

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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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O<sub>3</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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<sub>2.5</sub>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CO<sub>2</sub>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Ca<sup>2+</sup>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)

MoS<sub>2</sub>/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N<sub>2</sub>O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)

# 沈抚新城地下水中 PAHs 的污染特征及健康风险评价

张士超<sup>1,2,3</sup>, 姚宏<sup>1,2\*</sup>, 向鑫鑫<sup>1,2</sup>, 刘殷佐<sup>1,2</sup>, 刘明丽<sup>1,2</sup>, 鲁垠涛<sup>1,2</sup>, 于晓华<sup>1,2</sup>

(1. 北京交通大学土木建筑工程学院, 北京 100044; 2. 水中典型污染物控制与水质保障北京重点实验室, 北京 100044; 3. 中国铁道科学研究院集团有限公司节能环保劳卫研究所, 北京 100081)

**摘要:** 为了保障浑河流域处于正在进行城镇化沈抚新城居民的生活用水安全, 采集该地区 49 个地下水样品对 16 种 US EPA 优控的多环芳烃(PAHs)进行了分析, 并对 PAHs 的污染水平、空间分布、来源与饮水健康风险进行了调查与评估. 结果表明: 49 个采样点均有不同程度的 PAHs 检出, 地下水中 PAHs 的浓度范围为(4.38 ~ 2 005.02 ng·L<sup>-1</sup>), 平均浓度值为(414.64 ± 526.13) ng·L<sup>-1</sup>, 与国内外其他地区地下水对比, 处于较高污染水平. 地下水中 PAHs 主要以 3 环和 4 环为主, 其平均浓度分别为(190.93 ± 238.96) ng·L<sup>-1</sup>和(140.01 ± 234.69) ng·L<sup>-1</sup>, 两者占总 PAHs 含量的 80%. 枯水期的地下水中 PAHs 空间分布受土地利用类型影响较大, 当表层土壤为耕地时, 地下水 PAHs 浓度较大, 而为林地时 PAHs 浓度较小. 由主成分分析-多元线性回归结果得知, 地下水中 PAHs 主要来源于汽油和天然气的不完全燃烧、煤炭燃烧、石油泄漏以及交通排放, 其贡献率依次为 36.26%、32.72%、28.17% 和 2.87%. 不同人群通过饮用地下水暴露于 PAHs 的终生致癌风险 ILCR 值范围为 5.55 × 10<sup>-10</sup> ~ 5.65 × 10<sup>-6</sup>, 其中 13.60% 的值处于 10<sup>-6</sup> ~ 10<sup>-4</sup> 之间, 具有潜在的癌症风险, 需引起对地下水质量的关注.

**关键词:** 地下水; 多环芳烃(PAHs); 城镇化; 污染特征; 风险评价

中图分类号: X523; X820.4 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0248-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201805253

## 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<sup>1,2,3</sup>, YAO Hong<sup>1,2\*</sup>, XIANG Xin-xin<sup>1,2</sup>, LIU Yin-zuo<sup>1,2</sup>, LIU Ming-li<sup>1,2</sup>, LU Yin-tao<sup>1,2</sup>, YU Xiao-hua<sup>1,2</sup>

(1. School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Beijing Key Laboratory of Aqueous Typical Pollutants Control and Water Quality Safeguard, Beijing 100044, China; 3. Energy Saving & Environmental Protection & Occupational Safety and Health Research Institute, China Academy of Railway Science Corporation Limited, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To protect the safety of water used by the residents in Shen-Fu New City, which is undergoing the process of urbanization, 49 groundwater samples were collected along the Hunhe River Basin and 16 US EPA priority control polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed. The occurrence, distribution characteristics, sources, and potential health risk of drinking the groundwater were also assessed in this study. The results show that PAHs were detected in all samples. The concentration of PAHs ranges from 4.38 to 2 005.02 ng·L<sup>-1</sup>, with an average value of (414.64 ± 526.13) ng·L<sup>-1</sup>. Based on the comparison of the concentration level with that of other regions, the results in this study indicate a higher pollution level. The 3-4 ring PAHs are dominant; the average value was (190.93 ± 238.96) ng·L<sup>-1</sup> and (140.01 ± 234.69) ng·L<sup>-1</sup>, respectively, accounting for 80% of the total PAHs. The distribution of PAHs in the groundwater is affected by the land use types. The concentration of PAHs is higher when the land use type is cultivated land, while it is lower when it is forest land. The source of PAHs was identified using Principal Component Analysis-Multiple Linear Regression (PCA-MLR). It was revealed that 36.26% of the PAHs are due to incomplete combustion of petroleum and gas, 32.72% are due to coal combustion, 28.17% originate from petroleum spills, and 2.87% are due to traffic emissions. The cancer risk levels related to drinking the groundwater range from 5.55 × 10<sup>-10</sup> to 5.65 × 10<sup>-6</sup> and 13.60% of the values is in the range of 10<sup>-6</sup> - 10<sup>-4</sup>. The levels are higher than the baseline of the acceptable risk, indicating the potential cancer risk. More attention should be paid to the quality of the groundwater.

