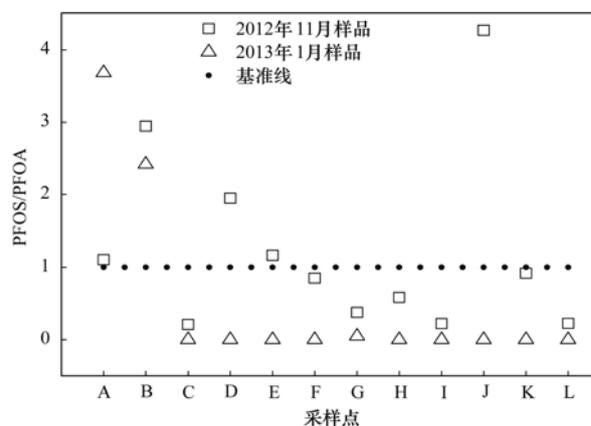


图 2 深圳水库群表层水中 PFOS/PFOA 比值  
Fig. 2 PFOS/PFOA ratios in surface water of Shenzhen reservoir groups

表 2 2012 年 11 月~2013 年 1 月深圳水库群基本信息

Table 2 Basic information of Shenzhen reservoir groups from November 2012 to January 2013

水库编号	两批次 $\sum$ PFCs 含量差/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	集雨面积 <sup>[19]</sup> / $\text{km}^2$	集雨体积 <sup>1)</sup> $\times 10^2/\text{万 m}^3$	蒸发体积 <sup>2)</sup> $\times 10^2/\text{万 m}^3$	总供水量 $\times 10^3/\text{万 m}^3$	总水容积 <sup>3)</sup> $\times 10^3/\text{万 m}^3$
A	11	61	9.0	9.7	53	53
B	7.5	5.0	0.74	0.80	7.3	7.3
C	9.5	23	3.4	3.7	3.7	3.6
D	3.1	3.5	0.51	0.55	12	12
E	4.5	29	4.3	4.6	12	12
F	4.5	64	9.5	10	12	12
G	6.8	44	6.5	7.0	12	12
H	4.1	4.3	0.64	0.69	6.1	6.1
I	4.4	9.8	1.5	1.6	0.12	0.11
J	0.89	5.4	0.80	0.87	0.12	0.12

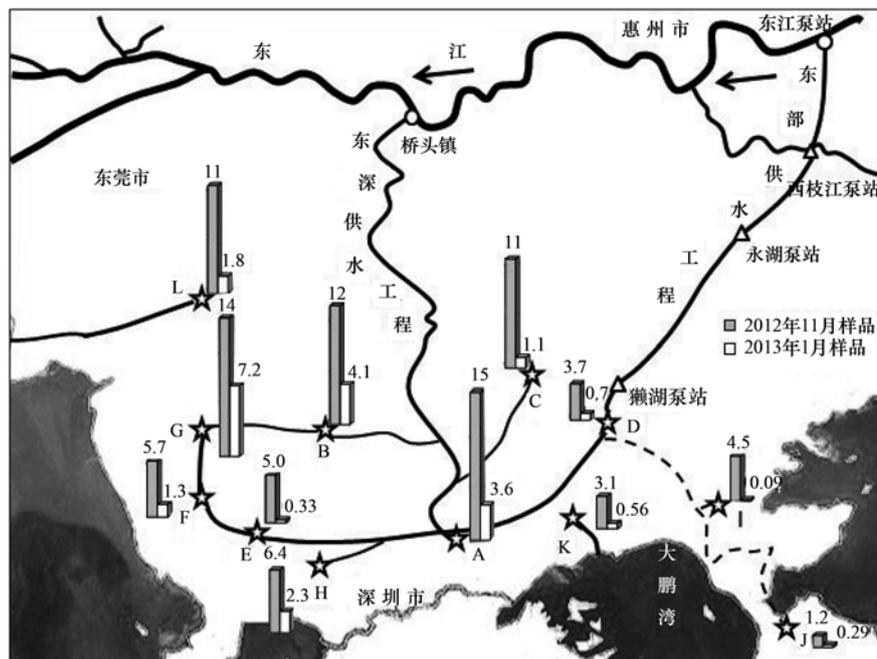
1) 集雨体积 = 集雨面积  $\times$  11、12 月降雨量  $147.7 \text{ mm}$ <sup>[20]</sup>; 2) 蒸发体积 = 集雨面积  $\times$  11、12 月蒸发量  $160.2 \text{ mm}$ <sup>[20]</sup>; 3) 同期总水容积 = 集雨体积 + 同期总供水量 - 蒸发体积

