

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲, 许其功, 席北斗, 李小平, 杨柳燕, 江立文, 魏自民, 吴献花 (1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好, 陈利顶, 王伟, 王赵明 (1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云, 于兴修, 泮雪芹 (1789)
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	陈清武, 张鸿, 柴之芳, 沈金灿, 杨波 (1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永, 邱孟德, 孙国萍, 郭俊, 张宏涛, 张琴, 许玫英 (1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平, 王少冰, 朱新平, 陈昆慈, 潘德博, 洪孝友, 尹怡 (1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹, 臧淑英, 叶华香, 孙丽, 贾晓丹, 李苗 (1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚, 乔永民 (1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟, 朱旭宇, 曾江宁, 寿鹿, 陈全震, 江志兵 (1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国, 林景宏, 王春光, 林茂 (1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋, 李耀初, 黄晋沐, 南燕, 林茂宏 (1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文, 王圣瑞, 闫振广, 张普青 (1852)
五氯酚对稀有鮑姆卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力, 马永鹏, 张晓峥, 金帮明, 李伟, 苏永良, 毛思予, 刘堰 (1858)
全氟辛烷磺酸 (PFOS) 对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳, 崔媛, 党志超, 谢文平, 李海山, 殷缓缓, 陈会明 (1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚, 袁田, 周顺桂, 袁勇, 庄莉, 王辉亮 (1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建, 高金华, 常江 (1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣, 高欣玉, 郭本华, 包南, 谢慧君, 梁爽 (1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳, 李鑫, 胡洪管, 于茵, 巫寅虎 (1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰, 董文艺, 刘莉莎, 韩贵超 (1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍, 李泽兵, 马家轩, 王晓毅, 赵白航, 李军 (1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华, 杨帆, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华, 吴军, 李胜, 谢磊, 王晓昌 (1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环, 周兴求, 伍健东 (1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思, 王素兰, 李瑞, 邢传宏 (1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀, 濮文虹, 时亚飞, 于文华, 樊明明, 刘欢, 杨昌柱, 李野, 杨家宽 (1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞, 张明军, 王圣杰, 赵爱芳, 马潜 (1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨, 朱彬, 苏继峰, 王红磊 (1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟, 高佳琪, 曹罡, 欧阳峰 (1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生, 邝元成, 刘欣, 戴飞鸿 (1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣, 杨志琴 (1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平, 陈竞翱, 徐明亮, 艾平, 张衍林 (1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科, 江长胜, 郝庆菊, 唐其文, 程炳红, 李辉, 陈璐豪 (1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先, 师日鹏, 李娜, 韩坤, 李会科, 王林权 (1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青, 史淳星, 石坤, 言儒斌, 蒋静艳, 吴以中 (1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤, 魏文侠, 田亚静, 吴广龙, 李培中, 赵丹 (2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥, 康荣华, 余德祥, 谭炳全, 段雷 (2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟, 朱章雄, 傅瓦利, 文志林 (2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔, 陈益泰, 王树凤, 李江川 (2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云, 黄姗姗, 钟国锋, 徐刚标, 刘志祥, 申响保 (2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香, 田启建, 梁士楚, 周耀渝, 邹慧成 (2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠, 刁晓君, 王曙光, 王鹏腾, 李攀峰 (2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳, 赵宏, 王建龙 (2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇, 史青, Montcho Leon Monthero, 丁嫚, 温东辉 (2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬, 卢滇楠, 刘铮 (2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟, 陈同斌, 吴基良, 雷梅, 田辉, 祖文普, 钟学斌 (2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳, 文晓刚, 万梅, 刘锐, 陈吕军, 张永明 (2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江, 王鑫, 刘免, 吴真, 杨连珍, 夏四清 (2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武, 何苗, 施汉昌 (2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐, 严建华, 杜长明, 陆胜勇, 李晓东 (2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟, 刘红梅, 陆胜勇, 严建华, 李晓东 (2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇, 刘丹, 李启彬 (2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰, 彭漫, 于燕, 何亚婷, 傅金祥, 赵玉华 (2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健, 廖洪凯, 李娟, 陈彩云 (2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操, 张妍, 刘春兰, 王海华, 李铮 (2139)
《环境科学》征稿简则 (1877)	《环境科学》征订启事 (1890)
信息 (1822, 1857, 1896, 2138)	

