

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈菁,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王蕊燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险

付璐婧^{1,2}, 李一兵^{1*}, 乔梦^{2,3*}, 赵旭²

(1. 河北工业大学土木与交通学院, 天津 300401; 2. 中国科学院生态环境研究中心环境水质学国家重点实验室, 北京 100085; 3. 清华大学新兴有机污染物控制北京市重点实验室, 北京 100084)

摘要: 为探明北京5座污水处理厂出水及受纳河流中多环芳烃(PAHs)及其衍生物(SPAHs)的污染水平及健康风险水平, 采用固相萃取-气相色谱质谱联用仪测定水样中的PAHs及SPAHs的质量浓度, 分析其分布特征, 同时使用毒性当量因子评价河流中PAHs的健康风险。结果表明, 5座污水处理厂出水及受纳河流中PAHs及SPAHs总质量浓度分别为75~584 ng·L⁻¹和91~1822 ng·L⁻¹。水样中PAHs以2和3环为主, 占PAHs总量的23%~48%。本研究中的SPAHs包括三类物质: 氧化PAHs(OPAHs)、甲基PAHs(MPAHs)和氯代PAHs(CIPAHs)。其中, OPAHs占∑SPAHs的质量分数为75%, MPAHs、CIPAHs占比总体较低, 分别为12%、13%。通过对5条河流中PAHs进行毒性当量浓度计算, 表明应在采暖季(12月)对高环PAHs污染引起重视。

关键词: 纳污河流; 多环芳烃(PAHs); 多环芳烃衍生物(SPAHs); 污染水平; 健康风险

中图分类号: X522; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0256-07 DOI: 10.13227/j.hjkk.201806097

Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing

FU Lu-jing^{1,2}, LI Yi-bing^{1*}, QIAO Meng^{2,3*}, ZHAO Xu²

(1. School of Civil Engineering and Transportation, Hebei University of Technology, Tianjin 300401, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Aquatic Chemistry, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 3. Beijing Key Laboratory for Emerging Organic Contaminants Control, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: To analyze the pollution levels and health risk assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (SPAHs) in five typical effluents from sewage treatment plants and receiving rivers in Beijing, the concentrations of PAHs and SPAHs in samples were measured by the combined method of solid extraction and gas chromatography-mass spectrometry. The distribution characteristics were also analyzed. At the same time, the probabilistic health risk was assessed using toxic equivalent factors. The results show that the contamination of PAHs and SPAHs in five typical effluents from sewage treatment plants and receiving rivers in Beijing is 75-584 ng·L⁻¹ and 91-1822 ng·L⁻¹, respectively. These PAHs are dominated by 2-and 3-ring PAHs, which account for 23%-48% of the total PAHs. The SPAHs in this study include three substances: methyl polycyclic aromatic hydrocarbons (MPAHs), oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (OPAHs), and chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons (CIPAHs). The proportion of OPAHs in total SPAHs is 75%, while the total proportion of MPAHs and CIPAHs is overall low (12% and 13%, respectively). Calculations of the toxicity equivalents of PAHs in five rivers indicate that attention should be paid to high-PAHs pollution during the heating season (December).

Key words: wastewater-receiving river; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); substituted polycyclic aromatic hydrocarbons (SPAHs); pollution level; health risk

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是美国环保局规定的一类优先控制污染物, 具有致畸、致癌、致突变的作用, 在水、土壤、大气、沉积物等环境介质中广泛存在, 人们可以通过呼吸、饮食等多种途径摄入, 从而对人体健康产生潜在危害, 其带来的生态效应已引起国际社会的关注^[1,2]。PAHs可以通过化学或微生物作用转化成其衍生物 (substituted polycyclic aromatic hydrocarbons, SPAHs), 如甲基、氧化、氯代等多环芳烃衍生物 (MPAHs、OPAHs、CIPAHs)^[3,4]。SPAHs也可通过和PAHs同样的污染源排入到环境

中, 如生活污水、工业废水等, 而 SPAHs 可能具有更强的毒性和“三致效应”^[5]。

我国对水中 PAHs 开展调查研究主要集中于大江大河或主要海域, 且主要是关于河流水体中 PAHs 的研究^[6-14], 对 SPAHs 的研究甚少。2009~

收稿日期: 2018-06-11; 修订日期: 2018-07-11

基金项目: 中国科学院重点研究项目 (ZDRW-ZS-2016-5-6); 国家自然科学基金项目 (51508552, 51420105012)

作者简介: 付璐婧 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为水体环境及水处理过程微量有机物行为与转化, E-mail: 2284035305@qq.com