**Key words:** groundwater; polycyclic aromatic hydrocarbons(PAHs); urbanization; pollution characteristic; risk assessment

多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 是一种含有两个或者多个苯环的持久性有机污染物. PAHs 主要来源于人为源 (如石油、煤炭等不完全燃烧) 且具有持久性, 因而广泛地存在于沉积物、大气、土壤以及水体等多介质环境中<sup>[1, 2]</sup>. 目前, 在世界上许多国家的农业区域中, 由于快速城镇化、工业化以及密集的农业活动, 土壤、地表水

或者大气中的 PAHs 可通过地表水补给、渗漏、农业灌溉以及污染土壤的淋滤等作用进入地下水环

收稿日期: 2018-05-31; 修订日期: 2018-07-24  
基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2014ZX07202-011)  
作者简介: 张士超 (1987 ~), 女, 博士, 主要研究方向为新兴污染物环境行为与处理技术, E-mail: happy1207583@163.com  
\* 通信作者, E-mail: yaohongts@163.com

境, 导致农村区域中地表水以及地下水面临着 PAHs 污染的严重的风险<sup>[3-5]</sup>.

近年来, 大量的学者对土壤、大气和地表水等介质中 PAHs 的分布及来源进行了调查研究, 如 Sun 等<sup>[6]</sup>报道了中国东部地区 26 个省市地区中农田表层土壤中 PAHs 的残留特征. Ma 等<sup>[7]</sup>报道了中国 11 个城市大气中 PAHs 的分布水平. Liu 等<sup>[8]</sup>使用 PMF 模型对长江三角洲表层沉积物残留的 PAHs 进行了来源分析. 然而目前国内外对地下水中 PAHs 的残留及分布研究相对较少, 且主要针对小区域内地下水中 PAHs 的分布进行报道. 昌盛等<sup>[4]</sup>报道了滹沱河冲洪积扇地下水中多环芳烃的分布特征, 张跃进等<sup>[5]</sup>以及李佳乐等<sup>[9]</sup>研究了污灌对地下水中 PAHs 污染的影响, Li 等<sup>[10]</sup>研究了 PAHs 在黄河河口地表水-地下水之间的环境行为, 石油输入以及石油燃烧加重了环境中 PAHs 的污染.

沈抚新城是由沈阳东部农村区域以及抚顺西部农村区域组成, 正在进行城镇化建设, 该区域土地利用类型正在由耕地转变为城市居民或者工业园区用地. 由于水资源短缺等问题, 该区域耕地曾有使用污水进行灌溉的历史, 土壤表层 PAHs 污染严重<sup>[11, 12]</sup>. 而沈阳和抚顺又是以“煤”为基础的资源型重工业城市, 区域环境面临 PAHs 污染的风险较大<sup>[13, 14]</sup>. 随着城镇化的进行, 人口不断密集, 地下水作为该区域重要的工农业生产、居民饮用水的水源或备用水源, 其污染造成的健康危害不容忽视. 所以, 对该区域地下水 PAHs 的残留进行分析具有很重要的现实意义. 为此, 本文选取处于正在进行城镇化建设的沈抚新城为研究区域, 分析该区域地下水中 PAHs 的污染特征、来源, 并对 PAHs 的饮水健康风险进行评价, 以期为区域地下水污染防治提供数据支撑.

## 1 材料与方法

### 1.1 化学标准品及主要试剂

16 种 EPA 优控的 PAHs 混合标准品: 萘 (Nap)、蒽 (Acy)、蒽 (Ace)、芴 (Flo)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽 (Flu)、芘 (Pyr)、苯并 [a] 蒽 (BaA)、䓛 (Chr)、苯并 [b] 荧蒽 (BbF)、苯并 [k] 荧蒽 (BkF)、苯并 [a] 芘 (BaP)、二苯并 [a, h] 蒽 (DahA)、茚并 [1, 2, 3-cd] 芘 (IcdP)、苯并 [ghi] 芘 (BghjP), 以及 <sup>13</sup>C 标记的代标物 (Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10、Perylene-D12、Phenanthrene-D10) 均购于美国 Accustandard 公司. 其中 Phenanthrene-D10 作为内标物, 用于标准曲线

的校正. Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10 和 Perylene-D12 作为代标物, 用于实验过程中污染物回收率的计算. 农残级的正己烷、丙酮、二氯甲烷、异辛烷购于美国 J. T. Baker 公司. 硅胶 (100 ~ 200 目) 购于德国 Merck 公司, 在 130℃ 下活化 18 ~ 24 h, 平衡 6 h 密封保存于棕色瓶中待用. 无水硫酸钠 (优级纯) 购于天津第三化工有限公司, 于马弗炉中 600℃ 烘烤 6 ~ 8 h, 密封于棕色瓶中置于干燥器中待用.

### 1.2 样品的采集

沈抚新城为沈阳市东部和抚顺市西部的沈抚连接带, 正在进行城镇化建设, 处于沈阳经济区的核心位置, 也是沈抚两市同城化发展的先导区. 该区域总面积为 605 km<sup>2</sup>, 其中沈阳市 335 km<sup>2</sup>, 抚顺市 259 km<sup>2</sup>. 目前研究区域主要的土地利用类型为耕地和林地, 分别占总面积的 60% 和 30%, 而城镇用地大约占总面积的 1%. 随着城镇化的快速建设, 预计到 2020 年, 城镇化区域面积可占到总面积的 40% 左右. 本研究采用网格布点的方法, 构建 0.01° × 0.01° 经纬度网格系统. 2014 年 12 月枯水期期间, 根据村庄分布、土地利用和实际交通等情况, 在研究区域采集了 49 个地下水样品, 采样点如图 1 所示.