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

陈清武¹, 张鸿^{2*}, 柴之芳³, 沈金灿⁴, 杨波⁵

(1. 深圳大学生命科学学院, 深圳 518060; 2. 深圳大学物理科学与技术学院, 深圳 518060; 3. 中国科学院高能物理研究所, 北京 100049; 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. 深圳大学化学与化工学院, 深圳 518060)

摘要: 为探究深圳市沿海岸表层海水中全氟化合物(perfluorinated chemicals, PFCs)的残留特征及其分布规律, 应用固相萃取分离、富集与高效液相色谱-质谱联用相结合的方法, 研究了深圳市沿海岸 18 处表层海水中 15 种 PFCs 的残留特征、分布规律及其成因。结果表明, 深圳沿海岸表层海水中 PFCs 总的残留水平($\sum$ PFCs)受人类活动影响显著, 位于珠江和东宝河入海口下方的西部沿岸表层海水中 PFCs 残留显著高于开发程度轻、人口稀疏的东部沿岸($P < 0.05$); 而自然条件下, 表层海水中 $\sum$ PFCs 残留呈湾内高于湾外的规律。沿海岸表层海水中 PFCs 的主要残留种态为中、短链的全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全氟辛酸、全氟己酸和全氟戊酸, 其相似的环境行为($P < 0.05$, $P < 0.01$)可能与 PFCs 相关产品的生产过程有关; 聚类分析结果进一步显示, PFOS($R^2 = 0.4092$)残留可作为评价深圳沿海岸表层海水中 PFCs 污染状况的典型参数。

关键词: 全氟化合物; 全氟辛烷磺酸; 全氟辛酸; 表层海水; 高效液相色谱-质谱

中图分类号: X55; X834 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2012)06-1795-06

Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline

CHEN Qing-wu¹, ZHANG Hong², CHAI Zhi-fang³, SHEN Jin-can⁴, YANG Bo⁵

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

Abstract: In order to explore the residue characteristics and distributions of 15 perfluorinated compounds (PFCs) in 18 surface seawater samples along Shenzhen coastline, high performance liquid chromatography-tandem mass spectrometry (HPLC-MS/MS) combined with solid phase extraction enrichment was applied in this research. The results indicated that residue level of PFCs in coastal surface seawater samples was significantly affected by human activities. $\sum$ PFCs residue levels in surface seawater from Shenzhen west coast, which locates below the estuary of Pearl River and Dongbao River, are much higher than those from the east coast, which has low development and sparse population ($P < 0.05$). Under natural conditions, $\sum$ PFCs residue levels in coastal surface seawater samples from Shenzhen Bays are higher than those out of bays. The major residue species in surface seawater samples along Shenzhen coast were medium- and short-chain PFCs, including perfluorooctane sulfonate (PFOS), perfluorooctanoic acid (PFOA), perfluorohexanoic acid and perfluoropentanoic acid. Their similar environmental behavior ($P < 0.05$, $P < 0.01$) is likely associated with the production process of PFCs-related products. Furthermore, cluster analysis results show that PFOS ($R^2 = 0.4092$) level can be used as a representative parameter for evaluating PFCs contamination status in surface seawater along Shenzhen coast.

Key words: perfluorinated chemicals (PFCs); perfluorooctane sulfonate (PFOS); perfluorooctanoic acid (PFOA); surface seawater; HPLC-MS/MS

全氟化合物(perfluorinated chemicals, PFCs)如全氟辛烷磺酸(perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全氟辛酸(perfluorooctanoic acid, PFOA)等, 因具有疏水疏油等优良的表面活性特点被广泛应用于工农业生产领域长达 50 余年, 造成了自然生态环境中 PFCs 的大范围残留^[1, 2]。随着 PFCs 毒性、危害的日益清晰, 特别是 PFOS 及其磺酸盐突显的环境持久

性、高生物蓄积性、毒性和远距离传输特性, 使包括 PFOS 及其磺酸盐、全氟辛烷磺酰氟(perfluorooctane sulfonyl fluoride, PFOSF)在内的 9 种严重危害人类

收稿日期: 2011-08-30; 修订日期: 2011-11-15

基金项目: 国家自然科学基金项目(10975101, 21177089)

作者简介: 陈清武(1987~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为环境持久性有机氟污染物, E-mail: chenqingwusi@163.com

* 通讯联系人, E-mail: zhangh@szu.edu.cn

健康和自然环境的新持久性有机污染物 (persistent organic pollutants, POPs) 于 2009 年 5 月增列入 POPs 黑名单,并于 2010 年 8 月 26 日正式生效^[3],将人们对环境中 PFCs 的监测及其风险评估引向了一个新的高度。

