ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

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

双奖期刊

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第33卷 第6期
2012年6月15日

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-养殖耦合系统水产品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)
五氯酚对稀有鮈鲫卵黄蛋白原及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,王辉宪(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,胡洪营,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理脱水效果的影响 …… 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)
$Fe\text{-}MnO_x\text{-}CeO_2/ZrO_2$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_2O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_2O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 …… 余立风,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)

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[1,2,3],邱孟德[1,2,3],孙国萍[1,2,3],郭俊[1,2,3],张宏涛[1,2,3],张琴[1,2,3],许玫英[1,2,3]*
(1. 广东省微生物研究所,广州 510070; 2. 广东省菌种保藏与应用重点实验室,广东省微生物应用新技术公共实验室,广州 510070; 3. 广东省华南应用微生物重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,广州 510070)

摘要: 为综合评估电器加工制造业对纳污水体多环芳烃(PAHs)的污染影响,对广东典型电器工业区佛山市顺德区容桂街道河涌沉积物的 PAHs 含量进行了空间和垂直分布、来源以及生态风险评估研究. 结果表明, 16 种优先控制 PAHs 中有 12 种检出率达 100%,其余 4 种具有不同的检出率. $\sum$PAHs 含量范围为 343.5 ~ 2 099 μg·kg^{-1},均值为1 215.9 μg·kg^{-1}. PAHs 组成特点为 2 ~ 3 环 > 4 环 > 5 ~ 6 环. 在 0 ~ 40 cm 垂直尺度内, 4 个分层层面的 $\sum$PAHs 含量和种类均无显著变化. 同分异构体比率分析显示,空间尺度上 PAHs 主要污染源来自石油、生物质以及木柴燃烧等活动. 垂直尺度上燃烧类型反映了从生物质向石油燃烧为主的转变. 河涌沉积物总量污染指标和污染因子指标显示了相同的重度污染特征,各监测断面污染程度由高到低为:S7 > S2 > S4 > S3 > S6 > S1 > S5. 沉积物质量基准法(SQGs)评价显示 S7、S2、S3 等位点具有潜在的生态风险. 包含居民区和制造业集中区的各监测点 $\sum$PAHs 含量分布显示,该地区 PAHs 污染和电器制造业存在没有直接相关性.

关键词:沉积物; 多环芳烃; 分布模式; 污染因子; 质量基准法; 生态风险
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2012)06-1801-07

Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone

DENG Dai-yong[1,2,3], QIU Meng-de[1,2,3], SUN Guo-ping[1,2,3], GUO Jun[1,2,3], ZHANG Hong-tao[1,2,3], ZHANG Qin[1,2,3], XU Mei-ying[1,2,3]
(1. Guangdong Institute of Microbiology, Guangzhou 510070, China; 2. Guangdong Provincial Key Laboratory of Microbial Culture Collection and Application, Guangdong Open Laboratory of Applied Microbiology, Guangzhou 510070, China; 3. State Key Laboratory of Applied Microbiology (Ministry-Guangdong Province Jointly Breeding Base), South China, Guangzhou 510070, China)

Abstract: In order to investigate the polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) contamination status in a river of a typical electrical equipment industrial area, Ronggui, Foshan, 8 sediments simples were collected. The results showed that 12 components of PAHs were detected in all sediment samples, and the other 4 components were also detected in different degree. The total 16 EPA priority PAHs contents in surface sediments varied from 343.5 μg·kg^{-1} to 2 099 μg·kg^{-1} (dry wt), with an average of 1 215.9 μg·kg^{-1}, and no significant variation was found in vertical distribution. The 2 to 3 aromatic rings were the dominant PAHs, and they accounted for 50.6% to 82.5% of the total PAHs. Diagnostic ratios were used to identify the possible sources of PAHs, and the results indicated that PAHs were mainly pyrogenic origin. Sediments were polluted by PAHs heavily according to Maliszewska-Kordybach's standard, the very high risk level was also confirmed by the contamination factors assessment which was investigated by comparison with the background area (S0). The assessment by the method of sediment quality guidelines (SQGs) and relative contamination factor (RCF) demonstrated that adverse biological toxicity effect might occasionally happen in a few sampling sites, and the ecological risk components included acenaphthene (Ace), fluorine (Flu), and phenanthrene (Phe).

Key words: sediments; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); distribution profile; contamination factors; sediment quality guidelines (SQGs); ecological risk assessment

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中广泛分布的一类典型的持久性有机污染物. 大量研究证实,PAHs 具有慢性毒性和致癌、致畸、致突变的"三致"作用[1~3]. 世界卫生组织(WHO)和美国 EPA 把 16 种 PAHs 列为优先控制的持久性有机污染物[4,5]. 环境中多环芳烃主要来源于人类活动的石油精炼、化石燃料和煤炭的不完全

收稿日期: 2011-07-26; **修订日期**: 2011-08-29
基金项目: 广东省中国科学院全面战略合作项目(2010B09031048); 广东省自然科学基金研究团队项目(9351007002000001); 佛山市院市合作项目(2010YS023); 佛山市顺德区容桂街道科技计划项目; 广东省科学院台站基金项目(sytz201009)
作者简介: 邓代永(1974 ~),男,博士, 助理研究员,主要研究方向为环境微生物污染控制技术, E-mail: dengdaiyong@hotmail.com
* 通讯联系人,E-mail: xumy@gdim.cn

燃烧[6].