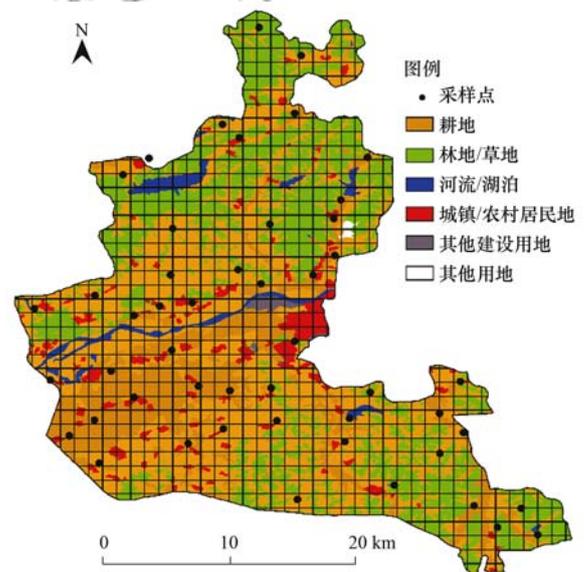


图 1 沈抚新城土地利用和地下水采样点分布示意

Fig. 1 Land use types and groundwater sampling sites in Shen-Fu New City

地下水采样主要为民用井, 水样水深大致为 50 ~ 100 m 处, 采样时, 取水样 2 000 mL, 置于预先用蒸馏水和二氯甲烷洗净的棕色玻璃瓶中, 棕色试剂瓶置入加有冰块的保温箱, 运回实验室于冰箱 4℃ 保存, 并且在 48 h 内完成样品前处理.

### 1.3 水样预处理与测定

水样的分析方法主要参考文献[15]. 取1 L水样用0.45  $\mu\text{m}$  滤膜过滤并转移到分液漏斗中, 加入100  $\mu\text{L}$  的PAHs的代标后, 用100 mL的二氯甲烷进行振荡萃取5 min, 静置分层10 min, 分离有机相, 重复上述萃取步骤3次, 然后将有机相合并, 通过无水硫酸钠进行脱水处理. 脱水后的有机相加入15 mL的正己烷, 经过旋转蒸发器进行浓缩处理到4 mL完成溶剂置换, 氮吹浓缩后的萃取液通过活化的硅胶净化柱进行净化处理, 淋洗液再次经过旋转蒸发器及氮气定容到1 mL, 进行GC-MS分析.

富集的水样采用Agilent 6890-5975 GC/MS气质联用仪分析. 色谱柱为DB-5MS型, 规格为30 m  $\times$  0.25 mm  $\times$  0.25  $\mu\text{m}$ , 载气为高纯氦气(99.999%), 采用不分流进样2.0  $\mu\text{L}$ . 色谱柱升温程序为: 初始温度50 $^{\circ}\text{C}$ , 先以10  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至180 $^{\circ}\text{C}$ , 保持1 min, 再以5  $^{\circ}\text{C}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速率升温至280 $^{\circ}\text{C}$ , 保持10 min. 进样口温度270 $^{\circ}\text{C}$ , 流速为1.0  $\text{mL}\cdot\text{min}^{-1}$ . 质谱条件: 传输线和离子源的温度分别为270 $^{\circ}\text{C}$ 和250 $^{\circ}\text{C}$ . 离子源为EI源, 电子轰击源能量为70 eV, 选择离子检测SIM模式进行数据采集, 最后采用内标法定量.

### 1.4 质量控制与质量保证

为了保证实验分析数据的准确性和可靠性, 每10个水样分析的过程中, 同时处理1个空白样及1个加标样, 分别监测人为影响情况、实验的重现性及方法的回收率. 4种PAHs代标物(Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10和Perylene-D12)的回收率分别为: 60%~100%、61%~110%、68%~118%和63%~118%, 其中平均值分别为85%、92%、101%和101%, 符合质控要求.

## 2 结果与讨论

### 2.1 PAHs污染现状

枯水期沈抚新城地下水样品中PAHs的残留现状如表1所示, 其中 $\sum_{16}$ PAHs的检出率为100%. 检出的PAHs中, 3环和4环的PAHs检出率较高, 其检出率分别为100%和87.76%. 而单体中3环的萘烯(Acy)、萘(Ace)、芴(Flo)、菲(Phe)和蒽(Ant)的检出率都相对较高, 检出率皆大于90%, 其检出率分别为95.92%、97.96%、95.92%、91.84%和93.88%. 高环数PAHs(5~6环)的检出率相对较低, 其检出率分别为87.76%和75.51%. 而检出最低的为2环PAHs, 其检出率为57.14%.

表1 沈抚新城地下水PAHs的浓度<sup>1)</sup>

Table 1 Concentration of PAHs in the groundwater of Shen-Fu New City

组分	环数	检出率/%	最小值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	最大值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	平均值/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$	标准偏差
Nap	2	57.14	n. d.	384.54	57.41	101.68
Acy	3	95.92	n. d.	334.30	39.28	72.39
Ace	3	97.96	n. d.	132.57	11.03	22.82
Flo	3	95.92	n. d.	559.69	38.53	84.34
Phe	3	91.84	n. d.	501.05	89.55	124.80
Ant	3	93.88	n. d.	70.57	12.53	18.67
$\sum_{3\text{环}} \text{PAHs}$		100.00	0.95	816.05	190.93	238.96
Flu	4	87.76	n. d.	393.24	34.49	68.98
Pyr	4	73.47	n. d.	174.42	25.51	36.48
BaA	4	51.02	n. d.	98.56	10.84	24.71
Chr	4	55.10	n. d.	678.83	69.18	170.80
$\sum_{4\text{环}} \text{PAHs}$		87.76	n. d.	934.81	140.01	234.69
BbF	5	55.10	n. d.	97.32	11.28	24.31
BkF	5	48.98	n. d.	99.81	6.42	20.55
BaP	5	55.10	n. d.	59.39	5.03	11.91
DahA	5	40.82	n. d.	10.87	1.13	2.76
$\sum_{5\text{环}} \text{PAHs}$		75.51	n. d.	224.56	23.85	50.94
IcdP	6	65.31	n. d.	6.49	0.87	1.43
BghjP	6	67.35	n. d.	20.37	1.57	3.35
$\sum_{6\text{环}} \text{PAHs}$		81.63	n. d.	26.86	2.44	4.60
$\sum_{16} \text{PAHs}$		100.00	4.38	2 005.02	414.64	526.13