PFOS 和 PFOA 因具有一定的水溶解度、解离度和很强的表面活性,较易蓄积于水体中^[4,5],而水体中的 PFCs 最终将随地球水循环汇入大海,故海洋是 PFCs 污染物的重要受体,更是 PFCs 研究的关键领域^[6]. 深圳市位于珠江入海口东岸,与广州一江之隔,与香港隔海相望,本研究将 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) 相结合分析了采自深圳市沿海 18 处表层海水中 15 种 PFCs 的残留水平及其分布特征,并对 PFCs 的来源进行了探讨,旨在为珠三角地区 PFCs 的来源、迁移途径、污染控制以及深圳市沿海居民 PFCs 暴露风险评估等相关研究提供参考数据。

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). 固相萃取为 12 管真空萃取装置 (美国 BESEP 公司),使用 Polymer WAX (150 mg, 6 cc) 固相萃取柱 (美国 Chrom-Matrix 公司). PFCs 标样 ($2000 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$) 购自加拿大 Wellington 公司, 15 种 PFCs 混合外标包括全氟己烷磺酸 (perfluorohexane sulfonate, PFHxS)、全氟辛烷磺酸 (perfluorooctane sulfonate, PFOS)、全氟癸烷磺酸 (perfluorodecane sulfonate, PFDS)、全氟戊酸 (perfluoropentanoic acid,

PFPeA)、全氟己酸 (perfluorohexanoic acid, PFHxA)、全氟庚酸 (perfluoroheptanoic acid, PFHpA)、全氟辛酸 (perfluorooctanoic acid, PFOA)、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)、全氟十三酸 (perfluorotridecanoic acid, PFTTrDA)、全氟十四酸 (Perfluorotetradecanoic acid, PFTeDA)、全氟十六酸 (Perfluorohexadecanoic acid, PFHxDA) 和全氟十八酸 (Perfluorooctadecanoic acid, PFODA) 用甲醇逐级稀释为 5、10、20、40、60 $\text{ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 共 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,- $^{13}\text{C}_2$] hexanoic acid (MPFHxA)、perfluoro- n -[1,2,3,4,- $^{13}\text{C}_4$] octanoic acid (MPFOA)、perfluoro- n -[1,2,3,4,5,- $^{13}\text{C}_5$] nonanoic acid (MPFNA)、perfluoro- n -[1,2,- $^{13}\text{C}_2$] decanoic acid (MPFDA)、perfluoro- n -[1,2,- $^{13}\text{C}_2$] undecanoic acid (MPFUDA)、perfluoro- n -[1,2,- $^{13}\text{C}_2$] dodecanoic acid (MPFDoA)、sodium perfluoro-1-hexane [$^{18}\text{O}_2$] sulfonate (MPFHxS) 和 sodium perfluoro-1-[1,2,3,4,- $^{13}\text{C}_4$] octanesulfonate (MPFOS) 用甲醇稀释至 $200 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 标液,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 $18.2 \text{ M}\Omega \cdot \text{cm}$ 的超纯水。

1.2 样品采集与前处理

2010 年 11 月沿深圳市海岸采集了 18 处表层海水 (图 1), 离岸约 3 m, 使用 500 mL 聚丙烯烧杯采集距海平面 15 cm 以内的表层海水 (含微表层海