## 2.3 深圳水库群表层水中 PFCs 含量的水系分布特征

研究涉及的 12 个水库中有 10 个 (水库 A~J) 源自东江 (图 3), 分属东深与东部两条供水网络, 构成覆盖深圳东西的双水源保障体系<sup>[21]</sup>. 东深供水工程起自东莞桥头镇, 主干线经封闭管道到达水库

A, 两条支线则分别进入水库 B 和 C.

东部供水工程分别从东江及其西枝江泵站取水, 经永湖、獭湖泵站, 陆续到达水库 D、E、F、G. 其梅林支线进入水库 H, 大鹏支线则间歇式引水至水库 I 和 J. 除水库 G 外, 其他 6 个水库表层水中



单位:  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

图3 深圳水库群表层水中  $\sum$  PFCs 含量的水系分布

Fig. 3 Variation of  $\sum$  PFCs levels in surface water of Shenzhen reservoir groups

$\sum$  PFCs 均显著 ( $P < 0.01$ ) 低于同期东深管网的水库 A、B 和 C。而水库 G 因 2010 年与水库 B 贯通, 致其  $\sum$  PFCs 含量显著高于东部供水工程的其他水库, 证实了东深与东部两条供水网络所属水库表层水中全氟化合物含量的差异。

形成这种差异的原因可能有: ①取水口的设置。东江流经惠州到东莞, 东深供水工程取水自东莞桥头镇, 位于东部供水工程廉福地取水口的下游, 引入外源性 PFCs 的机会随沿岸城市的增加而增大, 符合污染物自上游向下游转移的规律; ②取水口地域特征。东莞有“世界工厂”之称, 而桥头镇有约千余家电子信息、五金机械、印刷、纺织、家具等涉 PFCs<sup>[22]</sup> 企业。对比之下, 惠州水口镇拥有多处国家和省级风景名胜及自然保护区, 主要从事旅游相关的服务业, 制造业稀少, PFCs 污染源少, 环境条件较好。

至于水库 K, 其源自深圳梧桐山梅沙尖, 属于自然水源, 同期表层水中  $\sum$  PFCs 含量较低。水库 L 源自西江,  $\sum$  PFCs 含量较高, 这也在一定程度上反映了西江的 PFCs 污染现状<sup>[23]</sup>。

**2.4 水库群表层水中 PFCs 含量与水质参数的相关性**  
水库群表层水  $\sum$  PFCs 含量与水体透明度、水

温、pH 和溶解氧的线性相关分析结果显示,  $\sum$  PFCs 含量与水温呈显著正相关 ( $n = 50$ ,  $R^2 = 0.426$ ,  $P < 0.001$ ), 与溶解氧呈显著负相关 ( $n = 50$ ,  $R^2 = 0.201$ ,  $P < 0.001$ ), 而溶解氧又与 PFCA 物质呈显著负相关 ( $n = 50$ ,  $R^2 = 0.220$ ,  $P < 0.001$ ), 与溶解氧利于水中微生物降解 PFCA 物质<sup>[24,25]</sup>, 及水温与溶解氧呈反比<sup>[26]</sup> 的报道相符。为排除 2012 年 11 月与 2013 年 1 月间强降水的影响, 对两时间批次再分别进行相关分析, 发现表层水  $\sum$  PFCs 与水质参数的相关程度大幅下降, 仅 11 月表层水  $\sum$  PFCs ( $n = 25$ ,  $R^2 = 0.169$ ,  $P < 0.05$ ) 及其 PFCA 物质 ( $n = 25$ ,  $R^2 = 0.148$ ,  $P < 0.05$ ) 与水温呈正相关, 原因可能是冬季强降水对水温和水中  $\sum$  PFCs、PFOA 含量的综合影响, 削弱了水质参数与表层水  $\sum$  PFCs 的相关性, 反映了虽然水温等水质参数与  $\sum$  PFCs 含量有关, 但强降水的影响作用仍大于水质参数。另鉴于水库群各水网进水口地理位置及水系环境是影响水库表层水  $\sum$  PFCs 含量的第一要素, 故水库表层水  $\sum$  PFCs 含量受影响的强弱顺序为水系分布 > 强降水 > 水质参数。

