

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第2期

Vol.37 No.2

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

编者按	(403)
我国化学品的风险评价及风险管理	王铁宇,周云桥,李奇峰,吕永龙 (404)
土地利用回归模型在大气污染时空分异研究中的应用	吴健生,谢舞丹,李嘉诚 (413)
中国2000~2010年生态足迹变化特征及影响因素	黄宝荣,崔书红,李颖明 (420)
关中地区冬季PM _{2.5} 中碳气溶胶的污染特征及来源解析	田鹏山,曹军骥,韩永明,张宁宁,张蓉,刘随心 (427)
利用SPAMS研究南宁市冬季单颗粒气溶胶化学成分	刘慧琳,宋红军,陈志明,黄炯丽,杨俊超,毛敬英,李宏姣,梁桂云,莫招育 (434)
南京夏季市区VOCs特征及O ₃ 生成潜势的相关性分析	杨笑笑,汤莉莉,张运江,母应峰,王鸣,陈文泰,周宏仓,花艳,江蓉馨 (443)
北京城区气传花粉季节特征及与气象条件关系	孟龄,王效科,欧阳志云,任玉芬,王巧环 (452)
重庆市垃圾焚烧厂汞的分布特征与大气汞排放因子研究	段振亚,苏海涛,王凤阳,张磊,王书肖,余斌 (459)
三峡库区腹地大气微量金属干湿沉降特征	张六一,刘源,乔保清,付川,王欢博,黄怡民,杨复沫 (466)
长沙近地面水汽中稳定同位素的监测与分析	谢宇龙,章新平,姚天次,黄煌 (475)
青藏高原内陆典型冰川区“冰川-径流”汞传输过程	孙学军,王康,郭军明,康世昌,张国帅,黄杰,丛志远,张强弓 (482)
西藏湖泊沉积物重金属元素特征及生态风险评估	郭泌汐,刘勇勤,张凡,侯居峙,张宏波 (490)
坦噶尼喀湖东北部入湖河流沉积物重金属分布特征与生态风险评价	余成,陈爽,张路 (499)
近百年来新疆博斯腾湖多环芳烃的组成及变化特征	沈贝贝,吴敬禄,赵中华,曾海鳌,金苗 (507)
舟山青浜岛不同环境介质中PAHs的分布特征	郑煌,邢新丽,顾延生,桂福坤,祁士华,黄焕芳 (513)
模拟排水沟渠非点源溶质氮迁移实验研究	李强坤,宋常吉,胡亚伟,彭聪,马强,姜正曦,琚艺萌 (520)
中田河流域景观异质性对水体总氮浓度影响研究	王晶萍,李兆富,刘红玉,王刚,辛强 (527)
江西香溪流域干湿季交替下底泥氮释放机制及其对流域氮输出的贡献	韩宁,郝卓,徐亚娟,高扬,于贵瑞 (534)
巢湖水体氮磷营养盐时空分布特征	奚姗姗,周春财,刘桂建,吴蕾,王培华 (542)
合肥城郊典型农田溪流生态系统沉积物磷形态及释放风险分析	裴婷婷,李如忠,高苏蒂,罗月颖 (548)
桑沟湾表层沉积物性质及对磷的吸附特征	朱佳美,曹晓燕,刘素美,王丽莎,杨桂朋,葛成凤,路敏 (558)
苏州市古城区降雨径流颗粒物粒径分布及污染物赋存形态	李淮,吴玮,田永静,黄天寅 (565)
洪泽湖有毒和无毒微囊藻丰度及其与环境因子之间的相关分析	李大命,张彤晴,唐晟凯,段翠兰,杨俊虎,穆欢,刘小维 (573)
三峡库区消落带水体CDOM中电荷转移配合物对其紫外-可见吸收光谱的影响	江韬,梁俭,张慕雪,王定勇,魏世强,卢松 (580)
pH对高锰酸钾氧化降解苯胺类化合物动力学的影响	王辉,孙波,关小红 (588)
EDTA对Pd/Fe体系还原脱氯2,4-D的影响	周红艺,聂亚中,陈勇,雷双健 (595)
镍铝层状氧化物薄膜电极的制备及其除盐性能	王婷,朱春山,胡承志 (602)
微生物对砷的氧化还原竞争	杨婷婷,柏耀辉,梁金松,霍旻,王明星,袁林江 (609)
处理水产养殖污水潜流湿地中的厌氧氨氧化菌群特征	曾宪磊,刘兴国,吴宗凡,时旭,陆诗敏 (615)
污水回用中主要病原菌解析及其紫外消毒效应	景明,王磊 (622)
异养硝化-好氧反硝化菌 <i>Burkholderia</i> sp. YX02 强化连续流反应器中微生物群落结构解析	邵基伦,曹刚,李紫惠,黄郑郑,罗恺,莫测辉 (630)
基于新一代测序技术的A ² O与BIOLAK活性污泥宏基因组比较分析	田美,刘汉湖,申欣 (638)
1株海洋异养硝化-好氧反硝化菌的分离鉴定及其脱氮特性	孙庆花,于德爽,张培玉,林学政,李津 (647)
纳米Ni/Fe用于去除染料生产废水二级生物处理出水中AOX和色度的研究	舒小铭,徐灿灿,刘锐,赵远,陈吕军 (655)
3BER-S工艺用于再生水深度脱氮同步去除PAEs的可行性	徐鹏程,郝瑞霞,张娅,王冬月,钟丽燕,徐浩丹 (662)
合成时间对钛酸盐纳米材料的影响及其吸附水中铅的性能研究	范功端,陈丽茹,林茹晶,林茜,苏昭越,林修咏 (668)
芦苇秸秆生物炭对水中菲和1,1-二氯乙烯的吸附特性	吴晴雯,孟梁,张志豪,罗启仕,杨洁 (680)
芦苇基和污泥基生物炭对水体中诺氟沙星的吸附性能	张涵瑜,王兆炜,高俊红,朱俊民,谢超然,谢晓芸 (689)
季节性温度升高对落干期消落带土壤氮矿化影响	林俊杰,张帅,刘丹,周斌,肖晓君,马慧燕,于志国 (697)
增温及秸秆施用对冬小麦田土壤呼吸和酶活性的影响	陈书涛,桑琳,张旭,胡正华 (703)
基于GIS的银川市不同功能区土壤重金属污染评价及分布特征	王幼奇,白一茹,王建军 (710)
不同产地硅藻土原位控制土壤镉污染差异效应与机制	朱健,王平,林艳,雷明婧,陈仰 (717)
紫色土对邻苯二甲酸二甲酯的淋溶吸持特征及影响因素	王强,宋娇艳,曾微,王法 (726)
几种修复措施对Cd淋失及土壤剖面运移影响	刘孝利,曾昭霞,铁柏清,陈求稳,魏祥东 (734)
河北邯郸钢铁冶炼区周边麦田土和小麦籽粒的多环芳烃含量及其组分谱特征	吴迪,汪宜龙,刘伟健,陈源琛,付晓芳,陶谢,刘文新 (740)
湿生环境中丛枝菌根(AM)对香蒲耐Cd胁迫的影响	罗鹏程,李航,王曙光 (750)
溴酸盐对水生生物的急性毒性效应	王执伟,刘冬梅,张文娟,崔福义 (756)
自组装哑铃状Fe ₃ O ₄ 微/纳米材料对十溴联苯的热催化降解	黄鑫辰,宗刚,刘烨煌,芦会杰,李倩倩,李宾克,赵彦辉,苏贵金 (765)
盐度对准好氧矿化垃圾生物反应器渗滤液处理及N ₂ O产生的影响	李卫华,孙英杰,刘子梁,马强,杨强 (775)
污泥直接干化尾气中恶臭污染物质重要性评价:以指标权重评分法为例	丁文杰,陈文和,邓明佳,罗辉,李琳,刘俊新 (782)
《环境科学》征订启事(557) 《环境科学》征稿简则(594) 信息(419,442,781)	

