

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源:基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

降雪后 24 h 内大气中多环芳烃的变化规律

范慧泽, 祝富杰, 胡鹏转, 马万里*

(哈尔滨工业大学城市水资源与水环境国家重点实验室, 国际持久性有毒物质联合研究中心, 哈尔滨 150090)

摘要: 大气是挥发性和半挥发性污染物迁移扩散的重要介质,也是污染物进入人体的主要途径,因此,大气中污染物的环境行为的研究具有重要的意义. 本研究通过采集雪样和降雪后连续 24 h 内的大气样品,对 16 种多环芳烃(PAHs)进行了分析,对降雪后大气中 PAHs 的变化规律进行了深入研究. 结果表明,16 种 PAHs 在降雪中的检出率为 100%,菲的浓度最高(538.3 ng·L⁻¹),其次是萘(509.1 ng·L⁻¹)和荧蒽(429.9 ng·L⁻¹),说明降雪能够对大气中的 PAHs 进行去除. 降雪后大气中 PAHs 的浓度呈现下降-上升-下降的变化规律,高浓度出现在汽车尾气排放量最大的上下班期间,低浓度则出现在人类活动少的时间段,说明人类活动是大气中 PAHs 浓度变化的主要影响因素. 降雪后 24 h 内大气中 PAHs 在气相和颗粒相间的比值变化较小,其组成主要受 PAHs 的物理化学性质的影响. 特征分子比值法表明,降雪后 24 h 内大气中 PAHs 主要来源于固体燃料燃烧源和液体燃料的燃烧源.

关键词: 多环芳烃(PAHs); 大气; 降雪; 污染特征; 变化规律

中图分类号: X51 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1636-06 DOI: 10.13227/j.hjks.202008047

Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall

FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, MA Wan-li*

(International Joint Research Centre for Persistent Toxic Substances, State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China)

Abstract: The atmosphere is a significant medium for the transportation and diffusion of volatile and semi-volatile pollutants. Furthermore, the atmosphere is the primary exposure route for pollutants to enter the human body. Therefore, the study of the environmental fate of pollutants in the atmosphere is essential. In this study, 16 polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed in snow samples and air samples within 24 hours after a snowfall, and the temporal trend of PAHs in the atmosphere was comprehensively studied. The results indicated that the detection rate of the 16 PAHs in snow was 100%, and the concentration of phenanthrene (538.3 ng·L⁻¹) was the highest, followed by naphthalene (509.1 ng·L⁻¹) and fluoranthene (429.9 ng·L⁻¹), indicating that snowfall can remove PAHs from the atmosphere. After the snowfall, a falling-rising-falling temporal trend of the concentrations of PAHs in the atmosphere was observed. Higher concentrations appeared during rush hour, with the largest automobile exhaust emissions, while lower concentrations appeared during periods with the lowest human activity. The results indicated that the atmospheric concentrations of PAHs were predominantly influenced by human activities. Within 24 hours after snowfall, the ratio of PAHs between the gas phase and particle phase, which depends primarily on the physical and chemical properties of PAHs, had not changed substantially. The diagnostic ratios indicated that within 24 hours after snowfall, the PAHs in the atmosphere originated mostly from the emissions of solid fuel and liquid fuel combustion.

Key words: polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); atmosphere; snowfall; pollution characteristic; temporal trend

多环芳烃(polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs)是环境中普遍存在的一类污染物,主要来源于煤炭、石油和木材等有机物的热解和不完全燃烧^[1~6],因其具有致癌性、分布广泛和污染源多等特点,已成为各国的研究热点^[7,8]. PAHs 广泛分布于大气中,由于大气的远距离传输性,大气中 PAHs 的环境行为和去除规律等也受到人们的普遍关注. 干湿沉降是大气中污染物的去除途径之一,也是土壤和水体等地表环境中污染物的重要来源,所以深入研究干湿沉降中 PAHs 的污染特征及其对于大气中 PAHs 归趋的影响具有重要的科学意义和社会效益,国内外学者对于干湿沉降中 PAHs 的污染特征和归趋等开展了大量的研究^[9~12],但是有关降雪后

大气中 PAHs 的变化规律的研究较少.