* 通信作者, E-mail: lybhebut@sina.com; mengqiao@rcees.ac.cn

2010年北京地区纳污河流中 PAHs 的质量浓度为 $190 \sim 1\,790 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;北京通州地区河流中, PAHs 质量浓度为 $90 \sim 1\,890 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;北京市东郊河流中 PAHs 质量浓度为 $176 \sim 1\,425 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ [13~15]。Qiao 等 [16] 在北京污水处理厂及纳污河流中检出 MPAHs、OPAHs、CIPAHs 这 3 类 SPAHs, 并且指出污水处理厂二级出水是纳污河流中 PAHs 及 SPAHs 的主要来源, 其中 PAHs 质量浓度为 $89 \sim 474 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, SPAHs 质量浓度为 $61 \sim 529 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$;曹巍等 [17] 对北京及广东 4 座污水处理厂中 PAHs 及 SPAHs 进行研究, 结果表明北京市 3 座污水处理厂的 PAHs 进水质量浓度为: $430.7 \sim 490.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 广东 D 污水处理厂的 PAHs 质量浓度较低为 $281.1 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。而 SPAHs 质量浓度比较平均为 $366.5 \sim 474.2 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ 。由以上研究可知, 北京污水处理厂出水及接纳河流中存在 SPAHs 且质量浓度与 PAHs 相近, 需引起重视。目前对于北京污水处理厂出水接纳河流中 SPAHs 的污染状况未见报道, 基于此, 本文将针对北京 5 座典型污水处理厂出水及接纳河流中 PAHs 和 SPAHs 的质量浓度及组成开展研究, 明确污染物分布特征, 初步判断污染物的来源, 并进一步评价城市河流中 PAHs 对人体的健康风险, 以期为保证城市水体可持续发展提供基础数据和背景资料。

1 材料与方法

1.1 实验材料及仪器

16 种 PAHs 包括萘 (Nap)、萘烯 (Acy)、萘 (Ace)、芴 (Fluo)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽 (Flua)、芘 (Pyr)、苯并[a]蒽 (BaA)、䓛 (Chry)、苯并[b]荧蒽 (BbF)、苯并[k]荧蒽 (BkF)、苯并[a]芘 (BaP)、茚并[1,2,3-cd]芘 (IcdP)、二苯并[a,h]蒽 (DBA) 和苯并[g,h,i]茚 (BghiP) 的混合标准样品。4 种 MPAHs 包括 2-甲基萘 (2-MN)、1-甲基荧蒽 (1-MF)、2,6-二甲基萘 (2,6-DMN) 和 3,6-二甲基菲 (3,6-DMP)。6 种 OPAHs 包括 9-芴酮 (9-FL)、蒽酮 (AT)、蒽醌 (AQ)、2-甲基蒽醌 (2-MAQ)、苯并蒽酮 (BAT) 和苯并蒽-7,12-二酮 (BA-7,12-D)。9 种 CIPAHs 分别为 1-氯萘 (1-CN)、2-氯萘 (2-CN)、1,4-二氯萘 (DCN)、9-氯菲 (9-ClPhe)、2-氯蒽 (2-ClAnt)、1-氯蒽醌 (1-ClAQ)、3-荧蒽 (3-ClFlua)、1-氯芘 (1-ClPyr)、6-氯苯芘 (6-ClBap)。回收率指示物为 4 种氘代多环芳烃: 氘代萘 (d-Ace)、氘代菲 (d-Phe)、氘代䓛 (d-Chry)、氘代茚 (d-Pery) 的混合样品, 均购自 AccuStandard, Inc. (New Haven, USA)。

内标物质二氟联苯 (2-FB) 购于 Aldrich Chemical Co, Inc. (Gillingham, Dorset, USA)。HPLC 级正己烷、甲醇购于美国 Fisher Scientific 公司, 二氯甲烷购于美国 J. T. Baker 公司, 丙酮购于美国 Dikma Technologies 公司。无水硫酸钠 (分析纯, 国药集团化学试剂有限公司), 使用前经马弗炉在 450°C 下煅烧, 以去除有机物。

1.2 样品采集及处理

选择北京市 5 座典型市政污水厂出水及接纳河流: A、B、C、D 和 E 为研究对象, 分别在每条河流污水厂出水口上游 (U1、U2), 出水口 (EX), 下游 (D1、D2) 布设 5 个监测断面, 相邻两点之间相距 200m, 见图 1。河流样品用不锈钢采样器采集表层水, 污水厂出水样品在入河口采集, 均为瞬时样品。2016 年 3 月和 12 月各采样一次, 分别代表非取暖季和取暖季。