舟山青浜岛不同环境介质中 PAHs 的分布特征

郑煌¹, 邢新丽^{1,2*}, 顾延生^{1,2}, 桂福坤³, 祁士华^{1,2}, 黄焕芳^{1,2}

(1. 中国地质大学(武汉)环境学院, 武汉 430074; 2. 中国地质大学(武汉)生物地质与环境地质国家重点实验室, 武汉 430074; 3. 浙江海洋学院海洋科学与技术学院, 舟山 316022)

摘要: 于 2013 年 7 月在青浜岛上采集 11 个土壤样品、3 个大气被动采样样品以及周边 3 个海水样品, 分析了样品中 16 种多环芳烃(PAHs)的含量, 并对其分布特征、来源、生态风险进行了讨论。结果表明, 土壤、海水和大气中 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的含量范围分别为 60.30 ~ 123.34 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ (平均值为 105.49 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$)、45.96 ~ 101.08 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ (平均值为 66.45 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 5.09 ~ 5.41 $\text{ng}\cdot\text{d}^{-1}$ (平均值为 5.35 $\text{ng}\cdot\text{d}^{-1}$)。分布特征为: 潮汐带土壤中 PAHs 含量低于非潮汐带; 3 个海水样中, 以靠近水文条件复杂的海域内样品中的 PAHs 含量最高; 岛上大气中 PAHs 分布均匀。土壤、海水和大气中 PAHs 主要以 2~4 环的 PAHs 为主; 通过比值法和因子分析得出, 青浜岛土壤中的 PAHs 来源于煤、木炭等生物质燃烧以及柴油、汽油的燃烧, 海水和大气中的 PAHs 来源于混合源。生态风险评估结果表明青浜岛土壤和周边海水中 PAHs 生态风险较低。

关键词: 多环芳烃; 土壤; 海水; 大气; 污染源; 生态风险评估; 青浜岛

中图分类号: X131 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)02-0513-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.02.015

Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qingbang Island, Zhoushan, China

ZHENG Huang¹, XING Xin-li^{1,2*}, GU Yan-sheng^{1,2}, GUI Fu-kun³, QI Shi-hua^{1,2}, HUANG Huan-fang^{1,2}

(1. School of Environmental Studies, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 2. State Key Laboratory of Biogeology and Environmental Geology, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China; 3. Marine Science and Technology College, Zhejiang Ocean University, Zhoushan 316022, China)

Abstract: Eleven soil, three seawater and three passive air samples were collected from Qingbang Island in July, 2013, and 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed. The distribution characteristics, possible sources and ecological risk assessment were investigated. The results showed that the concentrations of total 16 PAHs ranged between 60.30 and 123.34 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ with a mean value of 105.49 $\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ in soil, 45.96-101.08 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ with a mean value of 66.45 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ in seawater and 5.09-5.41 $\text{ng}\cdot\text{d}^{-1}$ with a mean value of 5.35 $\text{ng}\cdot\text{d}^{-1}$ in air samples, respectively. The PAHs concentrations of soil samples in tidal zone were higher than those in other areas. The highest PAHs concentrations in seawater were detected in complicated hydrological sea area. PAHs concentrations in air were equally distributed around the island. 2-4 rings PAHs were dominant species in soil, water and air samples. Ratio method and factor analysis were used to identify the possible sources of PAHs. The result suggested that PAHs in soil were mainly originated from combustion of coal, wood, diesel and petrol, while the possible sources of PAHs in water and air were mixed. The ecological risk assessment indicated that PAHs in different environment media posed little risk to people.

Key words: PAHs; soil; seawater; air; pollution sources; ecological risk assessment; Qingbang Island

多环芳烃(PAHs)是指一类分子中含有 2 个或 2 个以上苯环的碳氢化合物,具有致畸、致癌、致突变作用,为持久性污染物有机污染物的一类^[1]。美国环保署在 1987 年将其中 16 种 PAHs 规定为重点监测污染物^[2]。依据 PAHs 的环数和分子量不同,可以将其分为三大类:低分子量(LMW, 2、3 环)、中分子量(MMW, 4 环)、高分子量(HMW, 5、6 环)^[3]。PAHs 由于其持久性,远距离迁移性而广泛存在于土壤、水体、和大气等环境介质中^[4~6]。进入各种环境介质中的 PAHs 通过食物链等方式进入人体,给人类健康带来巨大风险而受到人们的广泛关注。

青浜岛位于浙江省舟山群岛,是 1 390 个大大小小岛屿中的一个,位于舟山本岛东北约 53 km。舟山群岛因其生物多样性,丰富的渔业资源和旅游资源,具有重要的经济价值和科研价值。已有学者对舟山本岛土壤及近海水体、沉积物中的 PAHs 浓度水平,生态风险进行研究分析^[7~9]。但对于舟山诸多岛屿各环境介质中的 PAHs 浓度水平,空间分布,生态风险评估却鲜有报道。本研究以青浜岛为代表,讨论

收稿日期: 2015-08-28; 修订日期: 2015-10-11

基金项目: 国家自然科学基金项目(41103065); 院士工作站合作项目(2013046383)

作者简介: 郑煌(1991~),男,硕士研究生,主要研究方向为环境地球化学, E-mail: 370707232@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: xingxinli5300225@163.com

了青浜岛土壤、大气及周边海水中 PAHs 的含量、分布、来源及生态风险,以期为舟山群岛水、土、气中 PAHs 的管控提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

青浜岛长 2.45 km,宽 0.8 km,面积 1.45 km²,滩地面积 2.37 km²,海岸线长 10.5 km. 依据近水环境保护标准规定,滨海城镇占用岸线长度 5~30 km 一般布设两个点位. 由于该海域接受 3 个主要方位的

海水交换,因此,于 2013 年 7 月在青浜岛周边设置 3 个海水采样点(W01、W02、W03). 水样储存于玻璃瓶中,运回实验室低温保存至液液萃取. 选取典型剖面,用不锈钢铲采集表层土壤(0~20 cm)样品 11 个(S01~S11). 所采集的土壤样品用铝箔包裹后置于密实袋中保存于冰箱中(-4℃)直至制样分析. 与此同时,利用 PUF 大气被动采样器采集了 3 个气体样(A01、A02、A03,采样时间为 2013-07-08~2013-11-02,共计 117 d),具体方法见文献[10]. 所有采样点的地理坐标用 GPS 记录下来,如图 1 所示.