### 3 结论

(1)深圳水库群 12 个水库表层水中均未检出 PFHxS 及碳链 $\geq 11$ 的长链 PFCs。检出的 PFCs 以中链为主, PFOA 为主要残留单体。水库群库区中心与取水口表层水  $\sum$  PFCs 未见显著性差异。

(2)强降水对水库表层水  $\sum$  PFCs 有稀释作用,同时可输入 PFOA。

(3)东深供水沿线水库表层水  $\sum$  PFCs 含量显著高于东部水网沿线水库 ( $P < 0.01$ ), 与供水工程进水口的地理位置及环境等因素有关。

(4)影响水库表层水  $\sum$  PFCs 含量的顺序为水系分布 > 强降水 > 水质参数。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 方雪梅, 王建设, 戴家银. 全氟类有机污染物的污染状况及其生态毒理研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, **25**(5): 543-551.
- [ 2 ] Nakayama S F, Strynar M J, Reiner J L, *et al.* Determination of perfluorinated compounds in the upper Mississippi River Basin [J]. Environmental Science and Technology, 2010, **44**(11): 4103-4109.
- [ 3 ] Wang T Y, Khim J S, Chen C L, *et al.* Perfluorinated compounds in surface waters from Northern China: Comparison to level of industrialization [J]. Environment International, 2012, **42**: 37-46.
- [ 4 ] Yang L P, Zhu L Y, Liu Z T. Occurrence and partition of perfluorinated compounds in water and sediment from Liao River and Taihu Lake [J]. Chemosphere, 2011, **83**(6): 806-814.
- [ 5 ] Zushi Y, Tamada M, Kanai Y, *et al.* Time trends of perfluorinated compounds from the sediment core of Tokyo Bay, Japan (1950s-2004) [J]. Environmental Pollution, 2010, **158**(3): 756-763.
- [ 6 ] Butt C M, Berger U, Bossi R, *et al.* Levels and trends of poly- and perfluorinated compounds in the arctic environment [J]. Science of the Total Environment, 2010, **408**(15): 2936-2965.
- [ 7 ] 杨永亮, 路国慧, 杨伟贤, 等. 沈阳地区水环境和生物样品中全氟化合物的污染分布特征[J]. 环境科学学报, 2010, **30**(10): 2097-2107.
- [ 8 ] 杨兰琴, 冯雷雨, 陈银广. 中国水环境中全氟化合物的污染水平及控制策略[J]. 化工进展, 2012, **31**(10): 2304-2312.
- [ 9 ] 金一和, 翟成, 舒为群, 等. 长江三峡库区江水和武汉地区地面水中 PFOS 和 PFOA 污染现状调查[J]. 生态环境, 2006, **15**(3): 486-489.
- [ 10 ] 宋之光, 鞠晓光, 林威, 等. 太平湾水库下泻水中全氟辛酸和全氟寅酸的液质联用方法测定[J]. 辽东学院学报(自然科学版), 2012, **19**(1): 14-17.
- [ 11 ] 金一和, 刘晓, 秦红梅, 等. 我国部分地区自来水和不同水体中的 PFOS 污染[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(2): 166-169.
- [ 12 ] Fromme H, Tittlemier S A, Volkel W, *et al.* Perfluorinated compounds – Exposure assessment for the general population in western countries [J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health, 2009, **212**(3): 239-270.
- [ 13 ] 陈清武, 张鸿, 柴之芳, 等. 深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律[J]. 环境科学, 2012, **33**(6): 1795-1800.
- [ 14 ] SL 219-1998, 水环境监测规范[S].
- [ 15 ] Dimitrov S, Walker J D, Kamenska V, *et al.* Predicting the biodegradation products of perfluorinated chemicals using CATABOL [J]. SAR and QSAR in Environmental Research, 2004, **15**(1): 69-82.
- [ 16 ] Wang N, Buck R C, Szostek B, *et al.* Fluorotelomer alcohol biodegradation direct evidence that perfluorinated carbon chains breakdown [J]. Environmental Science and Technology, 2005, **39**(19): 7516-7528.
- [ 17 ] Park H. Photolysis of aqueous perfluorooctanoate and perfluorooctane sulfonate [J]. Revue Roumaine DE Chimie, 2010, **55**(10): 611-619.
- [ 18 ] Zhao L J, Zhou M, Zhang T, *et al.* Polyfluorinated and Perfluorinated chemicals in precipitation and runoff from cities across eastern and central China [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2013, **64**(2): 198-207.
- [ 19 ] [http://www.sz.gov.cn/shuiwj/tjsj/zxtjxx/200810/t20081007\\_85172.htm](http://www.sz.gov.cn/shuiwj/tjsj/zxtjxx/200810/t20081007_85172.htm)
- [ 20 ] <http://www.szmb.gov.cn/article/QiHouYeWu/qhgcygp/JianCeGongBao/index.html>
- [ 21 ] [http://www.szwrb.gov.cn/cn/zwgk\\_show.asp?id=19016](http://www.szwrb.gov.cn/cn/zwgk_show.asp?id=19016)
- [ 22 ] 梅胜放. 我国 PFOS/PFOA 的生产、应用以及国内外标准现状[J]. 有机氟工业, 2008, (1): 21-25.
- [ 23 ] 李祥平, 齐剑英, 陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步研究[J]. 环境科学学报, 2011, **31**(3): 547-553.
- [ 24 ] 赵开弘. 环境微生物学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2009. 225.
- [ 25 ] 吴敏, 周钰明, 薛静, 等. 含氟有机化合物优势降解菌的筛选[J]. 江苏环境科技, 2003, **16**(1): 30-32.
- [ 26 ] 谢协忠. 水分析化学[M]. 北京: 中国电力出版社, 2007. 7-8.