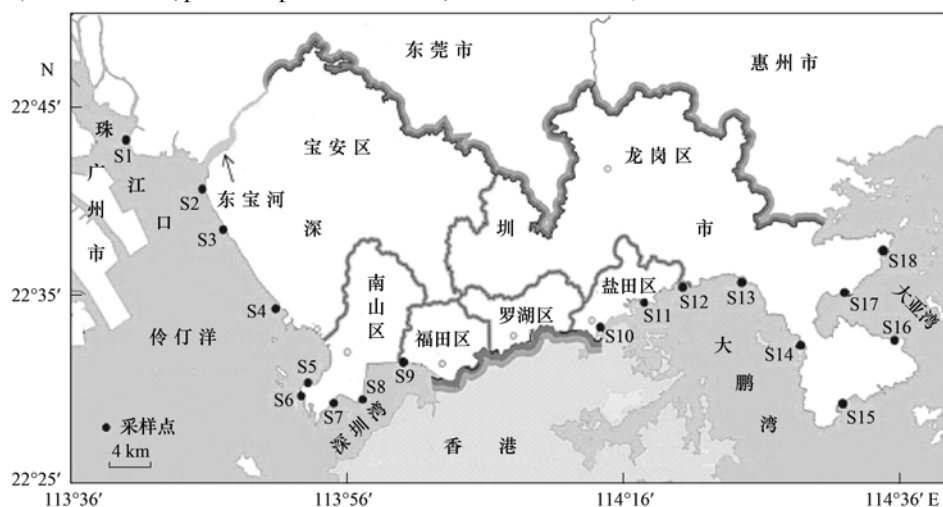


图 1 深圳市沿海表层海水采样点分布示意

Fig. 1 Distribution of surface seawater sampling sites along Shenzhen coast

水),每处采集约2 000 mL,装入聚丙烯广口瓶.带回实验室的海水样品立刻经 0.45 μm 聚酰胺纤维滤膜过滤,容量瓶准确量取1 000 mL 滤后的海水,加入 25 μL 200 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 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 $\cdot\text{s}^{-1}$,流干后,先后用 2 mL 2% 甲酸水溶液、2 mL 2% 甲酸水溶液:甲醇(1:1)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 2 mL 样品瓶,待 HPLC-MS/MS 分析.

1.3 分析

HPLC 分析:色谱柱为 Agilent Eclipse XDB C18 (3.5 μm , 2.1 mm $\times$ 150 mm),进样体积 20 μL . 在 50 $^{\circ}\text{C}$ 柱温, 0.3 $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ 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 API3000 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 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 雾化气流速、9.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 气帘气流速、5.0 $\text{L}\cdot\text{min}^{-1}$ 辅助气流速和 450 $^{\circ}\text{C}$ 离子源温度下,内标法定量(表 1).

表 1 目标化合物及内标物的质谱参数

Table 1 MS parameters of target compounds and internal standards				
化合物	母离子	子离子	解簇电压 /V	碰撞能量 /eV
PFPeA	263	219	-60	-20
PFHxA	313	269	-70	-20
MPFHxA	315	270	-70	-20
PFOA	413	369	-70	-25
PFOA	413	169	-70	-25
MPFOA	417	372	-60	-25
PFNA	463	419	-70	-20
PFNA	463	169	-70	-35
MPFNA	468	423	-70	-20
PFDA	513	469	-70	-20
MPFDA	515	470	-70	-20
PFUdA	563	519	-60	-15
MPFUdA	565	520	-60	-15
PFDoA	613	569	-60	-23
MPFDoA	615	570	-60	-23
PFHxDA	813	769	-60	-30
PFODA	913	869	-60	-30
PFHxS	399	80	-130	-75
PFHxS	399	99	-130	-52
MPFHxS	403	103	-130	-52
PFOS	499	80	-180	-100
PFOS	499	99	-180	-70
MPFOS	503	99	-180	-52
PFDS	599	99	-70	-42

1.4 质量控制与保证

实验中所用器皿均采用聚丙烯材质,使用前先经甲醇淋洗.为控制样品前处理过程可能带来的外源性污染,进行全程空白实验.空白基质为 18.2 $\text{M}\Omega\cdot\text{cm}$ 的超纯水,只检出 PFOS (浓度 0.046 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),所有实验结果均为扣除空白基质后的数据.15 种 PFCs 在 5 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 浓度水平的加标回收率范围为 71.2% ~ 128%,变异系数范围为 3.8% ~ 16%,符合美国 EPA 的要求(回收率范围 100% $\pm$ 40%).15 种 PFCs 在 5 ~ 60 $\text{ng}\cdot\text{mL}^{-1}$ 浓度范围的线性相关系数(r^2) 在 0.990 7 ~ 0.999 7 之间,检测限范围为 0.01 ~ 0.65 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,满足分析要求.