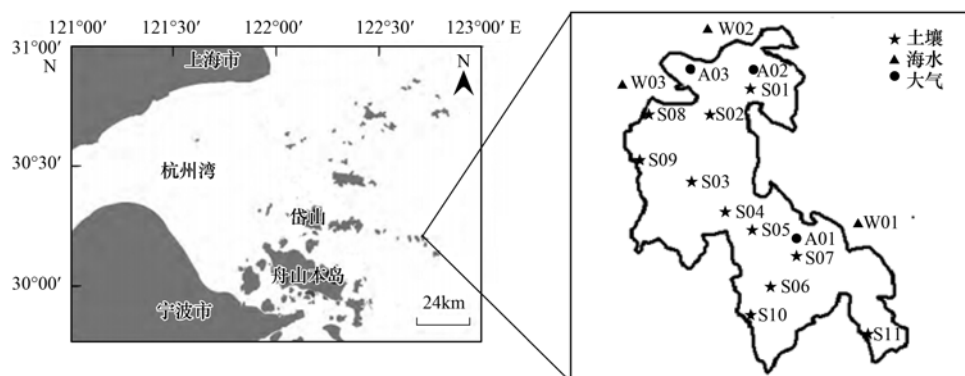


图 1 青浜岛周边海域^[8]及采样点分布示意

Fig. 1 Surrounding areas and sampling sites of Qingbang Island

1.2 样品预处理

土壤样品:土壤样品置于实验室内,室温下风干,过 100 目不锈钢筛. 称取 10 g(精确至 0.001 g)用经二氯甲烷抽提过的滤纸包样,加入回收率指示物,用 120~140 mL 二氯甲烷索式抽提 24 h,并用铜片脱硫. 抽提液在旋转蒸发仪(温度为 40℃)上浓缩至 5 mL,加入 5~10 mL 正己烷继续浓缩至 5 mL. 浓缩液通过装有去活化的硅胶氧化铝(体积比 2:1)的层析柱净化分离. 用二氯甲烷和正己烷(体积比 2:3)混合液淋洗. 淋洗液浓缩至 0.5 mL,转移至 2 mL 样品瓶,用高纯氮气吹至 0.5 mL,加入内标化合物六甲基苯后置于冰箱中待分析.

海水样品:量取 1 L 水样于分液漏斗中,加入 25 mL 二氯甲烷及回收率指示物,用二氯甲烷重复萃取 3 次. 将通过无水硫酸钠吸水收集到的萃取物在旋转蒸发仪上(40℃)浓缩至约 5 mL,将浓缩液通过硅胶/氧化铝层析柱(体积比 2:1)进行净化分离,用 25 mL 的二氯甲烷/正己烷(体积比 2:3)混合液淋洗柱体. 洗脱液再次经旋转蒸发浓缩至 0.5 mL,然后转移至 2 mL 的样品瓶中,在氮吹仪上使用柔和的高纯氮气流浓缩至 0.5 mL,加入内标化合物六甲基苯置于冰箱中待分析.

大气样品:采样后的 PUF 膜放入索式抽提器,加入回收率指示物,用二氯甲烷抽提 48 h. 后续实验步骤同土壤样品的预处理.

1.3 仪器分析和试剂标准

采用 Agilent 公司气相色谱(6890N)-质谱(5975)分析了样品中 16 种优控 PAHs: 萘(Nap, 2 环)、二氢萘(Acy, 2 环)、萘(Ace, 2 环)、芴(Flu, 2 环)、菲(Phe, 3 环)、蒽(Ant, 3 环)、荧蒽(Fla, 3 环)、芘(Pyr, 4 环)、苯并[a]蒽(BaA, 4 环)、䓑(Chr, 4 环)、苯并[b]荧蒽(BbF, 4 环)、苯并[k]荧蒽(BkF, 4 环)、苯并[a]芘(BaP, 5 环)、茚并[1,2,3-cd]芘(InP, 5 环)、二苯并[a,h]蒽(DahA, 5 环)、苯并[g,h,i]芘(BghiP, 6 环). 色谱柱为 DB-5MS 熔融石英毛细柱(30 m × 0.25 mm × 0.25 μm). 色谱柱程序升温: 初始温度 80℃, 保持 2 min; 以 4℃·min⁻¹, 升至 290℃, 保持 25 min, 直至所有组分从色谱柱中流出. 进样口温度为 280℃, 载气为高纯氦气(99.999%), 流速为 1 mL·min⁻¹, 不分流进样, 进样量为 1 μL.

质谱条件:电子轰击源能量为 70 eV, 离子源温度为 230℃, 接口温度为 280℃, 四级杆温度为 150℃, 质谱扫描范围(*m/z*)为 35~450 u, 扫描速率

为每秒一次.

所用有机试剂:正己烷、丙酮均为色谱纯,购自美国 Tedia 公司;二氯甲烷(色谱纯)购自美国 JT Baker 公司.中性氧化铝(100~200 目)、硅胶,经二氯甲烷抽提 48 h 后,分别在 240℃ 和 180℃ 条件下烘 12 h,冷却后加入其质量的 3% 去离子水去活化,平衡后置于干燥器中备用.无水硫酸钠为分析纯,在马弗炉中 450℃ 焙烧 4 h,干燥备用.

1.4 质量保证与质量控制(QA/QC)

以氘代 PAHs: Naphthalene-d8、Aceaphtene-10、Phenanthrened-10、Chrysene-d12、Perylene-d12 混合标样作为回收率指示物,用空白样品和平行样品对样品处理进行质量控制与保证.土壤、水样和大气样品的回收率分别为 71%~97%、63%~78%、73%~85%.本研究使用的数据均经过回收率和空白校正.各组分的方法检出限为最低浓度标样(0.2 mg·L⁻¹)重复测定 7 次求得标准偏差的 3 倍(MDL=3δ):Nap 为 0.13 ng·g⁻¹;Acy 为 0.28 ng·g⁻¹;Ace 为 0.47 ng·g⁻¹;Flu 为 0.09 ng·g⁻¹;Phe 为 0.01 ng·g⁻¹;Ant 为 0.05 ng·g⁻¹;Fla 为 0.03 ng·g⁻¹;Pyr 为 0.03 ng·g⁻¹;BaA 为 0.02 ng·g⁻¹;Chr 为 0.04 ng·g⁻¹;BbF 为 0.04 ng·g⁻¹;BkF 为 0.04 ng·g⁻¹;BaP 为 0.01 ng·g⁻¹;DahA 为 0.03 ng·g⁻¹;BgHiP 为 0.01 ng·g⁻¹;InP 为 0.01 ng·g⁻¹.