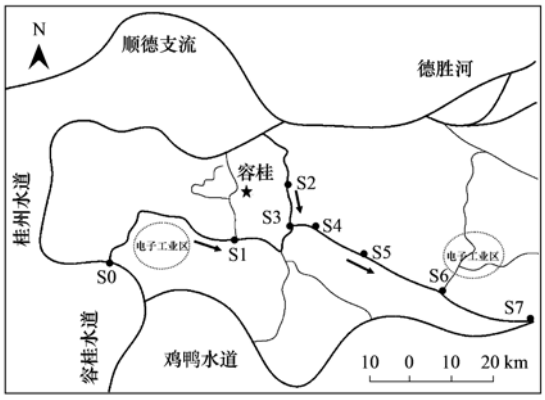
随着珠江三角洲地区经济的快速发展,持久性有机污染物所引起的环境污染与生态破坏问题日益突出[7]. 近年的研究表明,多环芳烃在珠三角地区的大气、水体、土壤和沉积物中的浓度达到了较高的水平[8~26]. 为了解电子电器制造业对 PAHs 污染的影响,有必要以代表性电器制造业工业区为研究区域,开展包含 PAHs 空间和垂直分布特征及其潜在的生态风险研究. 为类似产业结构区域的水环境规划、污染修复、河涌底泥疏浚、污染排放管理和保护工作提供基础数据和实践参考[27,28].

佛山市顺德区容桂街道是电子电器制造业高度集中区域,辖区年产值超过3 000万元以上企业近200 家. 街道的内河涌不仅是当地工业污染的"汇",也是珠江水系重要的污染"源". 街道四周环岛,地势西高东低,水流方向单一,是内源污染物迁移规律研究的理想场所. 目前针对该地区 PAHs 污染相关报道较少[19,24]. 针对电器制造业工业区受纳水体的 PAHs 污染形成微观机制报道更少. 本研究通过对容桂街道内河涌沉积物中 PAHs 空间尺度和垂直分布的研究,综合解析电器制造业聚集区 PAHs 污染蓄积的历史和现状,了解其污染形成主要原因. 并采用总量污染指标、污染因子和沉积物质量基准法进行污染蓄积状况及其潜在的生态风险进行定量评估,以期为 PAHs 污染治理和产业政策制定提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

为了解工业区 PAHs 污染形成特征,选择包含工业区(两端),居民生活区(中间)的河段为研究对象. 沿河涌水流方向从桂州水道的龙涌水闸(S0)至下游鸡鸭水道(S7),设置 S0 ~ S7 共 8 个采样点,其中 S0 为无内源污染的参照点. 为避免临近工业区的排污口 PAHs 浓度变化过大造成的异常波动,设置污染浓度接近中等水平的下游影响区域 S4 作为垂直尺度的研究对象,具体采样点分布见图 1. 面源沉积物样品采集通过无扰动重力沉积物采样器采集表层 0 ~ 20 cm 沉积物. 垂直尺度污染分析样品使用柱状采样器采集(437 400/S, HYDRO-BIOS),分别采集 0 ~ 10 cm、10 ~ 20 cm、20 ~ 30 cm、30 ~ 40 cm 沉积物. 每个监测点样品均采集于河道中央及中弘线两侧各 2 m 处共 3 个位点的沉积物,混匀为一个样品装入聚乙烯瓶. 每个采样点采集 2 个平行样品,封口并标记带回实验室处理. 采集的沉积物样品经过自然风干,剔除石块、木屑后混合均匀用研钵研磨处理,过 100 目尼龙筛,用广口玻璃瓶保存备用.



图中箭头方向表示水流方向

图 1 容桂内河涌沉积物采样点分布

Fig. 1 Location of sampling sites in Ronggui inland river

1.2 样品预处理

样品采集后,经冷冻干燥、研磨、过 100 目筛,于密封袋中 4℃保存备用. 准确称取 15 g 样品加入回收率指示物标样,加入 2 g 活化铜片脱硫,用 200 mL 二氯甲烷索氏抽提 48 h. 提取液浓缩并用 1 mL 正己烷置换,过氧化铝/硅胶(体积比为 1∶2)的层析柱进行分离纯化. 分别用 15 mL 正己烷和 70 mL 二氯甲烷/正己烷(体积比为 3∶7)的混合溶剂淋洗烷烃和多环芳烃组分. 多环芳烃组分浓缩定容至 500 μL,加入内标六甲基苯后利用 GC-MSD 方法(美国 HP Agilent 6890 和 Agilent 5973 MSD)对 16 种优控 PAHs 进行多环芳烃的定量分析[29].