1) n. d. 表示未检出

研究区域内地下水中PAHs的浓度范围为(4.38~2 005.02  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 平均浓度值为(414.64

$\pm 526.13$ )  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 单体中BaP的浓度范围为(n. d.~59.39  $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ), 根据国家生活饮用水水质标准

《GB 17051-2001》规定, 饮用水中 BaP 的限值为  $10 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 其中研究区域有 7 个地区的水体中浓度大于该值, 不能被饮用. 与国内其他地区地下水中 PAHs 残留浓度对比而言, 本研究区域地下水中 PAHs 的浓度高于江汉平原四湖流域上区地下水 ( $55.86 \sim 224.63 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[16]</sup>、太原市小店污灌区地下水 ( $13.98 \sim 505.89 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[9]</sup>、滹沱河冲洪积扇地下水(未检出  $\sim 334.3 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[4]</sup>以及辽东半岛地下水 ( $1.0 \sim 66 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[17]</sup>, 低于浑河沿岸污灌区地下水 ( $3\ 668 \sim 23\ 505 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ )<sup>[5]</sup>以及太湖平原浅层地下水 ( $4 \sim 32\ 449 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ ) 中 PAHs 的残留量<sup>[18]</sup>, 总体来说, 研究区域地下水中 PAHs 处于较高污染水平, 且部分区域地下水中 BaP 浓度超标, 对人类健康具有较大的潜在风险.

由图 2 研究区域地下水中 PAHs 的环数分布特征可知, 地下水中 PAHs 主要以 3 环和 4 环为主, 其平均浓度分别为  $(190.93 \pm 238.96) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(140.01 \pm 234.69) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 分别占总 PAHs 含量的 46% 和 34%. 其次为 2 环, 浓度范围为 n. d.  $\sim 384.54 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 占总含量的 13%. 高环 PAHs (5 环和 6 环) 的浓度最低, 其浓度平均值分别为  $(23.59 \pm 48.91) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$  和  $(2.70 \pm 4.93) \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ , 5 环和 6 环占总 PAHs 含量的 7%. 可见, 该区域地下水中以中低环 PAHs 为主, 分析认为这可能与 PAHs 的物化性质以及地下水中 PAHs 的来源有关. 一方面, 影响 PAHs 在土壤中纵向迁移以及水土之间的质量分配的主要因素为 PAHs 的辛醇-水分配系数 ( $K_{ow}$ ). 低分子量的 PAHs 具有较小的  $K_{ow}$  值, 相对较高分子量的 PAHs 而言易于存在于水体中. 而高分子量的 PAHs 因具有较大的  $K_{ow}$  值, 具有亲脂疏水性, 易吸附在土壤有机质中而难于进行迁移, 因此水体中以低环 PAHs 为主<sup>[19, 20]</sup>. 另一方面, 沈抚新城处于沈阳和抚顺两座城市中间, 而沈阳和抚顺是以“煤”为主的资源型重工业城市, 研究区域周边的石化企业、机械制造业以及制药行业等较多, 生产过程中低环的 PAHs 排放量也相对较大, 通过大气沉降或污水灌溉等由表层土壤迁移到地下水的可行性很大. 且研究区域因水资源等问题, 曾有较长使用石化行业排放的污水等进行灌溉的历史, 可能造成向下迁移的 PAHs 量更大<sup>[12, 13]</sup>. 有关该区域表层土壤中 PAHs 的残留报道结果也显示土壤中主要以低环 PAHs 为主<sup>[13, 21]</sup>.

## 2.2 PAHs 的空间分布特征

为进一步明晰地下水中 PAHs 含量的空间分布特征, 使用克里金空间插值法对研究区域地下水中 PAHs 进行无偏估值, 并绘制枯水期 PAHs 的空间

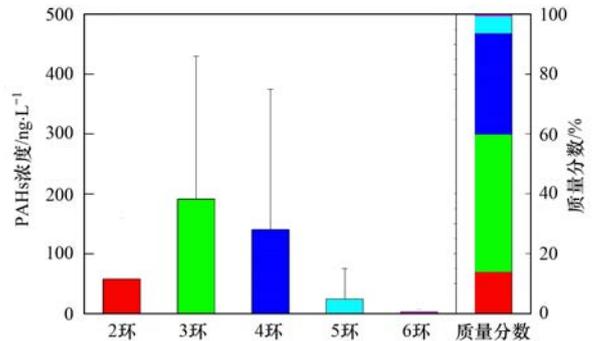


图 2 沈抚新城地下水中 PAHs 的环数分布

Fig. 2 Distribution of PAHs with different rings in the groundwater in Shen-Fu New City

分布(如图 3). 由地下水空间分布得知, PAHs 由东到西、由两侧到中间的浓度逐渐升高. 此外, 根据张跃进等的报道, 浑河流域地下水的流场方向是由东向西, 且与浑河流向成  $45^\circ$  夹角, PAHs 含量在地下水应力场以及地表水流向的作用下, 含量逐渐增高<sup>[5]</sup>, 该结论与本研究的结果一致.