2 结果与讨论

2.1 PAHs 的含量及分布

2.1.1 土壤

不同环境介质中 PAHs 的总量($\sum_{16} \text{PAHs}$)如表 1 所示.在 11 个土壤样品中,16 种优先控制 PAHs 均被检出,表明青浜岛土壤中的 PAHs 残留普遍存在.土壤中 PAHs 的含量范围为 60.30~123.34 ng·g⁻¹,均值为 105.49 ng·g⁻¹.7 种致癌 PAHs [$\sum \text{C-PAHs}$: BaA、Chr、BbF、BkF、BaP、InP、DahA]与 $\sum_{16} \text{PAHs}$ 的比值介于 0.41~0.52 之间. S01~S08 点的 PAHs 含量均在 100 ng·g⁻¹ 以上. PAHs 由于水溶性低,辛醇-水分配系数高,80% 以上分配富集在沉积物的有机质中^[11],研究表明总有机碳(TOC)与 PAHs 的含量存在良好线性关系^[12]. S01~S08 点远离潮汐带,所在土壤类型为灰黑色壤土,有机质含量较高,可能是 PAHs 含量较高的原因.其中 S07 和 S08 位于西福寺后,受人为活动的影响大于其他点位,因此这两点的 PAHs 含量较高,都达到 120 ng·g⁻¹ 以上. S09~S11 这 3 点位于潮汐带,PAHs 含量均低于 100 ng·g⁻¹,可能是受海水侵蚀的影响,与对天津高沙岭潮间带表层沉积物中多环芳烃的研究相似,即离海越近,PAHs 的含量越低^[13].

表 1 青浜岛不同环境介质中 PAHs 的含量¹⁾

PAHs	土壤/ng·g ⁻¹		海水/ng·L ⁻¹		大气/ng·d ⁻¹	
	范围	均值	范围	均值	范围	均值
Nap	5.03~8.57	7.55	17.97~62.01	35.82	0.49~0.52	0.50
Acy	0.43~1.01	0.67	ND~2.90	1.30	0.03~0.06	0.04
Ace	0.80~1.55	1.12	1.30~1.75	1.52	0.12~0.13	0.12
Flu	2.60~4.54	3.18	1.65~3.52	2.59	0.25~0.28	0.27
Phe	10.12~16.49	13.24	5.81~9.74	7.62	1.07~1.13	1.10
Ant	4.32~12.30	9.93	2.72~5.46	3.70	0.43~0.48	0.46
Fla	0.66~2.10	1.20	ND~1.12	0.60	0.08~0.11	0.10
Pyr	3.21~8.98	7.38	2.20~4.62	3.24	0.36~0.40	0.38
BaA	1.50~4.70	3.58	1.24~4.53	2.40	0.17~0.20	0.18
Chr	5.68~17.81	12.99	1.68~5.39	4.04	0.46~0.52	0.49
BbF	5.44~16.40	12.73	0.67~1.55	0.989	0.38~0.67	0.56
BkF	4.05~12.42	8.63	0.42~0.82	0.66	0.20~0.36	0.30
BaP	3.06~7.57	5.76	0.81~2.28	1.32	0.20~0.37	0.27
InP	3.38~11.83	8.03	ND~0.42	0.14	0.22~0.26	0.24
DahA	3.24~10.32	6.01	ND~0.88	0.40	0.21~0.24	0.22
BghiP	1.36~4.79	3.46	ND~0.33	0.11	0.07~0.12	0.10
$\sum \text{C-PAHs}$	28.18~72.44	57.75	8.51~11.47	29.86	1.97~2.48	2.27
$\sum_{16} \text{PAHs}$	60.30~123.34	105.49	45.96~101.08	66.45	5.09~5.41	5.35

1) ND 为未检出

国内外其他地区 PAHs 的含量见表 2. 舟山青
浜岛土壤中 16 种优控 PAHs 的含量范围比厦门岛
工业区低一个数量级^[14]、平均含量比上海崇明
岛^[15]、意大利 Isola delle Femmine 地区^[16] 低一倍左
右. 在经济发达地区,人口密度大,工厂密布,车辆、
电力、钢铁等行业对于石油、煤炭的需求量大,使
得这些区域土壤中的 PAHs 含量较高. 有研究表
明,PAHs 与人类活动有关的某些指标(GDP、能源
消耗量)存在很好的相关性^[17]. 青浜岛土壤中
PAHs 含量高于处于偏远地区的青藏高原东部^[18] 以
及西沙群岛^[19].

2.1.2 海水

3 个海水样品中,W03 中 16 种优控 PAHs 均被检
出. W01 中 Acy、Fla、InP、BghiP 以及 W02 中 InP、
DahA、BghiP 未检出. W01 ~ W03 中 PAHs 的检出率
分别为 75%、100%、81.25%. 海水中溶解相 PAHs
的含量范围为 45.96 ~ 101.08 ng·L⁻¹,均值为 66.45
ng·L⁻¹. $\sum C\text{-PAHs} / \sum_{16} \text{PAHs} < 0.23$. 3 个水样
中 W03 点的含量最高,W01 最低. 结合图 1 可知,舟
山及邻近海域位于东海西北部的陆架浅海区,海区内

水文要素复杂. 来自长江的巨量淡水,高温、次高盐
的台湾暖流,东亚季风、特殊的海底地形等因素使得
研究区域出现“冲淡水转向”、“上升流”、“锋面迁
移”等诸多现象,这些因素共同作用导致来自长江淡
水中的硝酸和硅酸营养盐及台湾暖流中的磷酸盐不
断补充表层海水中的营养物质,与此同时也带来了大
量的污染物^[20~22]. 而 W03 较其他两点更加靠近这一
区域,因此 PAHs 含量最高.

为了更好了解青浜岛周边海水中 PAHs 的含量
水平,将其与国内外其他海域中 PAHs 的含量进行
比较(见表 2). 结果表明,青浜岛周边海水中的
PAHs 含量略低于同样位于舟山群岛的摘箬山岛^[23]
以及舟山近海水体^[8] 中的 PAHs (含量范围分别为
44.62 ~ 240.91 ng·L⁻¹、382.3 ~ 816.9 ng·L⁻¹). 同
时也低于青岛近岸河口区^[24]、希腊 Saronikos 海
湾^[5] (含量范围分别为 75.70 ~ 272.02 ng·L⁻¹、103
~ 459 ng·L⁻¹). 相较于西地中海海洋保护区^[25] 和
波斯湾海域^[26] (含量范围分别为 8.5 ~ 76.5
ng·L⁻¹、1.5 ~ 3.6 ng·L⁻¹),青浜岛周边海水中
PAHs 含量处于较高水平.

表 2 不同地区土壤和海水中的 PAHs 含量比较¹⁾

Table 2 Comparison of PAHs concentrations in soil and seawater of different regions

介质	研究区域	$\sum \text{PAHs}$			环数	文献
		PAHs	含量范围	均值		
土壤	厦门岛工业区	16	1 408 ~ 8 845	—	4 ~ 6	[14]
	上海崇明岛	14	24.92 ~ 1 014.61	192.83	2 ~ 4	[15]
	Isola delle Femmine Italy	16	35 ~ 545	139.3	4 ~ 5	[16]
	青藏高原东部	15	0.83 ~ 14.41	3.98	2 ~ 3	[18]
	西沙群岛	16	N. D	N. D	—	[19]
海水	舟山摘箬山岛	16	44.62 ~ 240.91	—	2 ~ 4	[23]
	舟山近海	16	382.3 ~ 816.9	552.5	2 ~ 3	[8]
	青岛近海河口区	15	75.70 ~ 272.02	150.33	2 ~ 3	[24]
	Saronikos 海湾,希腊	17	103 ~ 459	—	2 ~ 4	[5]
	海洋保护区,西地中海	18	8.5 ~ 76.5	—	—	[25]
	波斯湾	14	1.5 ~ 3.6	2.8	2 ~ 4	[26]

1) 土壤: ng·g⁻¹; 海水: ng·L⁻¹; N. D 为未检出; “—”表示无数据

2.1.3 大气

PUF 被动采样器所测得大气中 PAHs 的浓度可
以由下面的公式求出:

$$c_{\text{PAHs}} = M_{\text{PAHs}} / R_s \cdot D_s$$

式中, c_{PAHs} 为大气中 PAHs 的浓度 (ng·m⁻³), M_{PAHs} 为
PUF 膜中的 PAHs 含量 (ng), R_s 为采样速率, D_s 为采
样天数. PUF 被动采样器的采样速率一般为 (3.78 ±
1.83) m³·d⁻¹^[27], 采样速率 R_s 通常受温度、风速、化
合物分子量大小等因素影响,在实际采样过程中需要
通过主动采样器进行校正. 由于本研究中缺乏主动

采样器对采样速率进行校正,因此计算时不考虑采样
速率,大气中 PAHs 含量的单位为 ng·d⁻¹.