1.3 仪器分析条件与质量控制

DB-MS (60 m × 250 μm × 0.125 μm) 色谱柱. 升温程序: 80℃ 保持 1 min, 以 10℃·min^{-1} 升至 180℃, 2℃·min^{-1} 升至 220℃, 以 8℃·min^{-1} 升至 290℃,保持 30 min; 进样口温度 280℃; 载气为高纯氮气; 流量 1.5 mL·min^{-1}; 分流进样,进样量为 1 μL. 质谱离子源: 电子轰击源(EI),电离能 70 eV,离子源温度 230℃,扫描方式 SIM,扫描范围(m/z) 50 ~ 500. 用方法空白、加标空白、基质加标、基质加标平行样进行质量控制. 整个分析过程中的质量控制、质量保证(QA/QC)措施见文献[29]. 方法空白中未检出目标化合物. 混合标样为萘-d_8、二氢苊-d_{10}、菲-d_{10}、䓛-d_{12}、苝-d_{12} (Ultra Scientific, 美国). 加标空白中 PAHs 回收率平均值为萘-d_8: 55% ~ 64%; 二氢苊-d_{10}: 85% ~ 93%; 菲-d_{10}:

77% ~93%；䓛-d_{12}：83% ~101%；苝-d_{12}：86% ~97%. 标样总体回收率范围 55% ~101%，目标化合物的定量结果经空白扣除和回收率校正.

1.4　河涌沉积物中 PAHs 的污染评估

总量污染评估采用 Maliszewska-Kordybach 设定的 4 级污染总量标准[30]：无污染（< 200 μg·kg^{-1}）、轻度污染（200 ~600 μg·kg^{-1}）、中度污染（600 ~ 1 000 μg·kg^{-1}）重度污染（> 1 000 μg·kg^{-1}）. 除总量判定外，还使用侧重显示污染蓄积状态的污染因子法来判定其蓄积状态，该方法的创建者 Hakanson 设定每一个目标污染物和背景值相比[31]. 当比值 <1 时，污染程度为“低”，介于 1 ~ 3 为“中”，介于 3 ~6 为“相当高”，=6 则为“非常高”. 而综合污染程度（C_d）是样点所有污染因子比值的总和：$C_d < n$，低；$n \leqslant C_d < 2\ n$，中等；$2\ n \leqslant C_d < 4\ n$，相当高；$C_d \geqslant 4\ n$，非常高. 式中，$n$ 代表污染因子的数量.

除总量污染和相对蓄积状况评估外，本研究还利用沉积物质量基准法（sediment quality guidelines，SQGs）进行了生物毒性效应评估. 该方法被广泛应用于淡水、港湾和海洋沉积物的目标污染物与生物效应定量关系的评价工具[32,33]. 当沉积物中某种 PAHs 浓度低于效应范围低值（ERL），表明生物毒性效应很少发生；当污染物浓度高于效应范围中值（ERM）时，表明生物毒性效应将频繁发生；如果介于二者之间，则表示生物毒性效应会偶尔发生[34]. 相对污染系数（relative contamination factor，RCF）则是沉积物中 PAHs 浓度与 ERL 的比值，用于表征 PAHs 潜在生物毒性风险的量化指标.

2　结果与讨论

2.1　空间和垂直尺度的 PAHs 含量及分布特征

容桂街道内河涌沉积物中，世界卫生组织（WHO）和美国 EPA 规定的 16 种优先控制 PAHs 中萘（Nap）、苊烯（Acy）、苊（Ace）、芴（Flu）、菲（Phe）、蒽（Ant）、荧蒽（Fla）、芘（Pyr）、苯并[a]蒽（Baa）、苯并[b]荧蒽（Bbf）、苯并[ik]荧蒽（Bkf）、䓛（Chr）等 12 种检出率达 100%，其余 4 种具有不同的检出率. $\sum$PAHs 含量范围为 343.5 ~2 099 μg·kg^{-1}，均值为1 215.9 μg·kg^{-1}（图 2）. 在设定的 8 个监测位点中，S0 监测点为未受容桂街道内源污染的西江支流沉积物，其 $\sum$PAHs 含量为 389 μg·kg^{-1}. 街道内河涌沿着水流方向，上游（S1）沉积物中 $\sum$PAHs 含量和 S0 相当（392 μg·kg^{-1}），中间区段（S2 ~ S4）的 $\sum$PAHs 含量明显增加，其中 S3 为所有监测位点的最高值，$\sum$PAHs 含量高达2 099 μg·kg^{-1}. S5 为所有监测位点含量最低位点，含量为 343.5 μg·kg^{-1}. 从 S6 ~ S7，$\sum$PAHs 含量又呈上升趋势（图 2）.