2 结果与讨论

2.1 深圳市沿海岸表层海水中 PFCs 的残留特征

深圳沿海岸 18 处表层海水中 PFCs 残留水平和检出率结果(表 2)显示,表层海水样品中除 PFHpA、PFTrDA 和 PFTeDA 3 种 PFCs 未检出外,其它 12 种 PFCs 的检出率(%) 呈 PFOS = PFPeA (100) > PFOA = PFHxA (94) > PFDoA (78) > PFDA (67) > PFUdA (61) > PFODA = PFDS (33) > PFNA = PFHxS (17) > PFHxDA (6) 的顺序.检出的 PFCs 依碳链长短分为短链($C\leq 6$)、中链($7\leq C\leq 10$)和长链($C\geq 11$)3 类,表层海水样品中 PFCs 残留水平则呈中链 >> 短链 >> 长链的分布(图 2),其中 PFOS 占 $\sum$ PFCs 的 45% ~ 67%,PFOA、PFHxA、PFPeA 之和占 $\sum$ PFCs 的 26% ~ 53%(图 3),显示中、短链的 PFOS、PFOA、PFHxA 和 PFPeA 为深圳沿海岸表层海水中 PFCs 的主要残留种态,而 PFOS 残留又 >> PFOA 或 PFHxA 或 PFPeA,是深圳沿海岸表层海水中最主要残留种态. Hierarchical 聚类分析结果显示,PFOS 的 R^2 值最高,为 0.409 2,进一步表明 PFOS 残留可作为评价深圳沿海岸表层海水中 PFCs 污染状况的典型参数.这些结果与珠江广州段的水体 (PFOS: 0.9 ~ 99 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; PFOA: 0.85 ~ 13 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[7]、河流沉积物 (PFOS: 0.58 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$; PFOA: 0.21 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)^[8] 以及珠三角区域自来水中 (深圳:PFOS 为 11 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOA 为 1.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 香港:PFOS 为 7.0 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOA 为 1.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$; 澳门:PFOS 为 6.2 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$,PFOA 为 1.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) PFOS 残留均显著高于 PFOA 的研究结果^[9] 相符.由于 PFOS 和 PFOA 具有非常稳定的化学性质,是多数 PFCs 的最终降解产物^[10],加之 PFOS、PFOA 较其它

表 2 深圳沿岸表层海水中 PFCs 检出率与残留水平/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 2 Detection rate and residue levels of PFCs in surface seawater samples along Shenzhen coast/ng·L ⁻¹														
点位	短链(C≤6)			中链(7≤C≤10)					长链(C≥11)				∑ PFCs	
	PFHxS	PFPeA	PFHxA	PFOS	PFDS	PFOA	PFNA	PFDA	PFUdA	PFDoA	PFHxDA	PFODA		
西部 沿岸	S1	nd ¹⁾	1.3	0.77	8.6	0.055	3.0	0.12	0.29	0.067	0.015	nd	0.66	15
	S2	0.21	12	1.4	37	0.94	6.7	0.50	1.4	0.69	0.23	nd	0.49	62
	S3	nd	1.2	1.1	6.6	nd	3.9	nd	0.13	nd	nd	nd	nd	13
	S4	nd	3.5	0.78	8.0	0.57	3.5	nd	0.18	0.10	0.078	nd	0.21	17
	S5	0.059	1.6	1.7	5.8	nd	2.0	nd	0.03	0.011	0.094	nd	0.21	12
	S6	nd	0.34	1.8	5.6	0.047	2.0	nd	0.24	0.050	0.087	nd	0.11	10
	S7	nd	1.0	1.5	3.9	nd	1.2	nd	0.25	nd	0.014	nd	nd	7.9
	S8	nd	0.28	1.9	5.4	nd	2.7	nd	0.10	0.037	0.017	nd	nd	10
	S9	0.063	0.60	0.83	5.9	nd	3.6	0.091	0.38	0.047	0.043	nd	nd	12
东部 沿岸	S10	nd	1.2	0.75	3.4	0.045	1.1	nd	0.21	0.015	0.093	nd	nd	6.8
	S11	nd	0.36	0.59	2.8	0.095	0.075	nd	0.078	0.020	nd	nd	nd	4.0
	S12	nd	0.50	0.67	2.4	nd	nd	nd	nd	nd	0.052	0.099	nd	3.7
	S13	nd	0.36	0.63	2.4	nd	0.80	nd	nd	nd	0.066	nd	nd	4.2
	S14	nd	0.10	0.57	2.3	nd	0.78	nd	0.021	nd	nd	nd	nd	3.8
	S15	nd	0.074	0.85	2.6	nd	0.87	nd	nd	nd	0.047	nd	nd	4.4
	S16	nd	0.041	0.81	2.4	nd	0.32	nd	nd	nd	nd	nd	nd	3.6
	S17	nd	1.3	nd	2.8	nd	2.0	nd	nd	0.058	0.074	nd	nd	6.2
	S18	nd	0.78	0.56	2.6	nd	0.24	nd	nd	0.025	0.036	nd	nd	4.2
检出率/%	17	100	94	100	33	94	17	67	61	78	6	33		