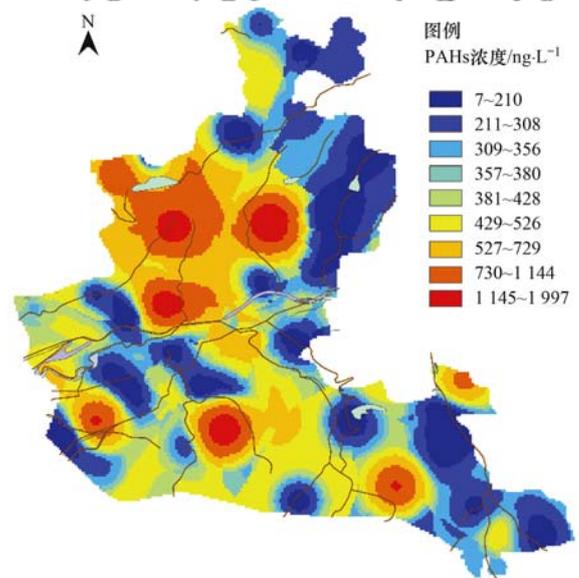


图 3 沈抚新城地下水中 PAHs 的空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of PAHs in the groundwater in Shen-Fu New City

根据其土地利用类型可见, 表层土壤为农田的区域地下水 PAHs 浓度较大, 而林地区域的 PAHs 浓度较小. PAHs 污染最严重区域出现在北部中木匠屯以大泗水村等点位, 其最大值为  $2\ 005.02 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 此外, 河流南岸后康村、民家村以及拉古满族乡, 地下水 PAHs 污染也相对较严重, 其最大浓度为  $1\ 892.98 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 位于河流北侧东部区域的连岛村附近的村庄其 PAHs 浓度最小, PAHs 浓度为  $4.38 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 而位于城市区域附近的田屯村, 地下水中 PAHs 浓度也较小, 浓度值为  $50.20 \text{ ng}\cdot\text{L}^{-1}$ . 虽然城市区域相较农村区域可以产生更多的

PAHs<sup>[22, 23]</sup>, 但是城市区域土壤主要以水泥地面为主, PAHs 向下迁移能力可能低于耕地, 造成该区域 PAHs 浓度较小. 与王静等报道的该区域表层土壤 PAHs 分布规律相同<sup>[13]</sup>.

综上所述, 地下水中 PAHs 的分布受表层土壤利用类型影响较大. 表层土壤受扰动越大, 人类活动越频繁, 土壤表层 PAHs 的含量就越高, 地下水中 PAHs 含量就越大; 相反, 如林地因受人类活动影响小, 且土壤表层受干扰程度小, 其土壤表层 PAHs 主要来源于大气沉降等作用, 因此表层土壤中 PAHs 浓度较低, 地下水中 PAHs 浓度也相对较小, 该研究结论与崔学慧等<sup>[18]</sup>的报道结果一致.

### 2.3 PAHs 的来源解析

地表水、大气或土壤中的 PAHs 在进入地下水过程中因挥发、淋滤、降解、光解等作用产生损失或丢失, 从而造成“源谱”信息的失真、特征比值法等的不确定性<sup>[24]</sup>. 因此, 为了真实地了解地下水中 PAHs 的来源情况, 本研究采用主成分-多元线性回归结合方法对其来源进行分析. 本研究中主成分分析通过软件 SPSS 24.0 完成, 将枯水期地下水中 16 种 PAHs 浓度进行因子分析, 选取特征值大于 1 的因子, 因子旋转方法设置为方差最大正交旋转法, 以达到对因子的解释进一步简化的目的. 因子结果如表 2 所示. 同时, 结合多元线性回归计算 PAHs 各种来源的贡献率.

表 2 地下水的主成分分析<sup>1)</sup>

Table 2 Principal component analysis of PAHs in the groundwater

化合物	成分			
	1	2	3	4
Nap	0.147	0.136	0.923 *	-0.136
Acy	-0.121	0.127	0.907 *	-0.029
Ace	0.071	0.856 *	0.032	0.046
Flo	-0.040	0.937 *	-0.007	-0.083
Phe	0.617	0.427	0.537	0.152
Ant	0.160	0.832 *	0.330	0.234
Flu	-0.077	0.920 *	0.115	0.068
Pyr	0.462	0.802 *	0.165	-0.012
BaA	0.965 *	0.106	0.045	0.036
Chr	0.986 *	0.055	0.058	0.025
BbF	0.969 *	0.027	0.055	0.130
BkF	0.849 *	0.114	-0.062	0.205
BaP	0.359	0.461	0.331	0.294
IcdP	0.176	0.117	-0.051	0.921 *
DahA	0.969 *	0.030	0.038	0.147
BghjP	0.140	0.016	-0.065	0.929 *
贡献率/%	42.24	22.90	12.26	9.15
累计贡献率/%	42.24	65.14	77.40	86.55

1) \* 表示化合物在此主成分有较大的荷载 (>0.80)