我国东北地区气候寒冷,供暖期间煤炭的燃烧加重了大气的污染,从而也会导致大气中 PAHs 的浓度升高,另外,冬季降雪比较频繁,所以有利于研究降雪后大气中 PAHs 的变化规律. 本文以 16 种优先控制的 PAHs 为研究对象,基于雪样和降雪后 24 h 内大气中气相和颗粒相样品的连续采集,对样品中 PAHs 进行了定量分析,对降雪后大气中 PAHs 浓

收稿日期: 2020-08-06; 修订日期: 2020-09-09

基金项目: 国家自然科学基金项目(41671470); 城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学)自主课题项目(2020TS03)

作者简介: 范慧泽(1997~),男,硕士研究生,主要研究方向为大气中持久性有毒物质的迁移转化, E-mail: fhzhit@163.com

* 通信作者, E-mail: mawanli002@163.com

度、组成和来源等进行了系统地研究,阐明了降雪后 24 h 内大气中 PAHs 的变化规律,本研究具有重要的科学意义和社会效益,以期为大气中 PAHs 类污染物的控制和治理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 大气样品的采集和处理

大气样品使用大流量空气采样器(TE-1000 型)采集,采样流量为 $0.24 \text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$,采样地点为哈尔滨市典型城区,周围没有明显的污染源,采样点高度为 12 m,采样时间为 2019 年 3 月 13 日降雪后的 24 h 内,一共采集了 8 次大气样品,每次采集时间为 3 h(为了保障大气中 PAHs 的检出率,采样过程中平行放置了 3 台采样器,3 台采样器的样品放在一起进行处理)。采样过程中,通过玻璃纤维滤膜(GFF)收集大气中的颗粒相,然后通过聚氨酯泡沫(PUF)收集气相样品。采样前,GFF 在 450°C 下焙烧 4h 以去除有机污染物,放在避光干燥器内平衡 24 h 后称重密封备用;PUF 使用二氯甲烷和正己烷分别索氏萃取 24 h 去除干扰,真空干燥器内干燥后,密封备用。采样后,GFF 和 PUF 都置于冰箱(-20°C)内避光、密封保存至处理。

大气样品的处理采用索氏萃取法和硅胶层析柱净化法进行。具体操作为:将采样后的 PUF 和 GFF 加入 4 种 PAHs 的代标静置后,分别用 300 mL 二氯甲烷和正己烷混合溶剂(1:1,体积比)和 150 mL 二氯甲烷进行萃取 24 h,用真空旋转蒸发仪将萃取液浓缩至 2~3 mL,进行硅胶层析柱净化,净化后的萃取液经过旋转蒸发仪和氮吹仪进行浓缩后,加入内标物质定容到 1 mL,放入冰箱中保存至分析。

1.2 降雪样品的采集和处理

降雪样品通过专用的湿沉降采样器采集,采样地点为哈尔滨市典型城区(与大气采样点相同),采样时间为 2019 年 3 月 13 日降雪的全过程。采集后的降雪样品融化后,置于冰箱中避光密闭保存至分析。预处理过程中,首先将融化后的雪样进行过滤,其中颗粒态的 PAHs 被吸附在滤膜上,溶解态的 PAHs 留在雪水中。雪水中 PAHs 的预处理采取液液萃取法,具体步骤为:往雪水中加入 4 种 PAHs 的代标,加入 100 mL 二氯甲烷进行液液萃取,振荡 20 min 后静置,将下层二氯甲烷溶液收集到干净的平底烧瓶中,重复以上萃取过程 3 次,将萃取液进行混合,后续样品浓缩、净化和再浓缩方法与大气样品的处理方法相同。滤膜中 PAHs 的预处理过程与大气采样中滤膜的预处理过程相同。

1.3 PAHs 的测定

本研究中使用 Agilent 6890N-5973 型气质联用仪用于 PAHs 的测定。通过标样中的目标物的色谱峰保留时间对实际样品中的目标物进行定性,通过内标曲线法进行定量分析,标线中 16 种 PAHs 混合标样:Naphthalene(Nap,萘)、Acenaphthylene(Acy,芴烯)、Acenaphthene(Ace,二氢芴)、Fluorene(Flu,芴)、Phenanthrene(Phe,菲)、Anthracene(Ant,蒽)、Fluoranthene(Fla,荧蒽)、Pyrene(Pyr,芘)、Benzo(a)anthracene(BaA,苯并[a]蒽)、Chrysene(Chry,蒽)、Benzo(b)fluoranthene(BbF,苯并[b]荧蒽)、Benzo(k)fluoranthene(BkF,苯并[k]荧蒽)、Benzo(a)pyrene(BaP,苯并[a]芘)、Dibenzo(a,h)anthracene(DahA,二苯并[a,h]蒽)、Indeno(1,2,3-cd)pyrene(InP,茚并[1,2,3-cd]芘)和 Benzo(ghi)perylene(BghiP,苯并[ghi]芘)的浓度梯度分别为 10、50、100、250 和 $500 \text{ ng} \cdot \text{mL}^{-1}$ 。色谱柱为 HP-5MS 型柱($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$),色谱柱升温程序为:保持柱温 90°C 1 min,然后以 $10^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速度升温至 180°C ,再以 $3^\circ\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 的升温速度将温度升至 280°C ,维持此温度 20 min;恒温无分流进样 $2.0 \mu\text{L}$,载气为高纯氦气;质谱仪的离子源能量是 70 eV 的电子轰击源。