1) nd 表示未检出

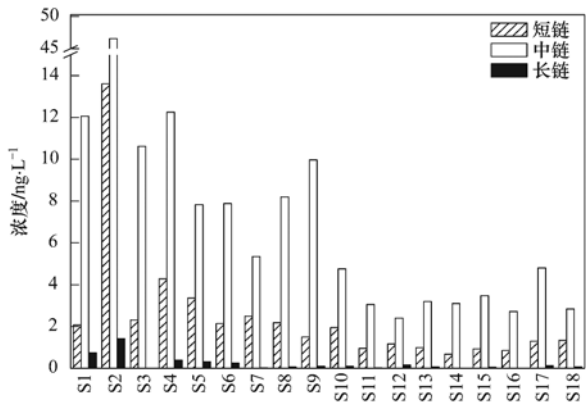


图 2 深圳沿海岸 18 处表层海水中短链($C\leq 6$)、中链($7\leq C\leq 10$)、长链($C\geq 11$)PFCs 的残留分布

Fig. 2 Residue distribution of short-, medium-and long-chain PFCs in 18 surface seawater samples along Shenzhen coast

中、长链同类的 PFCs 具有相对较高的水溶解性和较低的蒸气压^[11],使其成为水体中最典型的 PFCs 残留种态.

深圳沿岸表层海水中 PFOS 残留水平($2.3\sim 37\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)略低于日本东京湾($0.338\sim 57.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12]沿海岸表层海水,远高于大连($<0.10\sim 2.25\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[13]、香港($0.09\sim 3.1\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12]和韩国($0.039\sim 2.53\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12]的同类样品;PFOA 残留水平($0.075\sim 6.7\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)则显著低于大连($0.17\sim 37.55\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[13]和日本东京湾($1.8\sim 192\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12],低于韩国($0.239\sim 11.35\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)^[12],

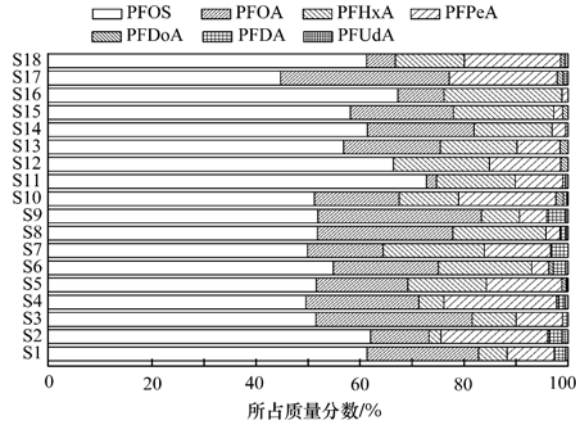


图 3 深圳沿海岸 18 处表层海水中 7 种主要 PFCs(检出率 $>50\%$)的组成

Fig. 3 Percentage compositions of seven main PFCs species in 18 surface seawater samples along Shenzhen coast

与香港($0.73\sim 5.5\text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)相当^[14].造成不同地域沿海岸表层海水中 PFOS、PFOA 残留差异的原因与采样位点的地理位置、不同地域经济发展水平、产业密集程度等有关.如 S2 位点地处珠江和东宝河入海口交汇处,其 PFOS 残留为其它采样点的 $4.3\sim 16$ 倍.大连船舶制造厂附近表层海水中 PFOA 残留为其它采样点的 $2.2\sim 221$ 倍^[13].日本东京湾工业区附近表层海水中 PFOA 残留更高达其它采样点的 $1.2\sim 107$ 倍^[12].由于 PFOS 和 PFOA 在不同产业中使用与排放的数量不同,沿海岸表层海水中 PFOS、PFOA 残留还受地域产业结构组成的影响.