## CONTENTS

Comparative Analysis on Meteorological Condition for Persistent Haze Cases in Summer and Winter in Beijing .....	LIAO Xiao-nong, ZHANG Xiao-ling, WANG Ying-chun, <i>et al.</i> (2031)
Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Fukang .....	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Yue-si, <i>et al.</i> (2045)
Study on Transition Metals in Airborne Particulate Matter in Shanghai City's Subway .....	BAO Liang-man, LEI Qian-tao, TAN Ming-guang, <i>et al.</i> (2052)
Heavy Metal Concentrations in Mosses from Qiyi Glacier Region .....	MA Juan-juan, LI Zhen (2060)
Distributions of Dimethylsulfide and Dimethylsulfoniopropionate and Influencing Factors in the East China Sea and the Southern Yellow Sea During the Winter .....	SONG Yi-zhu, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (2067)
Pollution by Heavy Metals in the Petrochemical Sewage Waters of the Sea Area of Daya Bay and Assessment on Potential Ecological Risks .....	XU Shan-nan, LI Chun-hou, XU Jiao-jiao, <i>et al.</i> (2075)
Distribution of Perfluorinated Compounds in Surface Water of Shenzhen Reservoir Groups .....	WANG Xin-xuan, ZHANG Hong, HE Long, <i>et al.</i> (2085)
Contamination and Source of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Epikarst Spring Water .....	SUN Yu-chuan, SHEN Li-cheng, YUAN Dao-xian (2091)
Biogeochemical Processes of the Major Ions and Dissolved Inorganic Carbon in the Guijiang River .....	TANG Wen-kui, TAO Zhen, GAO Quan-zhou, <i>et al.</i> (2099)
Hydrologic Processes of the Different Landscape Zones in Fenhe River Headwater Catchment .....	YANG Yong-gang, LI Cai-mei, QIN Zuo-dong, <i>et al.</i> (2108)
Assessment of Groundwater Quality of Different Aquifers in Tongzhou Area in Beijing Plain and Its Chemical Characteristics Analysis .....	GUO Gao-xuan, JU Yi-wen, ZHAI Hang, <i>et al.</i> (2114)
Models for Quantification of Fluid Saturation in Two-Phase Flow System by Light Transmission Method and Its Application .....	ZHANG Yan-hong, YE Shu-jun, WU Ji-chun (2120)
Nitrogen Leaching and Associated Environmental Health Effect in Sloping Cropland of Purple Soil .....	CHEN Wei-liang, GAO Yang, LIN Yong-ming, <i>et al.</i> (2129)
Research on Land Use Structure Optimization Based on Nonpoint Source Dissolved Nitrogen Load Estimation in Shuashui Watershed .....	LU Yu-chao, BI Meng-fei, LI Ze-li, <i>et al.</i> (2139)
Nitrogen and Organic Matter Vertical Distribution Characteristics and Evaluation in Ancient Canal Sediments of Zhenjiang Old Town .....	ZHOU Xiao-hong, LI Yi-min, ZHOU Yi, <i>et al.</i> (2148)
Effects of Two Submerged Macrophytes on Dissolved Inorganic Nitrogen in Overlying Water and Interstitial Water .....	YANG Wen-bin, LI Yang, SUN Gong-xian (2156)
Bioavailable Phosphorus on Suspended Solids of Lake Under Short-term and Repeated Sediment Disturbance .....	WU Xiao-fei, LI Da-peng (2164)
Influence of Different Disturbance Intensity on the Phosphorus Adsorption and Immobilization by the Sediments from an Inner City Heavily Polluted Canal .....	WANG Shang, LI Da-peng (2171)