水样采集后, 储存于 4 L 棕色玻璃瓶中, 运回实验室后, 用玻璃纤维滤膜 (直径 142 mm, 孔径 $0.7 \mu\text{m}$, Millipore) 过滤, 过滤后的样品用活化好的 C18 固相小柱 (500 mg, 6 mL 购于 Supelco) 在固相萃取装置上富集, 之后用 10 mL DCM 和 5 mL HEX 分 4 次洗脱萃取柱, 洗脱液用旋转蒸发仪旋转蒸发至 1 mL 左右, 然后转移到 K-D 浓缩瓶中, 用氮吹仪浓缩, 定容至 0.5 mL。加入 2-FB (100 ng), 以待进行仪器分析。由于颗粒相样品含量较低, 因此未做分析。

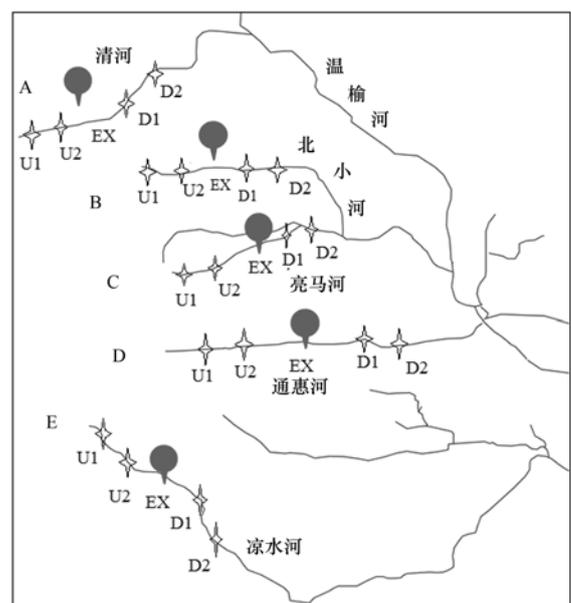


图 1 河流采样点分布示意

Fig. 1 River sampling locations

1.3 样品测定

样品采用气相色谱-质谱仪进行测定 (Agilent 5977B GC/MSD, 美国), 以无分流模式注入, 载气

为氦气,速度为 $1 \text{ mL}\cdot\text{min}^{-1}$. 色谱条件:采用色谱柱为 DB-5MS 石英毛细管柱 ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$, J&W Co. USA); 离子源为电子轰击源 (EI)^[18]. 进样口温度 280°C 、测定温度为 290°C ; 升温程序:初始温度为 60°C , 保留 1 min , 以 $20^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升到 110°C , 再以 $3^\circ\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 升到 290°C 保留 20 min . 目标物首先以全扫描模式进行定性分析, 质荷比 $50 \sim 500$, 扫描速率 $2000 \text{ scan}\cdot\text{s}^{-1}$, 根据全扫描色谱图确定各目标物的保留时间, 根据质谱图及 NIST 谱库确定目标物的定性和定量离子. 然后以选择离子扫描进行定量分析.

1.4 质量控制和质量保证

标准曲线:不同质量浓度标线中加入相同量的内标, 以目标物峰面积和内标的比值建立 8 点标准曲线. 以 3 倍和 10 倍信噪比分别作为方法检出限和定量限, 35 种目标物的检出限为 $0.02 \sim 27.6 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 定量限为 $0.04 \sim 91.9 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 样品中指示物回收率分别为: d-Ace, (91 ± 17)%; d-Phe, (90 ± 18)%; d-Chry, (91 ± 18)%; d-Pery, (73 ± 19)%.

2 结果与讨论

2.1 污水处理厂出水及纳污河流中 \sum PAHs 及 \sum SPAHs 的污染水平

2016 年 3 月和 12 月采集的样品中, \sum PAHs 及 \sum SPAHs 总质量浓度的平均值、最小值及最大

值分别进行统计分析, 结果见表 1. 污水处理厂出水及接纳河流中 16 种 PAHs, IcdP 与 DBA 未检出, 其他物质均可检出, 其中 BkF、BaP 和 BghiP 部分检出, 检出率分别为 61%、51% 和 96%, 质量浓度较高的是 Nap、Fluo 和 Phe. \sum PAHs 质量浓度范围分别为: $121 \sim 428$ 、 $75 \sim 232$ 、 $102 \sim 209$ 、 $82 \sim 253$ 和 $118 \sim 584 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$, 平均值分别为 223、110、148、152 和 $221 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 与天津海河 ($174 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、深圳茅洲河 ($292 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、浙江钱塘江 ($283 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 相差不大^[6-8], 与黑龙江松花江 ($935 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、意大利的亚诺河 ($739 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比含量较低^[9, 10], 与广东西江 ($59 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$)、美国密西西比河 ($136 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 相比含量较高^[11, 12].