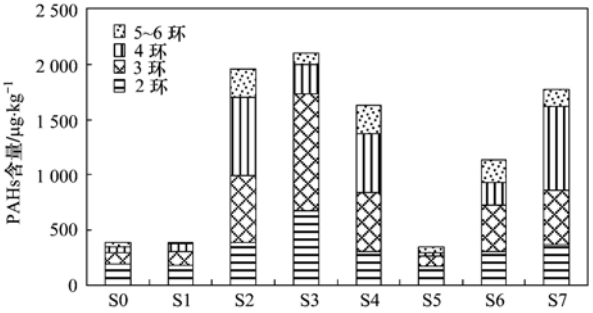


图 2　内河涌表层沉积物中 PAHs 的浓度分布

Fig. 2　Distribution of PAHs in surface sediments

与珠三角其它河流沉积物中 PAHs 的含量水平相比，容桂街道内河涌 PAHs 含量明显高于珠江口百年沉积记录的 59 ~330 μg·kg^{-1}[15]，也高于罗孝俊等关于珠三角水体表层沉积物中 749 μg·kg^{-1} PAHs 的含量报道[16] 以及珠江1 028 μg·kg^{-1} 的 PAHs 均值[18]. 该含量也分别高于珠三角地区菜地土壤的 PAHs 含量[19] 和珠三角表层土壤中 PAHs 的含量[20]. 在佛山顺德地区同类研究中，马瑾等[24] 曾报道同属佛山顺德地区的土壤 $\sum$PAHs 含量为 169.4 μg·kg^{-1}，该报道含量远远低于本研究的结果. 数据显示，容桂街道 $\sum$PAHs 含量和北江表层沉积物（1 071 μg·kg^{-1}）含量相当[25]，但低于珠三角的广州珠江段（1 292 ~2 683 μg·kg^{-1}）[22]. 和国内其它地区河道沉积物 PAHs 含量相比，远低于黄河干流2 287 μg·kg^{-1}平均含量[35] 和松花江中下游 3 789 μg·kg^{-1} 平均含量[36]，接近黄埔江的1 600 μg·kg^{-1}平均含量[37].

在垂直尺度 4 个层面上（0 ~40 cm），河涌沉积物的 $\sum$PAHs 含量由下而上的发生了增加、减少再增加的变化过程（图 3）. 数据显示，2 环和 5 ~6 环 PAHs 含量变化较小，3 环和 4 环 PAHs 含量变化较大. 刘国卿等研究 0 ~62 cm 珠江口沉积记录显示，90 年代后 PAHs 含量急剧上升（范围 59 ~ 330 μg·kg^{-1}）[16]. 而本研究显示河涌 0 ~40 cm 层面由下至上虽然含量有波动，但波动范围并不明显. 该地区沉积物中 PAHs 含量差异较小可能和该地区河涌

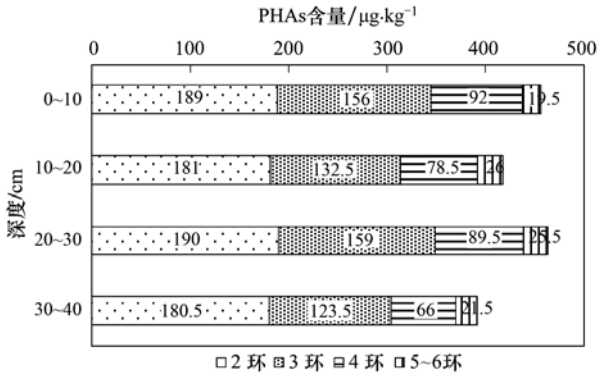


图 3 垂直方向上的 PAHs 含量分布

Fig. 3 Vertical distribution of PAHs concentrations

沉积物沉降速度过快,所代表的历史时期较短有关.

针对内河涌 PAHs 不同组分的中值分布箱线图(图 4)可以看出,容桂街道内河涌沉积物中以菲(Phe)、萘(Nap)、芘(Pyr)、苯并[a]芘(Bap)等为主,其中菲含量最高,各点含量中值为 126 μg·kg^{-1},最大值为 328 μg·kg^{-1}. 而高环 PAHs 包括茚并[1,2,3-cd]芘(InP)、二苯并[a,h]蒽(DahA)和苯并[g,h,i]芘(BghiP)检出量率和检出量都很低. 和本研究结果相似,邓红梅等[26]对西江高要段水体 PAHs 分析结果显示低环为主要的 PAHs 存在形式. 麦碧娴等[8]对珠三角河流及河口表层沉积物研究表明,沉积物中含量最高的为菲,余莉莉等[20]报道珠三角表层土中以萘、菲等化合物为主,其中以东莞、佛山和顺德等经济活动中心区域的浓度最高. 马瑾等[24]对顺德区土壤研究结果显示,PAHs 各组分中菲含量最高,该结果也和本研究一致. 马骁轩等[19]对珠三角菜地研究发现,佛山地区菜地中 PAHs 成分含量不同于广州(Chr)和东莞(Fla),佛山以 Phe 含量最高.

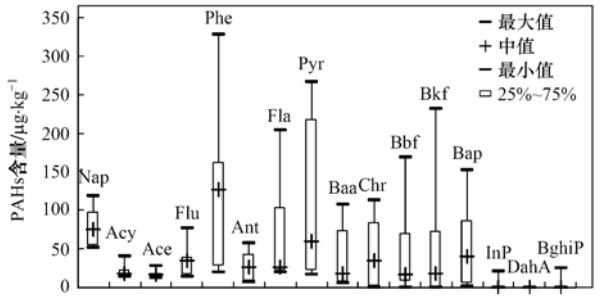
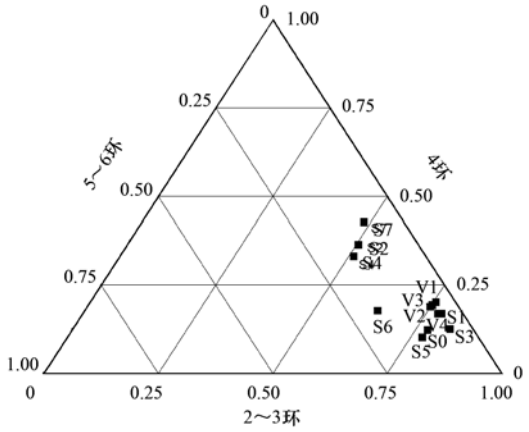