2.2 深圳市沿海岸表层海水中 PFCs 残留的分布规律

深圳沿岸 18 处表层海水中 PFCs 残留水平显示, $\sum$ PFCs 以及主要残留种态 PFOS、PFOA 和 PFPeA 的峰值均出现在 S2 位点,同时,表层海水中 $\sum$ PFCs 残留呈西部沿岸(S1 ~ S9)显著高于东部沿岸(S10 ~ S18) ($P < 0.05$),湾内高于湾外(表 2, S9 高于 S8 和 S7; S17 高于 S18 和 S16)的分布规律. 究其原因,主要因为:①S2 位于珠江和东宝河入海口交汇处(图 1),珠江流经广州入海,是我国排放 PFOS 的主要河流,排放通量约为 $4.47 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{a}^{-1}$ [15]. 东宝河则属东莞、深圳各管一岸的跨界管理河流,是两市工农业和生活污水的重要排放渠道,污染问题突出. 尽管开阔海域微表层海水富集 PFOA 的系数随盐度的增加而增加 [16],而河流入海口附近表层海水中盐度显著低于外海 [17],但由于水体是环境中 PFCs 污染物最主要受体 [4],工业废水是水体中 PFCs 最重要的污染源,加之废水处理并不能降低其中 PFOS、PFOA 等 PFCs 残留水平 [18],故源自广州、东莞、深圳及珠江和东宝河上游的 PFCs 沿珠江、东宝河顺流而下,在入海口交汇处集中释放,受其影响,致使 S2 位点 PFCs 残留显著高企;②深圳西部沿岸位于珠江和东宝河入海口下方,受上游珠江和东宝河 PFCs 污染的影响,加之深圳市的工农业生产、城市化和人口主要集中于西部沿岸,相对于西部沿岸,东部沿岸多为尚未开发的自然山地,人口稀疏,这是造成西部沿岸表层海水中 $\sum$ PFCs 残留显著高于东部沿岸的原因;③在人类活动干扰较少的自然环境条件下,由于湾内海水的流动性和交换能力弱于湾外,相对不易被潮流和海洋流稀释,是造成深圳湾和大亚湾内沿岸表层海水中 $\sum$ PFCs 残留高于其湾外的重要原因. 但位于大鹏湾的 S10 位点,由于紧邻深圳大型主题公园“明斯克航母”,受人类活动影响较多,可能是致使该位点表层海水中 $\sum$ PFC 残留高于大鹏湾其它位点(S14、S13、S12 和 S11)的原因.

2.3 深圳市沿岸表层海水中 PFCs 来源浅析

深圳沿岸 18 处表层海水中 PFCs 残留的 Spearman 相关分析结果显示,表层海水中 PFOS 残留分别与 PFOA、PFPeA 呈显著正相关 ($P < 0.01$),与 PFHxA 呈正相关 ($P < 0.05$),表明表层海水中 PFOS 与 PFOA、PFPeA 和 PFHxA 具有相似的环境行为;同时,PFOA 残留则与 PFPeA、PFHxA 及 PFUdA 分别呈正相关 ($P < 0.05$),表明 PFOA 又与 PFPeA、

PFHxA 及 PFUdA 具有相似的环境行为. 究其原因,应与 PFCs 相关产品生产过程、PFCs 降解行为及其前体物质的迁移转化规律有关. 首先,PFOS 相关产品的生产过程中会产生包括 PFOA 在内的全氟羧酸(perfluorinated carboxylic acids, PFCAs)副产物 [19, 20]. 同时,PFOS 还可降解形成短链的 PFCAs、PFOA [21] 以及相应的全氟羧酸盐 [20],而 PFOA 可进一步降解形成 C4 ~ C7 的 PFCAs [22],这可能是表层海水中 PFOS 残留与 PFOA、PFPeA、PFHxA 呈正相关的原因之一;其次,调聚法是直链全氟羧酸与磺酸盐类产品最主要的生产方法,其前体氟调聚物醇(fluorotelomer alcohols, FTOHs)可经由水解、光解和生物降解 [23]. 由于 FTOHs 具有较高的蒸气压,易挥发,故可随大气传输并被氧化,进而合成或降解生成更长链或更短链的 PFCAs,并经沉降进入水体 [24]. 这在一定程度上提供了表层海水中 PFOA 残留与 PFPeA、PFHxA、PFUdA 呈正相关的理由.

3 结论

(1)深圳沿海岸表层海水中 PFCs 的主要残留种态为中、短链的 PFOS、PFOA、PFHxA 和 PFPeA,尤以 PFOS 最为显著,可作为评价深圳沿海岸表层海水中 PFCs 污染状况的典型污染物. 表层海水中 PFOS、PFOA、PFPeA 和 PFHxA 相似的环境行为,则可能与 PFCs 相关产品生产过程、PFCs 降解行为及其前体物质的迁移转化规律有关.

(2)开发程度轻、人口稀疏的自然条件下,沿岸表层海水中 $\sum$ PFCs 残留受海水的流动性和交换能力的影响,呈湾内高于湾外的规律. 但江河入海口附近表层海水中 $\sum$ PFCs 残留,受上游河流两岸工农业废水和生活污水的影响非常显著.