由图 2 可知河流中 PAHs 质量浓度在 12 月明显高于 3 月, 采用 SPSS 17.0 统计分析软件对测得的 PAHs 数据进行配对 t 检验得到 PAHs 与季节有显著性差异 ($P < 0.05$). 水体中 PAHs 同分异构体的比值可指示其来源. Yunker 等^[19] 认为 $\text{Ant}/(\text{Ant} + \text{Phe})$ 小于 0.1, 主要是石油源, 大于 0.1 时, 主要为燃烧源. $\text{Flua}/(\text{Flua} + \text{Pyr})$ 小于 0.4 为石油源, $0.4 \sim 0.5$ 则为石油源和燃烧源的混合源, 大于 0.5 时为燃烧源. $\text{BaA}/(\text{BaA} + \text{Chry}) < 0.2$ 为石油源, $0.2 \sim 0.35$ 为混合源, 大于 0.35 为燃烧源. 由表 2 可知, 河流中 PAHs 主要来源于煤的燃烧, 石油源较少. 12 月燃烧源所占质量分数高于 3 月, 主要是因为 12 月为北京冬季取暖期, 煤的不完全燃烧产生的 PAHs 高于非取暖季.

表 1 2016 年 3 月和 12 月污水处理厂出水及接纳河流中 \sum PAHs 和 \sum SPAHs 质量浓度¹⁾/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of \sum PAHs and \sum SPAHs in effluents from sewage treatment plants and receiving rivers in March and December 2016/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

河流	2016-03		2016-12	
	\sum PAHs	\sum SPAHs	\sum PAHs	\sum SPAHs
A	146(121~185)	209(154~326)	301(216~428)	217(185~252)
B	88(75~98)	126(91~138)	132(77~232)	200(159~243)
C	148(102~209)	216(145~327)	149(112~180)	591(163~1 822)
D	103(82~117)	180(151~205)	200(147~253)	247(220~316)
E	158(142~173)	351(229~528)	265(118~584)	268(229~362)

1) 数值为平均值(最小值~最大值)

污水处理厂出水及接纳河流 A、B、C、D 和 E 中 SPAHs 总质量浓度范围分别为 $154 \sim 326$ 、 $91 \sim 243$ 、 $145 \sim 1822$ 、 $151 \sim 316$ 和 $229 \sim 528 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 平均值分别为 213、163、383、213 和 $310 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$. 采用 SPSS 17.0 统计分析软件在 $P = 0.05$ 的置信水平对测得的 SPAHs 数据进行单因素方差分析, 结果表明 E 中 SPAHs 质量浓度显著高于 A、B 及 D ($P < 0.05$). E 中 2-MN、3, 6-DMP、AT 及 AQ 质量浓度

较高. 据北京市环保局报道 E 上游有染料废水直接排放, 染料废水是 AQ 和 AT 的主要直接来源之一, 因此导致 E 中 SPAHs 总质量浓度高. 由图 2 可知出水口及河流下游 3 月 SPAHs 含量高于 12 月, SPAHs 除了直接排放, 还可能存在母体 PAHs 向 SPAHs 转化的光化学和微生物过程, 可能在太阳辐射较强和温度较高的非取暖期更容易发生^[20]. C 中, 12 月上游 SPAHs 含量远高于其它河流 ($1 822$

ng·L⁻¹), 主要为 AT、AQ 的贡献. C 上游采样点附近有一垃圾中转站, 垃圾渗滤液污染有机成分复杂, 包括羧酸类、醛及酮类、芳烃类等有机化合物^[21], C 上游 12 月质量浓度高可能是由于垃圾渗滤液的偶然排放.

2.2 污水处理厂出水及接纳河流中 PAHs 及 SPAHs 的分布特征

污水处理厂出水及接纳河流中 2 环(Nap、Acy、Ace 和 Fluo)与 3 环 PAHs(Phe、Ant 和 Flua)所占质量分数较大, 分别为 48% 和 26% (图 3). 其中 Nap 的质量浓度最高, 主要是因为 Nap 常作为樟脑球的主要原材料而被人们日常生活广泛应用^[9]. 其次为 4 环 PAHs(Pyr、BaA、Chry、BbF 和 BkF, 21%), 5~6

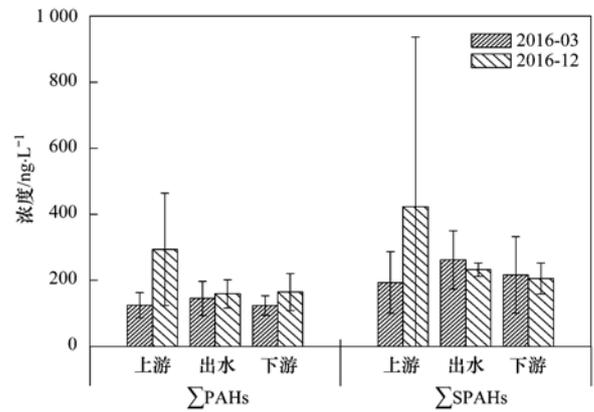


图 2 不同季节上下游及出水口 ΣPAHs 及 ΣSPAHs 质量浓度
Fig. 2 Concentration of ΣPAHs and ΣSPAHs in the upstream, downstream and effluent during different seasons