图 4 沉积物中 PAHs 含量分布箱线

Fig. 4 Box-Whisker distribution of PAHs in sediments

从图 5 中显示了沉积物中 2 ~ 3 环、4 环、5 ~ 6 环 PAHs 相对比例的分布特征. 从中可以看出,空间分布上, 2 ~ 3 环 PAHs 在所有监测位点中都有较高的含量. 除了 S2、S4 和 S7 约为 50%,S6 为 64% 外,其余各点均超过 75%. 4 环 PAHs 中,S2、S4 和 S7 介于 33% ~ 42.7% 之间,其余各点 4 环占比均小于 25%. 所有监测点的 5 ~ 6 环 PAHs 含量均小于 25%. 在垂直尺度上, 30 ~ 40 cm 表层沉积物的 2 ~ 3 环的比例高于其它层面. 4 环比例是 0 ~ 30 cm 接近,高于 30 ~ 40 cm 层面. 5 ~ 6 环占比中,表层比例最低(V1),次表层(V2)占比最高.



S0 ~ S7 为空间尺度监测位点编号,
V1 ~ V4 为从表层到底层的垂直层面编号

图 5 多环芳烃组分三角图

Fig. 5 Trilinear plot of PAH proportions in surface sediments

2.2 河涌沉积物中多环芳烃来源

化石燃料挥发、泄漏、燃烧,以及生物质的燃烧等过程是环境中多环芳烃的重要来源,根据多环芳烃人为产生过程的差异分为石油源和燃烧源. 由于不同来源途径的多环芳烃成分和比值不同,该比值常被用来识别多环芳烃的来源. 其中同分异构体比率在确定多环芳烃的污染源研究中,是一种有用的诊断工具. Yunker 等[38]研究发现,蒽/(蒽 + 菲) < 0.1 意味着油类排放来源, > 0.1 则主要是燃烧来源. 荧蒽/(荧蒽 + 芘) < 0.4 是典型的石油源污染, > 0.5 则主要是草本、木柴和煤燃烧来源,位于 0.4 ~ 0.5 则是石油及其精炼产品的燃烧来源. 本研究选取蒽/(蒽 + 菲)[Ant/(Ant + Phe)]以及荧蒽/(荧蒽 + 芘)[Fla/(Fla + Pyr)]这 2 种母体多环芳烃比值来判别容桂街道河涌底泥中多环芳烃的来源.

以 Fla/(Fla + Pyr)为横坐标,其他比值为纵坐标做多环芳烃来源诊断图(图 6). 如图所示,以 Ant/(Ant + Phe)比值来判定 PAHs 来源,河涌沉积物全部 > 0.1,该结果显示监测河涌沉积物全部来源于燃烧源. 以 Fla/(Fla + Pyr)为标准来判断,除了 S2 < 0.4,属于石油挥发大气沉降或者泄漏来源,其余各点均 > 0.4,属于燃烧源范围. 其中,S1、S4、S6 和 S7

属于石油燃烧,其余为木柴和煤炭燃烧. 垂直尺度上来源显示由底层到表层沉积物中有木柴、煤炭燃烧向石油燃烧过度趋势. 2 种标准中 S2 分属不同类型,Fla/(Fla + Pyr)判定 S2 属于典型的石油源,而 Ant/(Ant + Phe)结果则属于燃烧源. 利用 Ant/(Ant + Phe)判定标准 S2 为 0.164,虽然属于燃烧源,但

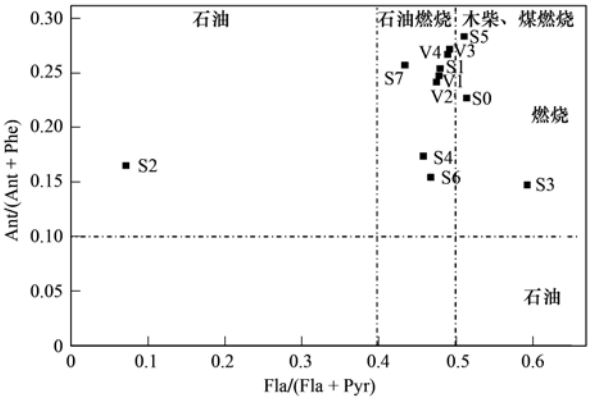


图 6　沉积物空间和垂直维度的 PHAs 来源分析

Fig. 6　Diagnostic ratios of PAHs in sediments

各点中仅 S3(0.146)和 S6(0.154)略低于 S2. 总体来看,石油燃烧、以及生物质和煤燃烧是该区域沉积物中 PAHs 的主要来源. 该结果和马瑾等[24]关于顺德地区 PAHs 来源研究结果一致,和马骁轩等[19]关于佛山地区 PAHs 燃烧和石油污染混合来源不同.