由表 2 可见, 前 4 个因子的累积方法贡献率达到了 86.55%, 基本上反映了原有数据的主要信息. 因子 1 的方差贡献率为 42.24%, 其主要荷载为 BaA、Chr、BbF、BkF 以及 DahA. 其中 BaA 和 Chr 是汽油和天然气燃烧的主要产物, BbF 和 BkF 主要来源于汽油的不完全燃烧, 而 DahA 主要和交通排放有关, 因此成分 1 反映了地下水中的 PAHs 主要来源于汽油和天然气等的不完全燃烧源. 因子 2 的方差贡献率为 22.90%, 主要荷载为 Ace、Flo、Ant、Flu 以及 Pyr. 这些污染物中, Ant、Flo、Flu 和 Pyr 主要来源煤炭等燃烧, 因此成分 2 为煤炭燃烧源. 因子 3 的方差贡献率为 12.26%, Nap 和 Acy 的荷载系数较大. 由于石油或油类主要以低分子量的 PAHs (如萘、菲和蒽等) 为主, 因此因子 3 判断为石油污

染源. 这也与之前报道结果一致, 由于该区域水资源等问题, 曾有长期使用石化废水进行灌溉的历史, 因此, 地下水中 PAHs 有石油排放等带来的污染. 因子 4 的方差贡献率为 9.15%, IcdP 和 BghjP 的荷载系数较大, 这两种污染物主要与交通排放有关, 其中 IcdP 与油类燃烧有关, 而 BghiP 是汽油引擎的主要排放污染物, 因此成分 4 反映了交通排放的污染.

以 PAHs 总和的标准化分数为因变量, 以各因子得分为自变量 (PC1、PC2、PC3 和 PC4 的贡献率), 进行多元线性回归分析, 结果如下所示:

$$Y = 0.640PC1 + 0.577PC2 + 0.497PC3 + 0.051PC4$$

根据公式计算地下水体中 PAHs 的模拟浓度.

结果如图 4 所示, 将监测 PAHs 浓度与模拟浓度进行线性拟合, 结果表明模拟获得的 PAHs 浓度与实际监测 PAHs 的浓度之间呈显著地正相关关系 ( $R^2 = 0.9929$ ,  $P < 0.001$ ), 说明该模型能够较好地解析该水体中 PAHs 的主要来源。

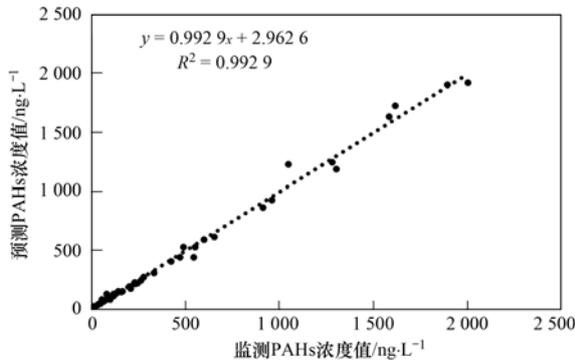


图 4 地下水 PAHs 主成分-多元线性回归的模拟结果与监测结果的相关性

Fig. 4 Correlation of model concentrations with measured concentrations of PAHs by PCA-MLR in ground water samples

根据公式结果可知, 地下水中 PAHs 来源的主要 4 个成分包括汽油和天然气的不完全燃烧、煤炭燃烧、石油泄漏以及交通排放 4 个源, 其贡献率依次为 36.26%、32.72%、28.17% 和 2.87%。

#### 2.4 PAHs 的饮水风险分析

为了确定混合 PAHs 的毒性强弱, 引入毒性当量因子 (toxic equivalent factors, TEFs) 评价方法, 即以 BaP 为标准参考物, 设其 TEF 值为 1, 根据 TEF 值计算水体中 16 种典型 PAHs 基于 BaP 的毒性当量  $TEQ_{BaP}$  (BaP 毒性当量浓度):

$$TEQ_{BaP} = \sum (c_i \times TEF_i)$$

式中,  $c_i$  是第  $i$  个 PAHs 的浓度 ( $ng \cdot L^{-1}$ ),  $TEQ_{BaP}$  是基于 BaP 的毒性当量 ( $ng \cdot L^{-1}$ )。

同时, 采用 US EPA 建议的 BaP 致癌斜率因子系数 (CSF) 来计算 PAHs 的致癌。依据下列公式计算人体引用该区域地下水时的终生致癌风险 (incremental life cancer risk, ILCR):

$$ILCR = \frac{TEQ_{BaP} \times DR \times CSF \times EF \times ED}{BW \times AT \times 10^6}$$

式中, DR 为每日饮水量 ( $L \cdot d^{-1}$ ); CSF 为 BaP 致癌斜率系数,  $10 \text{ kg} \cdot \text{d} \cdot \text{mg}^{-1}$ ; EF 为每年暴露天数, 设为 365 d; ED 为暴露年数, a; BW 为体重, kg; AT 为人的预期寿命, 取值为 27 302 d。本研究根据生理特征和生活习惯, 将人群分为 3 个年龄段: 儿童、青年和成人, 其暴露年限 ED 分别为 6、14、30 a, 每天饮用水的数量分别为 0.447、0.718、1.227  $L \cdot d^{-1}$ , 体重分别为 13.95、46.75、58.78  $kg$  [25~27]。