表 2 2016 年 3 月和 12 月污水接纳河流中 PAHs 同分异构体比值¹⁾

Table 2 Ratios of isomer PAH pairs in five typical effluents from sewage treatment plants and receiving rivers in March 2016

河流	位置	2016-03			2016-12		
		Ant/(Ant + Phe)	Flua/(Flua + Pyr)	BaA/(BaA + Chry)	Ant/(Ant + Phe)	Flua/(Flua + Pyr)	BaA/(BaA + Chry)
A	U	0.18	0.61	0.17 ^b	0.14	0.65	0.57
	D	0.19	0.55	0.21 ^a	0.16	0.63	0.48
B	U	0.27	0.46 ^a	0.17 ^b	0.25	0.49 ^a	0.36
	D	0.27	0.46 ^a	0.11 ^b	0.25	0.43 ^a	0.27 ^a
C	U	0.18	0.6	0.33 ^a	0.16	0.66	0.29 ^a
	D	0.25	0.39 ^b	0.10 ^b	0.21	0.5	0.20 ^a
D	U	0.27	0.55	0.13 ^b	0.16	0.65	0.4
	D	0.27	0.45 ^a	0.16 ^b	0.19	0.57	0.39
E	U	0.17	0.6	0.23 ^a	0.14	0.61	0.44
	D	0.18	0.38 ^a	0.37	0.23	0.52	0.37

1) 数值表示燃烧源, 上标 a 表示混合源, 上标 b 表示石油源; U 表示上游, D 表示下游

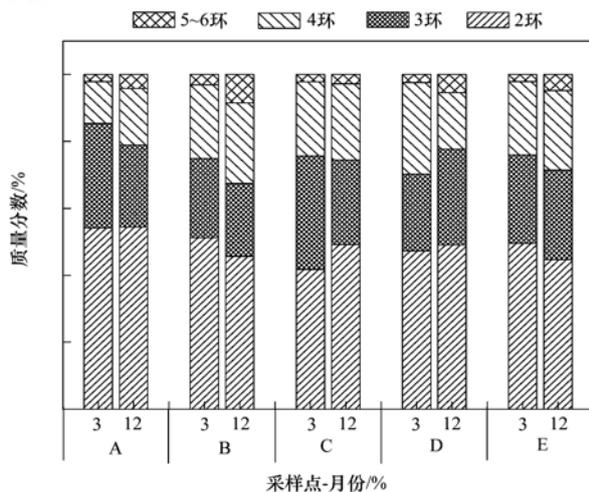


图 3 污水接纳河流及出水中 PAHs 分布特征

Fig. 3 Distribution of PAHs in effluents from sewage treatment plants and receiving rivers

环所占比例较低 (BaP、IncdP、DBA 和 BghiP, 4%). 深圳的茅洲河和非洲北部的突尼斯海湾^[7, 22]中均以低分子量的 PAHs 为主, 这与 PAHs 的物理化学性质有关, PAHs 属于疏水性有机物, 在水中

溶解度小.

根据目标物的不同取代基, 将 SPAHs 分为 MPAHs、OPAHs 和 CIPAHs. 由图 4(a)可知 OPAHs 所占比例较高, 为 75%, MPAHs、CIPAHs 总体较低, 占比分别为 12%、13%. 这是由于 OPAHs 极性较强, 在水中的溶解度较大. 此外, OPAHs 容易由 PAHs 转化生成^[18, 23]. 在本研究中 AT 和 BAT 部分检出, 检出率为 67%、92%, 其他物质均 100% 检出, 其中对 OPAHs 贡献率最高的为 AT (27%) 和 AQ [24%, 图 4(b)]. MPAHs 中 2-MN 所占质量分数最大 [79%, 图 4(c)], 2, 6-DMN、1-MF 和 3, 6-DMP 所占质量分数次之 (11%、8% 和 2%), 检出率依次为 100%、100%、55% 和 96%. 由此可见, MPAHs 的质量浓度随芳环数增加而减小, 随甲基取代个数的增加而减小^[24]. 水中 CIPAHs 质量浓度与 PAHs 相比较低, 这与大气环境中的 PAHs 研究结果一致, 环境中 CIPAHs 的排放量较少^[25]. CIPAHs 中 DCN 所占质量分数最大 [40%, 图 4(d)], 其次是 2-ClAnt、1-ClAQ、1-ClPyr、2-CN、1-