2.3　河涌沉积物中 PAHs 的污染评估

根据 Maliszewska-Kordybach 设定污染总量标准, 7 个内河涌监测点中 S2、S3、S4、S6、S7 这 5 个位点属于重度污染,重度污染率为 71.4%,另 2 个位点 S1 和 S5 属于轻度污染,总体上顺德容桂街道内河涌沉积物的 PAHs 污染程度较严重.

总量污染指标外,以 S0 各 PAHs 污染因子含量为背景值作污染因子表(表 1),结果显示,各监测位点污染因子和综合污染程度由高到低为:S7 > S2 > S4 > S3 > S6 > S1 > S5. 其中,S7、S2、S4 污染程度为非常高,S3 为相当高,S6 和 S1 为中度污染,S5 为低污染. 所有内河涌监测各点的综合污染程度均值为 51.4,C_d/n 均值为 4.7,污染程度相当高.

表 1　沉积物中 PAHs 的污染因子评价表

Table 1　Assessment according the method of contamination factors and degree to the PAHs

位点	污染因子[1)]											C_d	C_d/n	程度
	Nap	Acy	Ace	Flu	Phe	Ant	Fla	Pyr	Baa	Bbf	Bap			
S1	0.9	1.0	1.0	0.9	0.9	1.1	1.5	1.8	1.4	1.3	1.5	13.2	1.2	中度
S2	1.6	1.6	1.5	2.9	7.3	4.9	1.0	13.5	12.4	12.0	20.3	78.9	7.2	非常高
S3	2.1	1.4	2.2	4.5	11.3	6.6	1.3	0.9	0.7	0.4	25.4	56.8	5.2	相当高
S4	1.4	1.4	1.3	2.1	5.0	3.6	9.2	11.6	10.1	9.2	15.6	70.4	6.4	非常高
S5	0.9	1.0	1.0	0.8	0.7	0.9	1.3	1.3	0.7	0.7	0.4	9.6	0.9	低
S6	1.3	1.1	1.2	2.0	4.1	2.5	4.1	5.0	3.6	3.5	4.8	33.3	3.0	中度
S7	2.1	2.7	1.3	2.1	4.6	5.5	10.7	14.8	15.4	ND[2)]	38.0	97.2	8.8	非常高
均值	1.5	1.5	1.3	2.2	4.8	3.6	4.2	7.0	6.3	3.9	15.1	51.4	4.7	相当高

1)Chr 和 Bkf 的污染检出范围分别为 0 ~ 113 和 0 ~ 232,但对照背景值低于检测线,因此未列入; 2)ND 为低于检测线

用沉积物质量基准法作表(表 2),数据显示,监测位点所有 PAHs 的实测含量均低于 ERM 中值,表示生物毒性不会频繁发生. 绝大多数位点的 PAHs 浓度均低于 ERL 值,属于生物毒性很少发生范围. 但相对污染系数指标中,S2、S3、S4、S7 位点苊(Ace)的相对污染系数 > 1,S2、S3、S4、S6、S7 位点芴(Flu)的相对污染系数 > 1,S3 位点菲(Phe)相对污染系数 > 1. 因此,利用沉积物质量基准法判定监测河涌沉积物的生物毒性效应不高,部分位点的生态毒性相对较高.

Maliszewska-Kordybach 总量污染判定标准和污染因子结果基本一致,显示监控区域内 PAHs 污染达到严重的程度. 这一污染状况也远高于该地区的历史报道数据[19,20,24]. 虽然利用 $\sum$PAHs 蓄积总量和相对蓄积程度的污染因子判定结果都属于严重

表 2　河涌沉积物中 PAHs 含量范围与风险效应低值和风险效应中值比较/μg·kg^{-1}

Table 2　Comparison of PAHs concentrations in surface sediments with the effect range low (ERL) and the effect range median (ERM)/μg·kg^{-1}

PHAs	ERL	ERM	实测值	RCF > 1 的位点
Nap	160	2 100	52 ~ 119	—[2)]
Acy	44	640	15 ~ 40	—
Ace	16	500	13 ~ 28	S2、S3、S4、S7
Flu	19	540	14 ~ 77	S2、S3、S4、S6、S7
Phe	240	1 500	19 ~ 328	S3
Ant	85.3	1 100	8 ~ 57	—
Fla	600	5 100	19 ~ 204	—
Pyr	665	2 600	17 ~ 266	—
Baa	261	1 600	5 ~ 108	—
Chr	384	2 800	0 ~ 113	—
Bap	430	1 600	2 ~ 152	—
DahA	63.4	260	ND[1)]	—
$\sum$PHAs	2 807.7	18 240	161 ~ 1 490	—

1)ND 为低于检测线; 2)相对污染系数 < 1

污染,但是沉积物质量基准法测算结果显示该区域的潜在生态毒性总体较低. 造成这种差异主要原因是因为不同种类 PAHs 的潜在生态毒性效应差别. 容桂街道 PAHs 以低环化合物为主,特别是 2 环和 3 环化合物含量在大多监控位点均占 $\sum$PAHs 的 75% 以上. 而 2 ~ 3 环类低环 PAHs 的生态毒性浓度效应低值和中值的浓度大大高于 4 环以上的 PAHs 效应值,因此出现了 $\sum$PAHs 含量较高,但是总体潜在生态风险相对较低的现象. 但由于质量基准法严重依赖于生物效应数据库,该效应结果还需要更多试验生物种类增加和评估方法的完善.