1.4 质量控制和质量保证

实验过程中处理真实样品的过程中同时增加空白样品,用于检测方法的空白污染。在实验过程中添加 4 种代标物质(Naphthalene-D8、Fluorene-D10、Pyrene-D10 和 Perylene-D12),用于验证方法的回收率。本研究中的所有浓度均经过了扣除空白和代标回收率的校正。

2 结果与讨论

2.1 降雪中 PAHs 的浓度和组成特征

降雪中 PAHs 的浓度如表 1 所示,从中可以看出,16 种 PAHs 在颗粒态中的检出率为 100%,在溶解态中,除了 DahA 和 BghiP 的浓度低于检出限,其他 14 种 PAHs 的检出率为 100%,说明降雪能够对大气中的 PAHs 进行去除。从表 1 数据可以看出,总体趋势表现为低环和高环 PAHs 的浓度较低,而 3 环和 4 环 PAHs 的浓度较高。Nap 和 Phe 在颗粒态中的浓度最高,分别为 $470.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $374.5 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,Phe 和 Fla 在溶解态中的浓度最高,分别为 $163.8 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 和 $125.1 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$ 。16 种 PAHs 在降雪中的总浓度(颗粒态+溶解态)为 $2533 \text{ ng} \cdot \text{L}^{-1}$,该浓度远小于 2014 到 2015 年采集的哈尔滨雪样中的浓度(平均浓度为 $218.1 \mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$,中位数为 10.7

$\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$)^[10],说明随着大气污染防治行动计划的实施,哈尔滨大气中 PAHs 的浓度也呈现下降的趋势. 16 种 PAHs 中,总浓度最高的物质为 Phe (538.3 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),其次为 Nap (509.1 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$) 和 Fla (429.9 $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$),这个研究结果与哈尔滨市大气中 PAHs 的污染特征相似,哈尔滨大气中这 3 种主要 PAHs 也是浓度最高的,占总浓度 ($\sum_{16}\text{PAHs}$) 的百分比分别为 23%、20% 和 12%^[13],充分说明了降雪对于大气中 PAHs 的去除作用^[14]. 大量文献也表明大气中 PAHs 的浓度变化规律和环境归趋,除了受到污染源的影响外,也会受到干湿沉降的影响,所以有必要开展干湿沉降对于大气中 PAHs 去除规律的深入研究,为大气中 PAHs 的控制和治理提供科学依据^[15,16]. 降雪中的 PAHs 会进入地表,导致地表环境等受到污染,所以降雪中 PAHs 的污染及其相关的生态风险和健康风险评价也是值得关注的科学问题.

表 1 降雪中 PAHs 的浓度/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$

Table 1 Concentrations of PAHs in snow/ $\text{ng}\cdot\text{L}^{-1}$		
种类	溶解态	颗粒态
Nap	38.61	470.5
Acy	15.35	23.26
Ace	4.53	14.65
Flu	22.39	63.66
Phe	163.8	374.5
Ant	32.93	21.88
Fla	125.1	304.8
Pyr	67.31	184.7
BaA	25.05	44.10
Chry	19.13	136.3
BbF	28.14	96.53
BkF	13.42	50.06
BaP	19.35	36.36
InP	0.290	56.74
DahA	未检出	10.39
BghiP	未检出	68.88
$\sum_{16}\text{PAHs}$	575.4	1957