图 5 为 ILCR 运算出研究区域内不同人群饮用

地下水的风险水平, 当癌症风险水平值小于  $10^{-6}$ , 说明处于安全范围内, 当癌症风险水平处于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间时表明有潜在的健康风险, 而高于  $10^{-4}$  时表明存在很高的潜在健康风险。从总体来看, 人群通过饮用地下水暴露于 PAHs 的终生致癌风险 ILCR 值范围为  $5.55 \times 10^{-10} \sim 5.65 \times 10^{-6}$ , 其中 13.60% 的值处于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间, 具有潜在的癌症风险, 其余的处于安全范围内。各类人群中, 成人通过饮用该区域地下水产生的致癌风险水平最大, 其范围为  $1.81 \times 10^{-9} \sim 5.65 \times 10^{-6}$ , 平均值为  $8.43 \times 10^{-7} \pm 1.61 \times 10^{-6}$ 。儿童和青年的致癌风险水平无明显性差异, 其平均值分别为  $2.59 \times 10^{-7} \pm 4.94 \times 10^{-7}$  和  $2.89 \times 10^{-7} \pm 5.52 \times 10^{-7}$ , 均处于安全范围内。不同群体所表现出来的致癌风险水平的差异, 主要与其自身特征有关, 成人饮用水量相较于儿童和青年大, 其表现出了较高的癌症风险水平。从空间分布来看, 致癌风险水平高于  $10^{-6}$  点位于表层土壤为耕地的区域, 说明了灌溉作用对地下水污染的重要影响, 由灌溉带来的地下水环境质量应当引起关注。

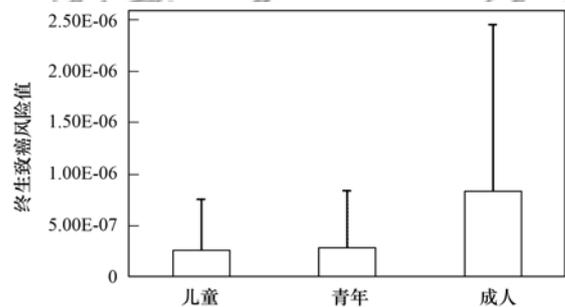


图 5 地下水中 PAHs 终生致癌风险

Fig. 5 Health risks with incremental lifetime cancer risk for the groundwater

### 3 结论

(1) 本研究区域内地下水中 PAHs 的浓度范围为  $4.38 \sim 2005.02 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 平均浓度值为  $(414.64 \pm 526.13) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。单体中 BaP 的浓度范围为 n. d.  $\sim 59.39 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 其中研究区域有 7 个地区的水体中浓度大于国家生活饮用水水质标准《GB 17051-2001》中 BaP 的限值为  $10 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 不能被饮用。地下水中 PAHs 主要以 3 环和 4 环为主, 其平均浓度分别为  $(190.93 \pm 238.96) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$  和  $(140.01 \pm 234.69) \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ , 分别占总 PAHs 含量的 46% 和 34%。

(2) 地下水中 PAHs 空间分布呈现由东到西、由两侧到中间浓度逐渐升高的趋势。地下水中 PAHs 的分布受表层土壤利用类型影响较大。当表层土壤为耕地时, 地下水 PAHs 浓度较大, 而为林地时

PAHs 浓度较小。

(3) 主成分分析-多元线性回归结果表明, 地下水中 PAHs 主要来源于汽油和天然气的不完全燃烧、煤炭燃烧、石油泄漏以及交通排放, 其贡献率依次为 36.26%、32.72%、28.17% 和 2.87%。

(4) 不同的人群通过饮用地下水暴露于 PAHs 的终生致癌风险 ILCR 值范围为  $5.55 \times 10^{-10} \sim 5.65 \times 10^{-6}$ , 其中 13.60% 的值处于  $10^{-6} \sim 10^{-4}$  之间, 具有潜在的癌症风险, 对这些区域地下水环境质量应当引起关注。各类人群中, 成人通过饮用该区域地下水产生的致癌风险水平大于儿童和青年。