参考文献:

- [1] Ahrens L. Polyfluoroalkyl compounds in the aquatic environment: a review of their occurrence and fate [J]. Journal of Environmental Monitoring, 2011, 13(1): 20-31.
- [2] Naile J E, Khim J S, Wang T Y, et al. Perfluorinated compounds in water, sediment, soil and biota from estuarine and coastal areas of Korea [J]. Environmental Pollution, 2010, 158(5): 1237-1244.
- [3] 王亚韩,蔡亚岐,江桂斌. 斯德哥尔摩公约新增持久性有机污染物的一些研究进展 [J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2010, 40(2): 99-123.
- [4] Prevedouros K, Cousins I T, Buck R C, et al. Sources, fate and transport of perfluorocarboxylates [J]. Environmental Science &

- Technology, 2006, **40**(1): 32-44.
- [5] Kumar K S. Fluorinated organic chemicals: a review [J]. Research Journal Chemistry and Environment, 2005, **9**(3): 50-79.
- [6] Ju X D. Progress in research on marine environmental pollution of perfluorinated chemicals [J]. Marine Sciences, 2010, **34**(7): 93-99.
- [7] So M K, Miyake Y, Yeung W Y, *et al.* Perfluorinated compounds in the Pearl River and Yangtze River of China [J]. Chemosphere, 2007, **68**(11): 2085-2095.
- [8] Bao J, Liu W, Liu L, *et al.* Perfluorinated compounds in urban river sediments from Guangzhou and Shanghai of China [J]. Chemosphere, 2010, **80**(2): 123-130.
- [9] Mak Y L, Taniyasu S, Yeung L W Y, *et al.* Perfluorinated compounds in tap water from China and several other countries [J]. Environmental Science & Technology, 2009, **43**(13): 4824-4829.
- [10] Olsen G W, Church T R, Miller J P, *et al.* Perfluorooctanesulfonate and other fluorochemicals in the serum of American Red Cross adult blood donors [J]. Environmental Health Perspective, 2003, **111**(16): 1892-1901.
- [11] Renner R. Growing concern over perfluorinated chemicals [J]. Environmental Science & Technology, 2001, **35**(7): 154A-160A.
- [12] Yamashita N, Kannan K, Taniyasu S, *et al.* A global survey of perfluorinated acids in oceans [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **51**(8-12): 658-668.
- [13] Ju X D, Jin Y H, Sasaki K, *et al.* Perfluorinated surfactants in surface, subsurface water and microlayer from Dalian coastal waters in China [J]. Environmental Science & Technology, 2008, **42**(10): 3538-3542.
- [14] So M K, Taniyasu S, Yamashita N, *et al.* Perfluorinated compounds in coastal waters of Hong Kong, South China, and Korea [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(15): 4056-4063.
- [15] 陈春丽, 王铁宇, 吕永龙, 等. 河流及污水处理厂全氟化合物排放估算 [J]. 环境科学, 2011, **32**(4): 1073-1080.
- [16] 鞠晓东, 金一和, 刘利, 等. 全氟羧酸盐海洋微表层富集与影响因素分析 [J]. 中国科学 B 辑: 化学, 2009, **39**(10): 1-9.
- [17] 陈明霞, 李和阳, 李刚, 等. 深圳海域弧菌种类组成、数量分布及其与环境因子的关系研究 [J]. 海洋学报, 2010, **32**(5): 117-126.
- [18] Becker A M, Gerstmann S, Frank H. Perfluorooctane surfactants in waste waters, the major source of river pollution [J]. Chemosphere, 2008, **72**(1): 115-121.
- [19] Dimitrov S, Kamenska V, Walker J D, *et al.* Predicting the biodegradation products of perfluorinated chemicals using CATABOL [J]. SAR and QSAR in Environmental Research, 2004, **15**(1): 69-82.
- [20] Wang N, Szostek B, Buck R C, *et al.* Fluorotelomer alcohol biodegradation-direct evidence that perfluorinated carbon chains breakdown [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(19): 7516-7528.
- [21] Moriwaki H, Takagi Y, Tanaka M, *et al.* Sonochemical decomposition of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid [J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(9): 3388-3392.
- [22] 陈静, 张彭义, 刘剑. 全氟羧酸在 185 nm 真空紫外光下的降解研究 [J]. 环境化学, 2007, **28**(4): 772-776.
- [23] 吴克安, 张恒. “C8”类全氟碳化合物何去何从 [J]. 有机氟工业, 2008, (3): 21-26.
- [24] Ellis D A, Martin J W, De Silva A O, *et al.* Degradation of fluorotelomer alcohols: a likely atmospheric source of perfluorinated carboxylic acids [J]. Environmental Science & Technology, 2004, **38**(12): 3316-3321.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cai, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人