根据降雪中溶解态和颗粒态 PAHs 的浓度,可以进行 PAHs 组成特征的研究,结果如图 1 所示. 从中可以看出,16 种 PAHs 在降雪中溶解态和颗粒态的比例有较大差异. 整体来看,不论是高环的 PAHs,还是低环的 PAHs,在降雪中主要以颗粒态的形式存在,例如,浓度最高的 3 种物质 Nap、Phe 和 Fla,它们在颗粒态中的浓度占总浓度的比例分别为 92%、69% 和 70%. 该结果与大气中 PAHs 的组成有较大差异,哈尔滨大气中低环的 PAHs 主要以气相的形式存在,而高环的 PAHs 主要以颗粒相的形式存在^[13]. 降雪和大气中 PAHs 组成特征的差异性,说明了降雪对于大气颗粒相中的 PAHs 的去除效率要

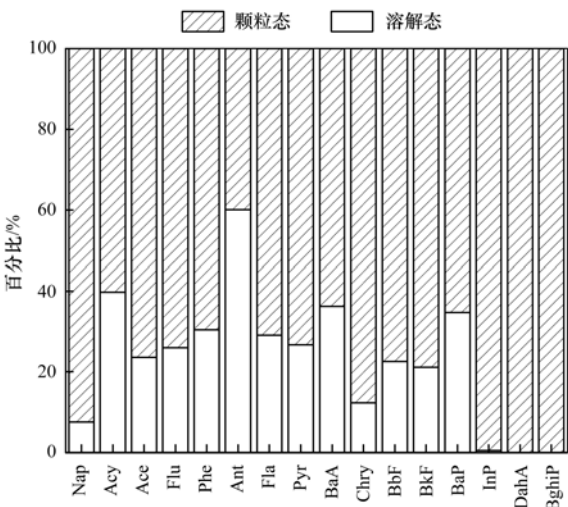


图 1 哈尔滨降雪中 PAHs 的组成成分
Fig. 1 Composition of PAHs in snow in Harbin

高于气相中的 PAHs.

2.2 降雪后大气中 PAHs 浓度的变化规律

降雪后 24 h 内大气中 16 种 PAHs 在颗粒相中的检出率都较高,在气相中,高环 PAHs 的检出率较低,降雪后大气中的 PAHs 的浓度除了会受到新排放 PAHs 的影响,同时还受到 PAHs 本身物理化学性质的影响,比如高环 PAHs 具有较高的辛醇-气分配系数,容易吸附在颗粒物上,所以高环 PAHs 在颗粒相中的检出率要高于气相. 整体来看,降雪后 24 h 内大气中 PAHs 主要为低环 PAHs,一方面可能由于降雪对于大气中高环 PAHs 的去除效率高,同时也可能因为新排放到大气中的 PAHs 也主要是低环 PAHs 为主. 有研究表明^[17~20],低环的 PAHs 具有急性毒性,因此降雪后大气中低环 PAHs 浓度的增加及其对人体健康造成的影响应当引起重视.

降雪后 24 h 内大气中 16 种 PAHs 总浓度(气相和颗粒相)随时间的变化趋势如图 2 所示. 从中可以看出,PAHs 的总浓度随着时间的变化呈现明显的规律,浓度陡升的时间段分别在 17:56~20:55 和 05:45~08:50,前者的浓度从 45.91 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到了 246.1 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,后者的浓度从 121.3 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$ 上升到了 301.0 $\text{ng}\cdot\text{m}^{-3}$,在两个时间段内,大气中 PAHs 的总浓度上升了两倍以上,说明这两个时间段内有 PAHs 的排放. 由于这两个时间段为居民上班和下班的时间,汽车尾气的排放量最大,所以汽车尾气的排放应该是这两个时间段内大气中 PAHs 明显增加的主要原因^[21]. 另外该采样点周围是典型的城区,所以汽车尾气的排放较为普遍. 整体来看,24 h 内的前半段大气中 PAHs 的浓度要远小于后半段大气中 PAHs 的浓度,说明随着时间的变化,人类活动会向大气中排放 PAHs,导致大气中 PAHs 的浓度逐渐

增加. 前半段时间内总浓度的最低值出现在 11:57 ~ 14:49 时间段, 大气中 16 种 PAHs 的总浓度为 $38.84 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 后半段大气中 PAHs 的浓度最低值出现在凌晨时段, 即 23:49 ~ 02:47 时间段, 从浓度变化曲线可以看出, 该时间段的浓度也是后半段的极小值, 浓度为 $123.4 \text{ ng} \cdot \text{m}^{-3}$, 这个时间段是居民活动最少的, 所以向大气中排放的 PAHs 的量最小. 整体来看, 降雪后 24 h 内大气中 PAHs 的浓度呈现下降-上升-下降的周期性变化规律, 根据哈尔滨市大气中 PAHs 的来源解析结果^[13], 可以推断降雪后 24 h 大气中 PAHs 的浓度的上升主要受人类活动的影响, 另外, 从浓度下降的趋势来看, 气象因素可能是大气中 PAHs 浓度阶段性降低的主要因素, 如空气的扩散稀释作用^[22].