由于 PUF 能同时采集气态和颗粒态中的
PAHs. 因此 3 个大气样品中,16 种优控 PAHs 均被
检出,含量范围为 5.09 ~ 5.41 ng·d⁻¹,均值为 5.35
ng·d⁻¹,变异系数为 4.25%. 7 种致癌 PAHs 的含量
范围为 1.97 ~ 2.48 ng·d⁻¹,均值为 2.27 ng·d⁻¹. 由
于青浜岛处于中纬度地区,受太平洋海洋性气候的
影响,岛上的空气处于完全混合状态,大气自净能力
强. 因此青浜岛大气中 PAHs 的含量无明显差异.

2.2 组成及来源分析

2.2.1 组成分析

青浜岛不同环境介质中 PAHs 的构成如图 2 所示. 土壤中 PAHs 低、中、高分子量的 PAHs 的百分比分别为 34.98%、42.96%、22.06%. 就各单体 PAHs 而言, 土壤中 Phe 所占比例最大, 其次为 Chr. 海水中溶解相的低分子量 PAHs 所占比例高达

77.97%, 其中又以 Nap 所占比例最大. 海水中, 低分子量的 PAHs 所占比例大于重分子, 是因为低分子量的 PAHs 水溶性强于重分子量 PAHs, 且重分子量的 PAHs 易于吸附在水中的颗粒物以及水底沉积物中. 大气中 (包括气态和颗粒态), 各分子量的 PAHs 所占百分比依次为 LMW (49.48%) > MMW (34.03%) > HMW (16.48%).

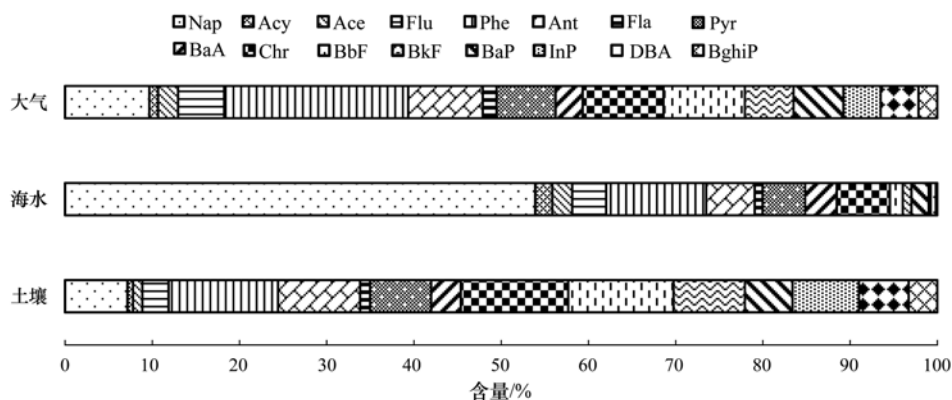


图 2 青浜岛不同环境环境介质中 PAHs 的构成

Fig. 2 Composition of PAHs in different environmental media of Qingbang Island

PAHs 的组分构成包含了环境介质中 PAHs 来源的重要信息. 来自化石燃料等的不完全燃烧产生的 PAHs 中, 以 4~6 环的 PAHs (HPAHs) 为主; 但来自石油泄漏及其产品中, PAHs 中以 2~3 环的 PAHs (LPAHs) 为主^[28], 由此可以初步判断出青浜岛土壤中的 PAHs 来源于燃烧.

2.2.2 来源分析

PAHs 由于其自身溶解性、吸附性、挥发性等存在差异, 会在环境介质中发生迁移转化. 因此在实际操作中, 往往选择相对分子质量相同且具有一定稳定性的同分异构体多环芳烃作为源解析. 例如 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 大于 0.1 时, PAHs 来源于有机物燃烧、人类工业活动以及自然大火等, 小于 0.1 时, 来源于石油及其提炼产品; 当 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 小于 0.4 时, 为石油来源, 大于 0.5 时, 为草、木材、煤炭等生物质燃烧, 介于 0.4 与 0.5 之间, 则为化石燃料燃烧; $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 小于 0.2 为石油类物质泄漏, 大于 0.35 则主要是燃烧来源, 而位于 0.2 与 0.35 之间则可能是油污染与燃烧污染的混合^[28]. 研究表明, 利用 4~6 环的 PAHs 比值来进行源解析比低环 PAHs 所得的结果更加可靠^[29].

HPAHs/LPAHs 和 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ 比值法适用于土壤、沉积物中 PAHs 的源解析^[12,30]. 考虑到 W01 和 W02 海水样品中 Fla、InP、BghiP 单体未检出, 因此海水和大气样品中 PAHs 的来源采用 $\text{Ant}/$

$(\text{Ant} + \text{Phe})$ 和 $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chr})$ ^[5,28] 比值进行分析.

由图 3 可以看出, 青浜岛土壤样品中的 PAHs 来源于石油泄漏和高温燃烧及其混合源; 海水和大气中 PAHs 的来源较为相似, 主要表现为混合来源, 仅 W02 点表现为高温燃烧. 说明青浜岛渔业和旅游业用船所致的石油泄漏和燃烧成为青浜的海水和大气中 PAHs 的来源.

青浜岛位于东海内陆架, 该区域中 PAHs 的主要来源为长江入海水沙, 但由于长江口颗粒物的絮凝沉淀作用使海水得到净化^[31]. 此外, 在开放海域中, 几乎没有明显的污染点源, 由洋流带来的 PAHs 含量有限^[32]. 因此, 青浜岛本地渔业和旅游业所致的石油泄漏和燃烧的贡献大于长江冲淡水和洋流的交汇作用.