Effect of Feed Residues on the Release of Nitrogen and Phosphorus of Pond Sediment .....	LÜ Yuan-jiao, LI Rui-jiao, ZHANG Nian, <i>et al.</i> (2178)
Delivery and Release of Sediment PAHs During Resuspension .....	WANG Xiao-hui, BI Chun-juan, HAN Jing-chao (2185)
Effects of Low Molecular Weight Organic Acids on Redox Reactions of Mercury .....	ZHAO Shi-bo, SUN Rong-guo, WANG Ding-yong, <i>et al.</i> (2193)
Removal of Fluorescent Whitening Agent by Hydrogen Peroxide Oxidation Catalyzed by Activated Carbon .....	LIU Hai-long, ZHANG Zhong-min, ZHAO Xia, <i>et al.</i> (2201)
Kinetics of Alkylphenols Degradation in Aqueous Phase with Excilamp Irradiation .....	LIU Yu-hai, YE Zhao-lian, WEN Ying-pin, <i>et al.</i> (2209)
AF + BAF for Treating Effluent in the Sewage Plant of the Resin and Chemical Industry Park .....	TU Yong, LIU Wei-jing, ZHANG Yao-hui, <i>et al.</i> (2216)
Synthesis and Adsorption Property of Cd(II)-8-hydroxyquinoline Molecularly Imprinted Polymer Microspheres .....	YANG Chun-yan, CHEN Fu-bin, ZHAO Hui, <i>et al.</i> (2223)
Simultaneous Nitrification and Denitrification in a Microbubble-aerated Biofilm Reactor .....	LIU Chun, NIAN Yong-jia, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2230)
Effect of PLA/Starch Slow-Release Carbon Source on Biological Denitrification .....	TANG Dan-qi, WANG Juan, ZHENG Tian-long, <i>et al.</i> (2236)
Impacts of Filamentous Bulking on Treatment Effect and Fouling Characteristics of Nonwoven Bioreactor .....	SHI Kuan, XUE Gang, GAO Pin, <i>et al.</i> (2241)
Optimization for Phosphorous Removal in Thickening and Dewatering Sludge Water by Polyaluminum Chloride .....	ZHOU Zhen, HU Da-long, QIAO Wei-min, <i>et al.</i> (2249)
Simulation of Long-Range Transport Potential of POPs in Poyang Lake .....	GONG Xiao-feng, XIANG Hong-rui, CHEN Chun-li, <i>et al.</i> (2256)
Uncertainty Analysis of Ecological Risk Assessment Caused by Heavy-metals Deposition from MSWI Emission .....	LIAO Zhi-heng, SUN Jia-ren, WU Dui, <i>et al.</i> (2264)
Risk Assessment and Countermeasures of BTEX Contamination in Soils of Typical Pesticide Factory .....	TAN Bing, WANG Tie-yu, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (2272)
Levels Distribution and Risk Assessment of the Indicator and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Ten Different Species of Marine Fish of Bohai Bay, China .....	WANG Sha-sha, GAO Li-rong, TIAN Yi-ling, <i>et al.</i> (2281)
Detection of Biohazardous Materials in Water upon the Characteristics of Fluorescent Sensor Flex .....	ZHAO Wei, WANG Zhao, CAI Qiang, <i>et al.</i> (2287)
Generation and Release of Microcystin-LR by <i>Microcystis aeruginosa</i> Under Hydroquinone Inhibition .....	ZHANG Yuan-chun, LIANG Wen-yan, ZHAO Yuan, <i>et al.</i> (2294)
Culture Medium Based on Biogas Slurry and Breeding of Oil Chlorella .....	ZHAO Feng-min, MEI Shuai, CAO You-fu, <i>et al.</i> (2300)
Microbial Diversity and Ammonia-Oxidizing Microorganism of a Soil Sample Near an Acid Mine Drainage Lake .....	LIU Ying, WANG Li-hua, HAO Chun-bo, <i>et al.</i> (2305)