3 结论

(1)佛山市顺德区容桂街道内河涌沉积物中,16 种优先控制 PAHs 检出率达 100%,其中 12 种 PAHs 在所有位点均检出. $\sum$PAHs 含量范围为 343.5 ~ 2 099 $\mu g \cdot kg^{-1}$,均值为 1 215.9 $\mu g \cdot kg^{-1}$,PAHs 总量污染属于重度污染. 其中 2 ~ 3 环 > 4 环 > 5 ~ 6 环. 包含居民区和制造业集中区各监测点 $\sum$PAHs 含量分布显示,该地区 PAHs 污染和电器制造业存在没有直接相关性.

(2)监测区域 PAHs 主要污染源来自石油、生物质以及木柴燃烧等活动. 垂直尺度沉积物比较结果显示,其燃烧类型具有从生物质向石油燃烧变化趋势,该变化和本地区快速的工业化发展有关.

(3)河涌沉积物总量污染和污染因子指标共同显示该地区 PAHs 污染严重,由于 PAHs 组分以低环为主,质量基准法判定其潜在生物毒性风险评价总体不高,但 S2、S3 和 S7 等位点仍具有较高的潜在生态风险.

参考文献:

[1] Menzie C A, Potoki B B, Santodonato J. Exposure to carcinogenic PAHs in the environment [J]. Environmental Science and Technology, 1992, **26**(7): 1278-1284.

[2] Wilson S C, Jonas K C. Bioremediation of soil contaminated with polynuclear aromatic hydrocarbons (PAHs): a review [J]. Environmental Pollution, 1993, **81**(3): 229-249.

[3] NRC. Polycyclic aromatic hydrocarbons: evaluation of sources and effects [M]. Washington, DC: National Academy Press, 1983.

[4] WHO. Evaluation of the Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans, Polynuclear Aromatic Compounds, Part 1, Chemical Environmental and Experimental Data, 321 International Agency for Research on Cancer [R]. World Health Organization, 1983. 5-15.

[5] EPA 440/5-86-001, Quality Criteria for Water, 1986 [S].

[6] Edwards N T. Polycyclic aromatic hydrocarbons in the terrestrial environment: a review [J]. Journal of Environmental Quality, 1983, **12**(4): 427-441.

[7] Fu J M, Mai B X, Sheng G Y, *et al*. Persistent organic pollutants in environment of the Pearl River Delta, China: an overview [J]. Chemosphere, 2003, **52**(9): 1411-1422.

[8] 麦碧娴, 林峥, 张干, 等. 珠江三角洲河流和珠江口表层沉积物中有机污染物研究——多环芳烃和有机氯农药的分布及特征 [J]. 环境科学学报, 2000, **20**(2): 192-197.

[9] Qi S H, Yan J, Zhang G, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in aerosols and dustfall in Macao [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2001, **72**(2): 115-127.

[10] Mai B X, Fu J M, Zhang G, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons in sediments from the Pearl river and estuary, China: spatial and temporal distribution and sources [J]. Application Geochemistry, 2001, **16**(11-12): 1429-1445.

[11] Mai B X, Fu J M, Sheng G, Y *et al*. Chlorinated and polycyclic aromatic hydrocarbons in riverine and estuarine sediments from Pearl River Delta, China [J]. Environmental Pollution, 2002, **117**(3): 457-474.

[12] Mai B X, Qi S H, Zeng E Y, *et al*. Distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in the coastal region of Macao, China: assessment of input sources and transport pathways using compositional analysis [J]. Environmental Science and Technology, 2003, **37**(21): 4855-4863.

[13] Luo X J, Mai B X, Yang Q S, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) and organochlorine pesticides in water columns from the Pearl River and the Macao harbor in the Pearl River Delta in South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, **48**(11-12): 1102-1115.

[14] Liu G Q, Zhang G, Li X D, *et al*. Sedimentary record of polycyclic aromatic hydrocarbons in a sediment core from the Pearl River Estuary, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2005, **51**(8-12): 912-921.

[15] 刘国卿, 张干, 李军, 等. 多环芳烃在珠江口的百年沉积记录 [J]. 环境科学, 2005, **26**(3): 141-145.

[16] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江及南海北部海域表层沉积物中多环芳烃分布及来源 [J]. 环境科学, 2005, **26**(4): 129-134.

[17] Luo X J, Chen S J, Mai B X, *et al*. Polycyclic aromatic hydrocarbons in suspended particulate matter and sediments from the Pearl River Estuary and adjacent coastal areas, China [J]. Environmental Pollution, 2006, **139**(1): 9-20.

[18] 罗孝俊, 陈社军, 麦碧娴, 等. 珠江三角洲地区水体表层沉积物中多环芳烃的来源、迁移及生态风险评价 [J]. 生态毒理学报, 2006, **1**(1): 17-24.

[19] 马骁轩, 冉勇, 邢宝山, 等. 珠江三角洲一些菜地土壤中多环芳烃的含量及来源 [J]. 环境科学学报, 2007, **27**(10): 1727-1733.