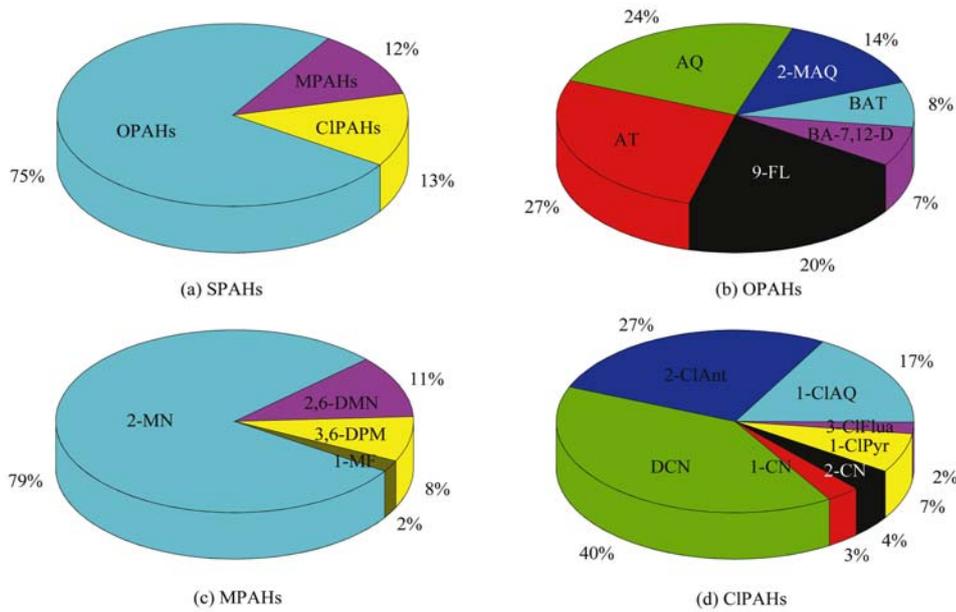


图 4 污水接纳河流及出水中 3 种 SPAHs 所占比例

Fig. 4 Proportion of SPAHs in effluents from sewage treatment plants and receiving rivers

CN、3-ClFlua(27%、17%、7%、4%、3%和2%)。检出率分别为96%、82%、33%、100%、100%、76%和80%，9-ClPhe、6-ClBap均低于检出限。

2.3 污水处理厂出水及接纳河流中 PAHs 风险评价

2~3 环 PAHs 具有急性毒性，而 4~6 环 PAHs 则具有潜在的致癌性^[26]。Nisbet 等^[27]提出毒性当量因子(TEFs)的概念，并用来分析环境中 PAHs 的生态风险。TEFs 被广泛应用，其中 BaP 和 DBA 为 1，BaA、BbF、BkF 及 IcdP 为 0.1，Ant、Chry、Bghip 为 0.01，其余为 0.001^[28]。根据 TEFs 值可以计算水中 16 种典型 PAHs 相对 BaP 的毒性当量 TEQ_{BaP}，

公式为：

$$TEQ_{BaP} = \sum_{i=1}^n C_i \times TEF_i$$

本研究中，污水处理厂出水及接纳河流中 PAHs 的 TEQs 和 \sum TEQs 量见表 3。结果显示，7 种强致癌性 PAHs 对 \sum TEQ_{BaP} 有较大贡献，占比为 96%。5 条河流中 PAHs 的 TEQ_{BaP} 范围(以 BaP_{eq} 计)为：0~2.75 ng·L⁻¹ (3 月)、0~11.40 ng·L⁻¹ (12 月)，平均值为 3.87 ng·L⁻¹ (3 月)、11.41 ng·L⁻¹ (12 月)，其中 BaP 在 5 条河流中均高于 2。由表 3 可知 \sum TEQ_{BaP} 在不同河流中相差不大，但

表 3 不同污水处理厂出水及接纳河流中 PAHs 的 TEQ 浓度(以 BaP_{eq} 计)¹⁾/ng·L⁻¹

Table 3 PAHs TEQ concentration in different sewage treatment plants and receiving rivers(BaP_{eq})/ng·L⁻¹