为了进一步分析土壤中 PAHs 来源于何种燃烧, 采用因子分析对土壤中的 PAHs 进行源解析 (表 3). 由于 Nap 的挥发性较强且波动性较大, 在因子分析过程中可能会掩盖其他组分的特征, 因此选择其他 15 种 PAHs 进行因子分析. 采用主成分提取特征值大于 1 的因子并结合具有 Kaiser 标准化的正交旋转法. 旋转后的因子 1, 因子 2 和因子 3 分别占据总方差的 37.74%、37.42%、14.63%, 累计占有率为 89.79%. Flu、Phe、Fla、Ant、Pyr、Chr 在因子 1 上的载荷较大, 而 Pyr、Phe、和 Fla 是指示煤、木炭

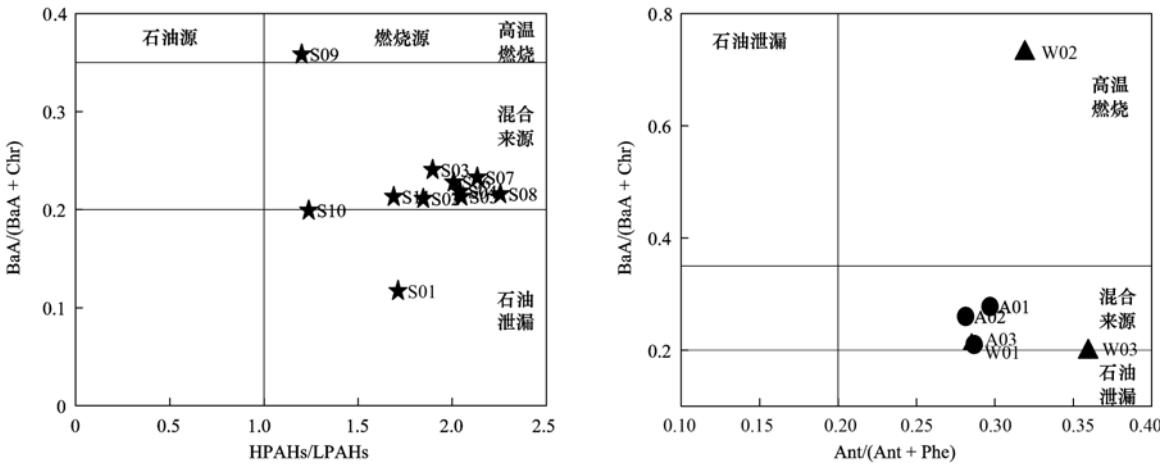


图3 青浜岛不同环境介质中 PAHs 来源分析

Fig. 3 Source identification of PAHs in different environmental media of Qingbang Island

表3 青浜岛土壤中 PAHs 的因子分析¹⁾

Table 3 Factor analysis for PAHs in soil of Qingbang Island

PAHs	主成分		
	1	2	3
Acy	—	—	—
Ace	—	—	—
Flu	0.849	—	—
Phe	0.665	—	—
Ant	0.658	0.696	—
Fla	0.957	—	—
Pyr	0.631	0.686	—
BaA	—	0.854	—
Chr	0.770	0.528	—
BbF	—	0.926	—
BkF	—	—	0.877
BaP	—	0.965	—
Inp	0.508	0.794	—
DahA	—	0.829	—
BghiP	0.860	—	—

1) “—”表示 PAHs 在该主成分上的因子载荷小于 0.5

燃烧的指示物^[33]. 因此,因子1为煤、木炭的燃烧; BaA、BbF、BaP、InP、DahA在因子2上的载荷较大,而InP、BbF是油类(柴油、汽油等)燃烧的指示物^[33]. 因此,因子2是石油燃烧源;因子3中,只有BkF的载荷超过0.5,其他组分的载荷都比较小. 由于因子3反映的信息较少,无法推测合理的来源. 因子分析表明土壤中的PAHs来源于煤、木炭等生物质燃烧以及柴油、汽油的燃烧.

2.3 风险评价

目前,我国海水水质标准和环境空气质量标准中只规定了BaP的浓度,展览会用地土壤环境质量评价标准(暂行)中规定了14种PAHs的浓度(Ace、

Acy除外). 依据上述标准,青浜岛土壤、海水和大气中的PAHs浓度未达到污染水平.

利用PAHs毒性当量浓度(TEQ_{PAHs})对青浜岛土壤和周边海水中的PAHs进行健康风险评价. 计算得出青浜岛土壤和海水中16种PAHs的毒性当量浓度平均值分别为15.99 ng·g⁻¹和2.36 ng·L⁻¹. 分别低于荷兰土壤目标参考值(33 ng·g⁻¹, 10种PAHs的毒性当量浓度)加拿大水环境质量指导标准值(10.41 μg·L⁻¹, 9种PAHs的毒性当量浓度). 说明青浜岛土壤和周边海水潜在的生态风险较低.

3 结论

(1)土壤、海水和大气中 $\sum_{16}$ PAHs的浓度范围分别为60.30 ~ 123.34 ng·g⁻¹(平值为105.49 ng·g⁻¹)、45.96 ~ 101.08 ng·L⁻¹(平值为66.45 ng·L⁻¹)、5.09 ~ 5.41 ng·d⁻¹(平均值为5.35 ng·d⁻¹). 潮汐带土壤中PAHs含量低于非潮汐带; 3个海水样中,以靠近水文条件复杂的海域内样品中的PAHs含量最高;青浜岛大气中的PAHs分布均匀且含量处于背景值范围内.

(2)青浜岛土壤中的PAHs来源于煤、木炭等生物质燃烧以及柴油、汽油的燃烧;海水和大气中的PAHs主要是石油泄漏与高温燃烧的混合.

(3)青浜岛上土壤和周边海水中PAHs的生态风险较低.

致谢:感谢浙江海洋学院徐士元、苗曾良、陈永久、赵晟、崔大练等老师在野外采样过程中提供的帮助,感谢中国地质大学环境学院江晓宇、兰亭

玉等同学在样品分析过程中的帮助。

参考文献:

- [1] Freeman D J, Cattell F C R. Woodburning as a source of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. Environmental Science & Technology, 1990, **24**(10): 1581-1585.
- [2] EPA U S. Quality criteria for water[R]. Government Printing Office, 1976, **91**(43): 395.
- [3] ATSDR. Toxicological profile for polycyclic aromatic hydrocarbons[R]. USEPA Agency for Toxic Substances and Disease Registry, Atlanta, 1990. 231.
- [4] Bortey-Sam N, Ikenaka Y, Nakayama S M M, et al. Occurrence, distribution, sources and toxic potential of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in surface soils from the Kumasi Metropolis, Ghana[J]. Science of the Total Environment, 2014, **496**: 471-478.
- [5] Valavanidis A, Vlachogianni T, Triantafyllaki S, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in surface seawater and in indigenous mussels (*Mytilus galloprovincialis*) from coastal areas of the Saronikos Gulf (Greece) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2008, **79**(4): 733-739.
- [6] Pozo K, Estellano V H, Harner T, et al. Assessing polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) using passive air sampling in the atmosphere of one of the most wood-smoke-polluted cities in Chile: The case study of Temuco [J]. Chemosphere, 2015, **134**: 475-481.
- [7] 母清林, 柴小平, 张庆红, 等. 舟山群岛潮间带表层沉积物中多环芳烃分布特征[J]. 环境化学, 2014, **33**(12): 2208-2209.
- [8] 江敏, Le H T, 梅卫平, 等. 舟山近海水体和沉积物中多环芳烃分布特征[J]. 环境科学, 2014, **35**(7): 2672-2679.
- [9] 黄宏. 粤东沿海及舟山群岛多环芳烃污染调查研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2006.
- [10] 刘向, 张干, 李军, 等. 利用 PUF 大气被动采样技术监测中国城市大气中的多环芳烃[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 26-31.
- [11] 吴启航, 麦碧嫻, 杨清书, 等. 沉积物中多环芳烃和有机氯农药赋存状态[J]. 中国环境科学, 2004, **24**(1): 89-93.
- [12] Huang W X, Wang Z Y, Yan W. Distribution and sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments from Zhanjiang Bay and Leizhou Bay, South China [J]. Marine Pollution Bulletin, 2012, **64**(9): 1962-1969.
- [13] 聂利红, 刘宪斌, 降升平, 等. 天津高沙岭潮间带表层沉积物中多环芳烃的分布及风险评价[J]. 矿物岩石, 2008, **28**(2): 113-117.
- [14] 芦敏, 袁东星, 欧阳通, 等. 厦门岛表土中多环芳烃来源分析及健康风险评估[J]. 厦门大学学报(自然科学版), 2008, **47**(3): 451-456.
- [15] 吕金刚, 毕春娟, 陈振楼, 等. 上海市崇明岛农田土壤中多环芳烃分布和生态风险评价[J]. 环境科学, 2012, **33**(12): 4270-4275.
- [16] Orecchio S. Assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soil of a natural reserve (isola delle femmine) (Italy) located in front of a plant for the production of cement [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, **173**(1-3): 358-368.
- [17] 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.
- [18] 孙娜, 陆晨刚, 高翔, 等. 青藏高原东部土壤中多环芳烃的污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2007, **28**(3): 664-668.
- [19] 王瑞. 西沙群岛土壤环境特征分析及质量评价[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [20] 周名江, 颜天, 邹景忠. 长江口邻近海域赤潮发生区基本特征初探[J]. 应用生态学报, 2003, **14**(7): 1031-1038.
- [21] 胡明娜, 赵朝方. 舟山及邻近海域上升流长周期的遥感观测与分析[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2007, **37**(S1): 235-240.
- [22] 张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 等. 舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(1): 266-273.
- [23] 王雅玉, 周溶冰, 秦华伟, 等. 舟山嵛山岛表层海水和沉积物中多环芳烃含量、来源与风险评价[A]. 见: 浙江省环境科学学会 2014 年学术年会论文集[C]. 杭州: 浙江省环境科学学会, 2014.
- [24] 李先国, 邓伟, 周晓, 等. 青岛近岸表层海水中 PAHs 的分布特征及物源初步解析[J]. 环境科学, 2012, **33**(3): 741-745.
- [25] Marrucci A, Marras B, Campisi S S, et al. Using SPMDs to monitor the seawater concentrations of PAHs and PCBs in marine protected areas (Western Mediterranean) [J]. Marine Pollution Bulletin, 2013, **75**(1-2): 69-75.
- [26] Mirza R, Mohammadi M, Dadolahi Sohrab A, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons in seawater, sediment, and Rock Oyster *Saccostrea cucullata* from the northern part of the Persian Gulf (Bushehr Province) [J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2012, **223**(1): 189-198.
- [27] He J, Balasubramanian R. A comparative evaluation of passive and active samplers for measurements of gaseous semi-volatile organic compounds in the tropical atmosphere[J]. Atmospheric Environment, 2010, **44**(7): 884-891.
- [28] 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.
- [29] Zhang X L, Tao S, Liu W X, et al. Source diagnostics of polycyclic aromatic hydrocarbons based on species ratios: A multimedia approach[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(23): 9109-9114.
- [30] Mostafa A R, Wade T L, Sweet S T, et al. Distribution and characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in sediments of Hadramout coastal area, Gulf of Aden, Yemen [J]. Journal of Marine Systems, 2009, **78**(1): 1-8.
- [31] 郭志刚, 杨作升, 范德江, 等. 长江口泥质区的季节性沉积效应[J]. 地理学报, 2003, **58**(4): 591-597.
- [32] 林田, 胡利民, 郭志刚. 东海表层水体中的多环芳烃及其沉积通量估算[J]. 海洋学报, 2014, **36**(8): 12-18.
- [33] Larsen R K, Baker J E. Source apportionment of polycyclic aromatic hydrocarbons in the urban atmosphere: a comparison of three methods[J]. Environmental Science & Technology, 2003, **37**(9): 1873-1881.