#### 参考文献:

- [1] Manariotis I D, Karapanagioti H K, Chrysikopoulos C V. Degradation of PAHs by high frequency ultrasound[J]. *Water Research*, 2011, **45**(8): 2587-2594.
- [2] Wolska L, Mechlińska A, Rogowska J, et al. Sources and fate of PAHs and PCBs in the marine environment[J]. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 2012, **42**(11): 1172-1189.
- [3] Li S Y, Zhang Q F. Spatial characterization of dissolved trace elements and heavy metals in the upper Han River (China) using multivariate statistical techniques [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2010, **176**(1-3): 579-588.
- [4] 昌盛, 耿梦娇, 刘琰, 等. 漳沱河冲洪积扇地下水多环芳烃的污染特征[J]. *中国环境科学*, 2016, **36**(7): 2058-2066.  
Chang S, Geng M J, Liu Y, et al. Pollution characteristic of polycyclic aromatic hydrocarbons in the groundwater of Hutuo River Pluvial Fan[J]. *China Environmental Science*, 2016, **36**(7): 2058-2066.
- [5] 张跃进, 朱书全, 肖汝, 等. 浑河沿岸污灌区地下水中 PAHs 分布特征研究[J]. *环境科学研究*, 2007, **20**(1): 7-11.  
Zhang Y J, Zhu S Q, Xiao R, et al. Study on distribution of PAHs in groundwater in irrigation area along the Hunhe River in Liaoning Province [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007, **20**(1): 7-11.
- [6] Sun Z, Zhu Y, Zhuo S J, et al. Occurrence of nitro-and oxy-PAHs in agricultural soils in eastern China and excess lifetime cancer risks from human exposure through soil ingestion [J]. *Environment International*, 2017, **108**: 261-270.
- [7] Ma W L, Liu L Y, Jia H L, et al. PAHs in Chinese atmosphere Part I: concentration, source and temperature dependence[J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **173**: 330-337.
- [8] Liu R M, Men C, Yu W W, et al. Uncertainty in positive matrix factorization solutions for PAHs in surface sediments of the Yangtze River Estuary in different seasons [J]. *Chemosphere*, 2018, **191**: 922-936.
- [9] 李佳乐, 张彩香, 王焰新, 等. 太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律[J]. *环境科学*, 2015, **36**(1): 172-178.  
Li J L, Zhang C X, Wang Y X, et al. Pollution characteristics and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons and organochlorine pesticides in groundwater at Xiaodian sewage irrigation area, Taiyuan City[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(1): 172-178.
- [10] Li J, Li F D, Liu Q. PAHs behavior in surface water and groundwater of the Yellow River estuary: evidence from isotopes and hydrochemistry[J]. *Chemosphere*, 2017, **178**: 143-153.
- [11] 宋玉芳, 常士俊, 李利, 等. 污灌土壤中多环芳烃(PAHs)的积累与动态变化研究[J]. *应用生态学报*, 1997, **8**(1): 93-98.  
Song Y F, Chang S J, Li L, et al. Accumulation and dynamic change of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in wastewater irrigated soils [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 1997, **8**(1): 93-98.
- [12] Wu B, Guo S H, Li X J, et al. Temporal and spatial variations of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in soils from a typical organic sewage irrigation area [J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **613-614**: 513-520.
- [13] 王静, 刘明丽, 张士超, 等. 沈抚新城不同土地利用类型多环芳烃含量、来源及人体健康风险评估[J]. *环境科学*, 2017, **38**(2): 703-710.  
Wang J, Liu M L, Zhang S C, et al. Concentration, sources and ecological risks of PAHs of different land use types in Shenfufu New City[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(2): 703-710.
- [14] Chen H Y, Teng Y G, Wang J S. Source apportionment for sediment PAHs from the Daliao River (China) using an extended fit measurement mode of chemical mass balance model [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2013, **88**: 148-154.
- [15] 马万里, 刘丽艳, 齐虹, 等. 松花江流域冰封期水体中多环芳烃的污染特征研究[J]. *环境科学*, 2012, **33**(12): 4220-4225.  
Ma W L, Liu L Y, Qi H, et al. Pollution characteristics of polycyclic aromatic hydrocarbons in water of Songhua River Basin during the icebound season[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(12): 4220-4225.
- [16] 龚香宜, 何炎志, 孙云霄. 江汉平原四湖流域上区地下水中多环芳烃分布特征与源解析[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(3): 789-796.  
Gong X Y, He Y Z, Sun Y L. Distribution and source of polycyclic aromatic hydrocarbons in groundwater in the upper region of Sihua Lake Basin from Jiangnan Plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(3): 789-796.
- [17] Li X H, Shang X C, Luo T L, et al. Screening and health risk of organic micropollutants in rural groundwater of Liaodong Peninsula, China [J]. *Environmental Pollution*, 2016, **218**: 739-748.
- [18] 崔学慧, 李炳华, 陈鸿汉. 太湖平原城近郊区浅层地下水中多环芳烃污染特征及污染源分析[J]. *环境科学*, 2008, **29**(7): 1806-1810.  
Cui X H, Li B H, Chen H H. Contamination characteristics and pollutant sources analysis on PAHs in shallow groundwater in suburb of Taihu Plain [J]. *Environmental Science*, 2008, **29**(7): 1806-1810.
- [19] 纪亚萍, 何江涛, 李玮, 等. 再生水中典型 PAHs 垂向迁移特征研究[J]. *安徽农业科学*, 2014, **42**(4): 1150-1154.  
Ji Y P, He J T, Li W, et al. Experimental research on vertical migration feature of typical PAHs in reclaimed water[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2014, **42**(4): 1150-1154.
- [20] Akkanen J, Kukkonen J V K. Measuring the bioavailability of two hydrophobic organic compounds in the presence of dissolved organic matter [J]. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 2003, **22**(3): 518-524.
- [21] Song Y F, Wilke B M, Song X Y, et al. Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs), polychlorinated biphenyls (PCBs) and heavy metals (HMs) as well as their genotoxicity in soil after long-term wastewater irrigation [J]. *Chemosphere*, 2006, **65**(10): 1859-1868.
- [22] Wang C H, Wu S H, Zhou S L, et al. Polycyclic aromatic

- hydrocarbons in soils from urban to rural areas in Nanjing: concentration, source, spatial distribution, and potential human health risk[J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **527-528**: 375-383.
- [23] Pratt G C, Herbrandson C, Krause M J, *et al.* Measurements of gas and particle polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in air at urban, rural and near-roadway sites [J]. *Atmospheric Environment*, 2018, **179**: 268-278.
- [24] 廖书林, 郎印海, 王延松. 辽河口湿地土壤多环芳烃的分布及来源研究[J]. *环境科学*, 2011, **32**(4): 1094-1100.  
Liao S L, Lang Y H, Wang Y S. Distribution and sources of PAHs in soil from Liaohe Estuarine Wetland[J]. *Environmental Science*, 2011, **32**(4): 1094-1100.
- [25] Ma W L, Liu L Y, Qi H, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in water, sediment and soil of the Songhua River Basin, China [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, **185**(10): 8399-8409.
- [26] 刘宏文. 大连市饮用水中多环芳烃的水平及致癌风险[D]. 大连: 大连理工大学, 2007.  
Liu H W. Levels and cancer risks of polycyclic aromatic hydrocarbons in drinking water in Dalian, China [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2007.
- [27] Chen Y N, Zhang J Q, Zhang F, *et al.* Contamination and health risk assessment of PAHs in farmland soils of the Yinma River Basin, China [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2018, **156**: 383-390.



## CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>3</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2.5</sub> 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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> /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 <sub>2</sub> 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 <sub>2</sub> -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 )