[20] 余莉莉, 李军, 刘国卿, 等. 珠江三角洲表层土壤中的多环

芳烃 [J]. 生态环境, 2007, **16**(6): 1683-1687.

[21] 丘耀文, 张干, 郭玲利, 等. 深圳湾生态系统多环芳烃(PAHs)特征及其生态危害 [J]. 环境科学, 2007, **28**(5): 1056-1061.

[22] 杨清书, 雷亚平, 欧素英, 等. 珠江广州河段水环境中多环芳烃的组成及其垂直分布特征 [J]. 海洋通报, 2008, **27**(6): 34-43.

[23] 罗孝俊, 陈社军, 余梅, 等. 多环芳烃在珠江口表层水体中的分布与分配 [J]. 环境科学, 2008, **29**(9): 2385-2391.

[24] 马瑾, 周永章, 张天彬, 等. 珠三角典型区域土壤多环芳烃(PAHs)的多元统计分析——以佛山市顺德区为例 [J]. 农业环境科学学报,2008, **27**(5): 1747-1751.

[25] 许静, 任明忠, 杜国勇, 等. 北江表层沉积物中多环芳烃的分布与风险评价 [J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3269-3275.

[26] 邓红梅, 陈永亨, 常向阳. 多环芳烃在西江高要段水体中的分布与分配 [J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3276-3282.

[27] Morales-caselles C, Kalman J, Riba I, *et al*. Comparing sediment quality in Spanish littoral areas affected by acute (*Prestige*, 2002) and chronic (Bay of Algeciras) oil spills [J]. Environmental Pollution, 2007, **146**(1): 233-240.

[28] Leotsinidis M, Sazakli E. Evaluating contamination of dredges and disposal criteria in Greek coastal areas [J]. Chemosphere, 2008, **72**(5): 811-818.

[29] 林峥, 麦碧娴, 张干, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药定量分析的质量保证和质量控制 [J]. 环境化学, 1999, **18**(2): 115-121.

[30] Maliszewska-Kordybach B. Polycyclic aromatic hydrocarbons in agricultural soils in Poland: preliminary proposals for criteria to evaluate the level of soil contamination [J]. Applied Geochemistry, 1996, **11**(1-2): 121-127.

[31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. a sedimentological approach [J]. Water Research, 1980, **14**(8): 975-1001.

[32] Long E R, MacDonald D D, Smith S L, *et al*. Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments [J]. Environmental Management, 1995, **19**(1): 81-97.

[33] MacDonald D D, Ingersoll C G, Berger T A. Development and evaluation of consensus-based sediment quality guidelines for freshwater ecosystems [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2000, **39**(1): 20-31.

[34] Long E R, Ingersoll C G, MacDonald D D. Calculation and uses of mean sediment quality guideline quotients: a critical review [J]. Environmental Science and Technology, 2006, **40**(6): 1726-1736.

[35] 罗雪梅, 刘昌明, 何孟常. 黄河沉积物中多环芳烃的分布特征及来源分析 [J]. 环境科学研究, 2005, **18**(2): 48-50.

[36] 陆继龙, 蔡波, 郝立波, 等. 第二松花江中下游河段底泥中多环芳烃的初步研究 [J]. 岩矿测试, 2007, **26**(4): 325-327.

[37] 胡雄星, 周亚康, 韩中豪, 等. 黄浦江表层沉积物中多环芳烃的分布特征及来源 [J]. 环境化学, 2005, **24**(6): 703-707.

[38] Yunker M B, Macdonald R W, Vingarzan R, *et al*. PAHs in the Fraser River basin: A critical appraisal of PAH ratios as indicators of PAH source and composition [J]. Organic Geochemistry, 2002, **33**(4): 489-515.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 33 No. 6

Jun. 15, 2012

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China ····· CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, *et al.* (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, *et al.* (1784)

Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunmeng 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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1846)

Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu ····· YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, *et al.* (1852)

Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (*Gobiocypris rarus*) ····· XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, *et al.* (1858)

Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (*Brachydanio rerio*) ····· CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, *et al.* (1865)

Relationship Between Electron Transfer Capacity and *Fluorescence Characteristics* of Dissolved Organic Matter ····· TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, *et al.* (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, *et al.* (1884)

Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of *Scenedesmus* sp. LX1 in Aquaculture Wastewater ····· MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, *et al.* (1891)

Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process ····· WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, *et al.* (1897)

Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process ····· LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, *et al.* (1902)

Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor ····· LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, *et al.* (1907)

Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters ····· LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, *et al.* (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, *et al.* (1923)

Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability ····· HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, *et al.* (1930)

Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China ····· LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, *et al.* (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, *et al.* (1944)

Characterization of Atmospheric $PM_{2.5}$ in the Suburb of Shenzhen ····· DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, *et al.* (1952)

Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission ····· TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (1987)

Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N_2O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers ····· SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, *et al.* (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, *et al.* (2000)

Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil ····· LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, *et al.* (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, *et al.* (2013)

Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings ····· SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2075)

Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose ····· BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, *et al.* (2083)

Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor ····· WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (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, *et al.* (2125)

Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis ····· LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, *et al.* (2131)

Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis ····· CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, *et al.* (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