CONTENTS

Editor's comment	(403)
Risk Assessment and Risk Management of Chemicals in China	WANG Tie-yu, ZHOU Yun-qiao, LI Qi-feng, <i>et al.</i> (404)
Application of Land-use Regression Models in Spatial-temporal Differentiation of Air Pollution	WU Jian-sheng, XIE Wu-dan, LI Jia-cheng (413)
Ecological Footprint Evolution Characteristics and Its Influencing Factors in China from 2000 to 2010	HUANG Bao-rong, CUI Shu-hong, LI Ying-ming (420)
Pollution Characteristics and Sources of Carbonaceous Aerosol in PM _{2.5} During Winter in Guanzhong Area	TIAN Peng-shan, CAO Jun-ji, HAN Yong-ming, <i>et al.</i> (427)
Chemical Composition of the Single Particle Aerosol in Winter in Nanning Using SPAMS	LIU Hui-lin, SONG Hong-jun, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (434)
Correlation Analysis Between Characteristics of VOCs and Ozone Formation Potential in Summer in Nanjing Urban District	YANG Xiao-xiao, TANG Li-li, ZHANG Yun-jiang, <i>et al.</i> (443)
Seasonal Dynamics of Airborne Pollens and Its Relationship with Meteorological Factors in Beijing Urban Area	MENG Ling, WANG Xiao-ke, OUYANG Zhi-yun, <i>et al.</i> (452)
Mercury Distribution Characteristics and Atmospheric Mercury Emission Factors of Typical Waste Incineration Plants in Chongqing	DUAN Zhen-ya, SU Hai-tao, WANG Feng-yang, <i>et al.</i> (459)
Characteristics of Atmospheric Dry and Wet Deposition of Trace Metals in the Hinterland of the Three Gorges Reservoir, China	ZHANG Liu-yi, LIU Yuan, QIAO Bao-qing, <i>et al.</i> (466)
Monitoring and Analysis of Stable Isotopes of the Near Surface Water Vapor in Changsha	XIE Yu-long, ZHANG Xin-ping, YAO Tian-ci, <i>et al.</i> (475)
Mercury Transport from Glacier to Runoff in Typical Inland Glacial Area in the Tibetan Plateau	SUN Xue-jun, WANG Kang, GUO Jun-ming, <i>et al.</i> (482)
Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metals in Core Sediments from Lakes of Tibet	GUO Bi-xi, LIU Yong-qin, ZHANG Fan, <i>et al.</i> (490)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Surface Sediments of Inflow Rivers to Northeastern Lake Tanganyika	YU Cheng, CHEN Shuang, ZHANG Lu (499)
Over One Hundred Year Sediment Record of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Lake Bosten, Xinjiang	SHEN Bei-bei, WU Jing-lu, ZHAO Zhong-hua, <i>et al.</i> (507)
Distribution Characteristics of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Different Environmental Media from Qinghai Island, Zhoushan, China	ZHENG Huang, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (513)
Transformation of Non-point Source Soluble Nitrogen in Simulated Drainage Ditch	LI Qiang-kun, SONG Chang-ji, HU Ya-wei, <i>et al.</i> (520)
Influence of Landscape Heterogeneity on Total Nitrogen Concentration in Zhongtian River Watershed	WANG Jing-ping, LI Zhao-fu, LIU Hong-yu, <i>et al.</i> (527)
Nitrogen Release from Sediment Under Dry and Rainy Season Alternation and Its Contribution to N Export from Xiangxi Watershed in Jiangxi Province	HAN Ning, HAO Zhuo, XU Ya-juan, <i>et al.</i> (534)
Spatial and Temporal Distributions of Nitrogen and Phosphate in the Chaohu Lake	XI Shan-shan, ZHOU Chun-cai, LIU Gui-jian, <i>et al.</i> (542)
Phosphorus Fractions and Release Risk in Surface Sediments of an Agricultural Headwater Stream System in Hefei Suburban, China	PEI Ting-ting, LI Ru-zhong, GAO Su-di, <i>et al.</i> (548)
Surface Property and Sorption Characteristics of Phosphorus onto Surface Sediments in Sanggou Bay	ZHU Jia-mei, CAO Xiao-yan, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (558)
Particle Size Distribution and Pollutant Speciation Analyses of Stormwater Runoff in the Ancient Town of Suzhou	LI Huai, WU Wei, TIAN Yong-jing, <i>et al.</i> (565)
Abundance of Toxic and Non-toxic <i>Microcystis</i> sp. in Lake Hongze and Its Correlation with Environmental Factors	LI Da-ming, ZHANG Tong-qing, TANG Sheng-kai, <i>et al.</i> (573)
Effect of Charge-Transfer Complex on Ultraviolet-Visible (UV-Vis) Absorption Property of Chromophoric Dissolved Organic Matter (CDOM) in Waters of Typical Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Areas	JIANG Tao, LIANG Jian, ZHANG Mu-xue, <i>et al.</i> (580)
Influence of pH on Kinetics of Anilines Oxidation by Permanganate	WANG Hui, SUN Bo, GUAN Xiao-hong (588)
Effects of EDTA on the Reductive Dechlorination of 2,4-D by Pd/Fe	ZHOU Hong-yi, NIE Ya-zhong, CHEN Yong, <i>et al.</i> (595)
Preparation of NiAl-MMO Films Electrode and Its Capacitive Deionization Property	WANG Ting, ZHU Chun-shan, HU Cheng-zhi (602)
Competitive Microbial Oxidation and Reduction of Arsenic	YANG Ting-ting, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (609)
Community Characteristics of ANAMMOX Bacteria in Subsurface Flow Constructed Wetland(SSFCW) for Processing of Aquaculture Waster Water	ZENG Xian-lei, LIU Xing-guo, WU Zong-fan, <i>et al.</i> (615)
Analysis of Pathogenic Bacteria in Reclaimed Water and Impact of UV Disinfection on the Removal of Pathogenic Bacteria	JING Ming, WANG Lei (622)
Analysis of the Microbial Community Structure in Continuous Flow Reactor Enhanced by Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification Bacterium <i>Burkholderia</i> sp. YX02	SHAO Ji-lun, CAO Gang, LI Zi-hui, <i>et al.</i> (630)
Comparative Metagenomics of BIOLAK and A ² O Activated Sludge Based on Next-generation Sequencing Technology	TIAN Mei, LIU Han-hu, SHEN Xin (638)
Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (647)
Removal of AOX and Chroma in Biologically Treated Effluent of Chemical Dyestuff Wastewater with Nanoscale Ni/Fe	SHU Xiao-ming, XU Can-can, LIU Rui, <i>et al.</i> (655)
Feasibility of 3BER-S Process for the Deep Denitrification in Synch with the Removal of PAEs from Reclaimed Water	XU Peng-cheng, HAO Rui-xia, ZHANG Ya, <i>et al.</i> (662)
Influence of Reaction Time on Titanate Nanomaterials and Its Adsorption Capability for Lead in Aqueous Solutions	FAN Gong-duan, CHEN Li-ru, LIN Ru-jing, <i>et al.</i> (668)
Sorption Characteristics of Phenanthrene and 1,1-Dichloroethene onto Reed Straw Biochar in Aquatic Solutions	WU Qing-wen, MENG Liang, ZHANG Zhi-hao, <i>et al.</i> (680)
Adsorption Characteristics of Norfloxacin by Biochars Derived from Reed Straw and Municipal Sludge	ZHANG Han-yu, WANG Zhao-wei, GAO Jun-hong, <i>et al.</i> (689)
Effect of Seasonal Temperature Increasing on Nitrogen Mineralization in Soil of the Water Level Fluctuating Zone of Three Gorge Tributary During the Dry Period	LIN Jun-jie, ZHANG Shuai, LIU Dan, <i>et al.</i> (697)
Effects of Warming and Straw Application on Soil Respiration and Enzyme Activity in a Winter Wheat Cropland	CHEN Shu-tao, SANG Lin, ZHANG Xu, <i>et al.</i> (703)
Distribution of Urban Soil Heavy Metal and Pollution Evaluation in Different Functional Zones of Yinchuan City	WANG You-qi, BAI Yi-ru, WANG Jian-yu (710)
Differential Effect and Mechanism of <i>in situ</i> Immobilization of Cadmium Contamination in Soil Using Diatomite Produced from Different Areas	ZHU Jian, WANG Ping, LIN Yan, <i>et al.</i> (717)
Characteristics of Adsorption Leaching and Influencing Factors of Dimethyl Phthalate in Purple Soil	WANG Qiang, SONG Jiao-yan, ZENG Wei, <i>et al.</i> (726)
Cd Runoff Load and Soil Profile Movement After Implementation of Some Typical Contaminated Agricultural Soil Remediation Strategies	LIU Xiao-li, ZENG Zhao-xia, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (734)
Concentrations and Component Profiles PAHs in Surface Soils and Wheat Grains from the Cornfields Close to the Steel Smelting Industry in Handan, Hebei Province	WU Di, WANG Yi-long, LIU Wei-jian, <i>et al.</i> (740)
Effect of Arbuscular Mycorrhiza (AM) on Tolerance of Cattail to Cd Stress in Aquatic Environment	LUO Peng-cheng, LI Hang, WANG Shu-guang (750)
Acute Toxic Effects of Bromate on Aquatic Organisms	WANG Zhi-wei, LIU Dong-mei, ZHANG Wen-juan, <i>et al.</i> (756)
Development of Self-assembled Dumbbell-like Fe ₃ O ₄ Micro/nanomaterial for Application in Thermocatalytic Degradation of Polybrominated Biphenyls	HUANG Xin-chen, ZONG Gang, LIU Ye-xuan, <i>et al.</i> (765)
Impact of Salinity on Leachate Treatment and N ₂ O Releases from Semi-aerobic Aged-refuse Bioreactor	LI Wei-hua, SUN Ying-jie, LIU Zi-liang, <i>et al.</i> (775)
Evaluating the Significance of Odor Gas Released During the Directly Drying Process of Sludge: Based on the Multi-index Integrated Assessment Method	DING Wen-jie, CHEN Wen-he, DENG Ming-jia, <i>et al.</i> (782)

《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 刘 毅 汤鸿霄 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)

2016年2月15日 第37卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 2 Feb. 15, 2016

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行