Effects of <i>Corbicula fluminea</i> Bioturbation on the Community Composition and Abundance of Ammonia-Oxidizing Archaea and Bacteria in Surface Sediments .....	WANG Xue, ZHAO Da-yong, ZENG Jin, <i>et al.</i> (2314)
Methanogenic Activity and Methanogen Diversity in Marine Gas Field Sediments .....	TIAN Qi, WANG Jia, FAN Xiao-lei, <i>et al.</i> (2322)
Effect of the Potential on Bacterial Community Under Illumination by DGGE and T-RFLP .....	WU Yi-cheng, DENG Huan, XIAO Yong, <i>et al.</i> (2328)
Isolation and Characterization of Two Bacteria with Heavy Metal Resistance and Phosphate Solubilizing Capability .....	TIAN Jiang, PENG Xia-wei, LI Xia, <i>et al.</i> (2334)
Identification and Denitrification Characteristics of a Psychrotolerant Facultative Basophilic Aerobic Denitrifier .....	WANG Zhao-yang, CHEN Guo-yao, JIANG Ke, <i>et al.</i> (2341)
Effects of Ryegrass and Arbuscular Mycorrhiza on Activities of Antioxidant Enzymes, Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Different Varieties of Tomato .....	JIANG Ling, YANG Yun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (2349)
Response of Active Nitrogen to Salinity in a Soil from the Yellow River Delta .....	LI Ling, QIU Shao-jun, CHEN Yin-ping, <i>et al.</i> (2358)
Variation of Soil Nitrogen During <i>in situ</i> Mineralization Process Under Different Grasslands in the Mountainous Area of Southern Ningxia, Northwest China .....	JIANG Yue-li, ZHAO Tong, YAN Hao, <i>et al.</i> (2365)
Effects of Long-Term Application of Pig Manure Containing Residual Tetracycline on the Formation of Drug-Resistant Bacteria and Resistance Genes .....	ZHANG Jun, YANG Xiao-hong, GE Feng, <i>et al.</i> (2374)
Long-Term Effects of Tillage Methods on Heavy Metal Accumulation and Availability in Purple Paddy Soil .....	CHANG Tong-ju, CUI Xiao-qiang, RUAN Zhen, <i>et al.</i> (2381)
Environmental Geochemical Baseline of Heavy Metals in Soils of the Ili River Basin and Pollution Evaluation .....	ZHAO Xin-ru, Telajin Nasier, CHENG Yong-yi, <i>et al.</i> (2392)
Distribution Patterns and Pollution Assessments of Heavy Metals in the <i>Spartina alterniflora</i> Salt-Marsh Wetland of Rudong, Jiangsu Province .....	ZHANG Long-hui, DU Yong-fen, WANG Dan-dan, <i>et al.</i> (2401)
Temporal-Spatial Distribution of Agricultural Diffuse Nitrogen Pollution and Relationship with Soil Respiration and Nitrification .....	OUYANG Wei, CAI Guan-qing, HUANG Hao-bo, <i>et al.</i> (2411)
Soil Respiration and Carbon Balance in Wheat Field Under Conservation Tillage .....	ZHANG Sai, WANG Long-chang, HUANG Zhao-cun, <i>et al.</i> (2419)
Comparison of Soil Respiration in Natural <i>Castanopsis carlesii</i> Forest and Plantation Forest .....	WU Jun-jun, YANG Zhi-jie, WENG Fa-jin, <i>et al.</i> (2426)
Influences of Hydraulic Retention Time on the Ethanol Type Fermentation Hydrogen Production System in a Hybrid Anaerobic Baffled Reactor .....	LIU Xiao-ye, ZHANG Hong, LI Yong-feng (2433)

# 《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6月15日 第35卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 35 No. 6 Jun. 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