PAHs	TEFs	A		B		C		D		E	
		3 月	12 月	3 月	12 月	3 月	12 月	3 月	12 月	3 月	12 月
Nap	0.001	0.04	0.09	0.03	0.04	0.04	0.04	0.03	0.05	0.05	0.06
Acy	0.001	0.00	0.03	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.02
Ace	0.001	0.00	0.01	0.00	0.00	0.00	0.01	0.00	0.01	0.00	0.01
Fluo	0.001	0.03	0.04	0.01	0.02	0.02	0.02	0.01	0.03	0.02	0.03
Phe	0.001	0.03	0.04	0.01	0.02	0.03	0.02	0.01	0.04	0.03	0.04
Ant	0.01	0.06	0.08	0.04	0.05	0.07	0.06	0.05	0.07	0.07	0.09
Flua	0.001	0.01	0.02	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02
Pyr	0.001	0.01	0.01	0.00	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01
BaA*	0.1	0.23	1.27	0.15	0.53	0.60	0.26	0.18	0.75	0.45	1.72
Chry*	0.01	0.09	0.12	0.09	0.10	0.14	0.09	0.09	0.11	0.10	0.26
BbF*	0.1	0.15	0.17	0.14	0.35	0.48	0.82	0.22	0.11	0.37	0.14
BkF*	0.1	0.00	1.27	0.24	0.73	0.00	0.78	0.94	0.48	0.96	0.52
BaP*	1	2.68	10.33	2.45	10.16	2.75	2.66	2.22	10.10	2.62	11.40
IcdP*	1	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
DBA*	0.01	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
BghiP	0.1	0.04	0.21	0.03	0.10	0.05	0.15	0.03	0.08	0.07	0.14
\sum 7Car PAHs		3.14	13.15	3.07	11.87	3.98	4.62	3.67	11.55	4.50	14.03
\sum 16PAHs		3.36	13.68	3.21	12.11	4.20	4.94	3.82	11.86	4.76	14.44

1) * 表示强致癌 PAHs，TEFs 代表毒性当量因子

在不同季度差异显著,因此应当在采暖季(12月)对高环 PAHs 污染引起重视。

3 结论

PAHs 和 SPAHs 在北京污水受纳河流及出水中部分检出, \sum PAHs 和 \sum SPAHs 质量浓度分别为 75~584 ng·L⁻¹ 和 91~1 822 ng·L⁻¹。河流中 PAHs 主要来源为燃烧源,故采暖季 PAHs 质量浓度高于非采暖季,染料废水和垃圾渗滤液可能是 SPAHs 污染的来源之一。水样中 PAHs 以 2~3 环为主(23%~48%)。高分子量 PAHs 主要为 4 环(13%~27%),而 5~6 环的较少(2%~8%)。水样中 SPAHs 以 OPAHs 为主,占 75%,MPAHs 和 CIPAHS 所占质量分数较低(12%和 13%)。通过对 5 条河流中 PAHs 的 TEQ_{BAP} 计算,表明高环 PAHs 污染应当在采暖季(12月)引起重视。

参考文献:

- [1] Wania F, MacKay D. Peer reviewed; tracking the distribution of persistent organic pollutants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1996, **30**(9): 390A-396A.
- [2] Dimashki M, Lim L H, Harrison R M, *et al.* Temporal trends, temperature dependence, and relative reactivity of atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Science & Technology*, 2001, **35**(11): 2264-2267.
- [3] Lee H B, Peart T E, Hong-You R L, *et al.* Supercritical carbon dioxide extraction of polycyclic aromatic hydrocarbons from sediments [J]. *Journal of Chromatography A*, 1993, **653**(1): 83-91.
- [4] Ohura T, Amagai T, Makino M. Behavior and prediction of photochemical degradation of chlorinated polycyclic aromatic hydrocarbons in cyclohexane [J]. *Chemosphere*, 2008, **70**(11): 2110-2117.
- [5] Blanchard M, Teil M J, Ollivon D, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons and polychlorobiphenyls in wastewaters and sewage sludges from the Paris area (France) [J]. *Environmental Research*, 2004, **95**(2): 184-197.
- [6] Shi Z, Tao S, Pan B, *et al.* Contamination of rivers in Tianjin, China by polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Environmental Pollution*, 2005, **134**(1): 97-111.
- [7] Zhang D, Wang J J, Ni H G, *et al.* Spatial-temporal and multi-media variations of polycyclic aromatic hydrocarbons in a highly urbanized river from South China [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **581-582**: 621-628.
- [8] Chen Y Y, Zhu L Z, Zhou R B. Characterization and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbon in surface water and sediment from Qiantang River, China [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2007, **141**(1): 148-155.
- [9] Zhao X S, Ding J, You H. Spatial distribution and temporal trends of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in water and sediment from Songhua River, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2014, **36**(1): 131-143.
- [10] Montuori P, Triassi M. Polycyclic aromatic hydrocarbons loads into the Mediterranean Sea: estimate of Sarno River inputs [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2012, **64**(3): 512-520.
- [11] Deng H M, Peng P A, Huang W L, *et al.* Distribution and loadings of polycyclic aromatic hydrocarbons in the Xijiang River in Guangdong, South China [J]. *Chemosphere*, 2006, **64**(8): 1401-1411.
- [12] Mitra S, Bianchi T S. A preliminary assessment of polycyclic aromatic hydrocarbon distributions in the lower Mississippi River and Gulf of Mexico [J]. *Marine Chemistry*, 2003, **82**(3-4): 273-288.
- [13] Qi W X, Liu H J, Pernet-Coudrier B, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in wastewater, WWTPs effluents and in the recipient waters of Beijing, China [J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2013, **20**(6): 4254-4260.
- [14] Shen Q, Wang K Y, Zhang W, *et al.* Characterization and sources of PAHs in an urban river system in Beijing, China [J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2009, **31**(4): 453-462.
- [15] 曲洁婷, 卢少勇, 张建, 等. 北京市东郊河流水中多环芳烃的分布 [J]. *环境科学与技术*, 2014, **37**(S2): 161-165.
Qu J T, Lu S Y, Zhang J, *et al.* Studies on distribution of PAHs in urban river water of Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, **37**(S2): 161-165.
- [16] Qiao M, Cao W, Liu B H, *et al.* Impact of upgrading wastewater treatment plant on the removal of typical methyl, oxygenated, chlorinated and parent polycyclic aromatic hydrocarbons [J]. *Science of the Total Environment*, 2017, **603-604**: 140-147.
- [17] 曹巍, 乔梦, 张一心, 等. 典型污水处理厂对多环芳烃及其衍生物的去除及再生水健康风险研究 [J]. *生态毒理学*, 2016, **11**(3): 173-179.
Cao W, Qiao M, Zhang Y X, *et al.* Removal of parent and substituted polycyclic aromatic hydrocarbons in typical wastewater treatment plants and health risk assessment of re-claimed water [J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2016, **11**(3): 173-179.
- [18] Qiao M, Qi W X, Liu H J, *et al.* Simultaneous determination of typical substituted and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in water and solid matrix by gas chromatography-mass spectrometry [J]. *Journal of Chromatography A*, 2013, **1291**: 129-136.
- [19] 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.
- [20] Qiao M, Qi W X, Liu H J, *et al.* Occurrence, behavior and removal of typical substituted and parent polycyclic aromatic hydrocarbons in a biological wastewater treatment plant [J]. *Water Research*, 2014, **52**: 11-19.
- [21] 夏昌伟. 垃圾渗滤液中有有机污染物成分特征的研究进展 [J]. *现代农业科技*, 2016, (6): 194, 206.
- [22] Mzoughi N, Chouba L. Distribution and partitioning of aliphatic hydrocarbons and polycyclic aromatic hydrocarbons between water, suspended particulate matter, and sediment in harbours of the West coastal of the Gulf of Tunis (Tunisia) [J]. *Journal of Environmental Monitoring*, 2011, **13**(3): 689-698.
- [23] Lundstedt S, White P A, Lemieux C L, *et al.* Sources, fate, and toxic hazards of oxygenated polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) at PAH-contaminated sites [J]. *AMBIO: A Journal of the Human Environment*, 2007, **36**(6): 475-485.
- [24] 乔梦, 齐维晓, 赵旭, 等. 多环芳烃及其衍生物在北京典型污水处理厂中的存在及去除 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1451-1459.
Qiao M, Qi W X, Zhao X, *et al.* Occurrence and removal of polycyclic aromatic hydrocarbons and their derivatives in typical wastewater treatment plants in Beijing [J]. *Environmental*

- Science, 2016, **37**(4): 1451-1459.
- [25] Ishaq R, Näf C, Zebühr Y, *et al.* PCBs, PCNs, PCDD/Fs, PAHs and Cl-PAHs in air and water particulate samples--patterns and variations[J]. Chemosphere, 2003, **50**(9): 1131-1150.
- [26] Witt G. Polycyclic aromatic hydrocarbons in water and sediment of the Baltic Sea[J]. Marine Pollution Bulletin, 1995, **31**(4-12): 237-248.
- [27] Nisbet I C T, LaGoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) [J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology, 1992, **16**(3): 290-300.
- [28] USEPA. Guidelines for carcinogen risk assessment [R]. Washington DC: Risk Assessment Forum USEPA, 2005.

《环境科学》多项引证指标名列前茅

2018年11月1日,中国科学技术信息研究所在中国科技论文统计结果发布会上公布了2017年度中国科技论文统计结果.统计结果显示《环境科学》2017年度总被引频次11 228,影响因子1.958,多项引证指标位居环境科学技术及资源科学技术类科技期刊前列.



CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)