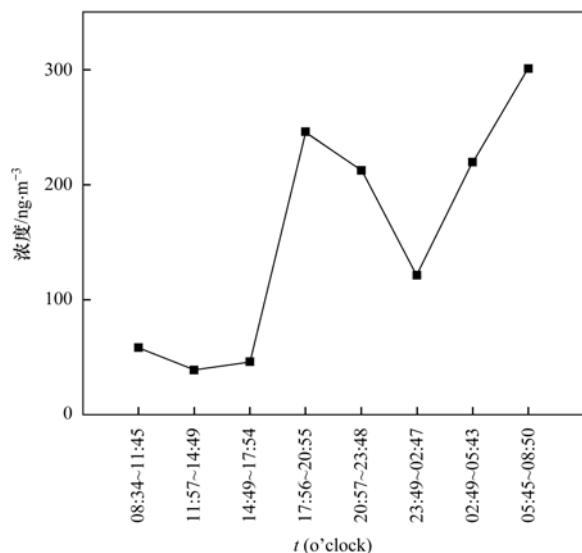


图2 降雪后大气中 PAHs 总浓度变化趋势

Fig. 2 Temporal trend of the total PAHs concentrations in atmosphere after snowfall

2.3 降雪后大气中 PAHs 组成的变化规律

降雪后 24 h 内大气中 PAHs 的浓度具有明显的变化规律, PAHs 的组成也有可能具有一定的变化规律. 为了研究降雪后大气中 PAHs 组成的变化规律, 本文选择了 3 个典型时间段: 降雪后的第 1 个阶段 (08:34 ~ 11:45), 下班高峰阶段 (17:56 ~ 20:55) 和凌晨阶段 (23:49 ~ 02:47), 进行 PAHs 组成的变化规律的研究. 3 个时间段内大气中 PAHs 的组成特征分别如图 3 ~ 5 所示. 从中可以看出, 在 3 个不同时间段内, PAHs 在两相间的比例呈现相似性, 低环 PAHs 主要分布在气相中, 高环 PAHs 主要分布在颗粒相中, 随着环数的增加, 其在颗粒相中的比例逐渐增加. 例如, Nap 在气相中的比例最高, 接近 99%, 5 环和 6 环的 DahA、InP 和 BghiP 在颗粒相中的比例最高, 比例为 100%, 这种组成特征和分布规律主要

受 PAHs 的物理化学性质决定. 有研究表明, 环境中 PAHs 的存在形态及分布受其物理、化学性质和周围环境的影响, 大气中的 PAHs 以气相和颗粒相两种形式存在, 低环 PAHs 主要以气相形式存在, 高环 PAHs 绝大部分以颗粒相形式存在^[22,23]. 尽管这 3 个时间段内 PAHs 的组成具有相似性, 但是也有细微的差别, 比如, 4 环和 5 环 PAHs 在气相和颗粒相中的比例差异性较大, 说明在降雪后的 24 h 内, 大气中 PAHs 不仅浓度会发生变化, 部分 PAHs 在气相和颗粒相中的分布比例也会发生变化.

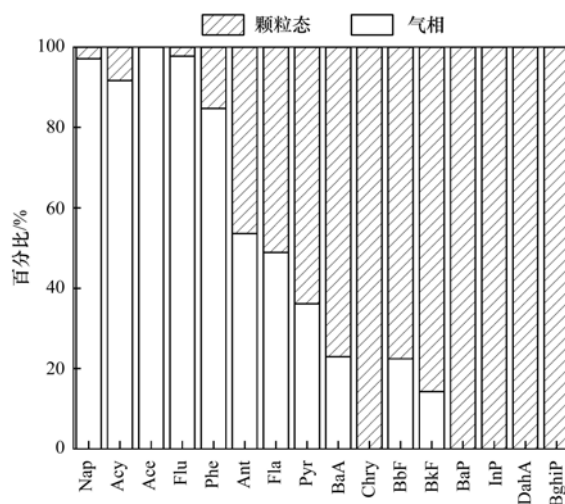


图3 08:34 ~ 11:45 时间段大气中 PAHs 的组成分布

Fig. 3 Composition of PAHs in air during the period of 08:34-11:45

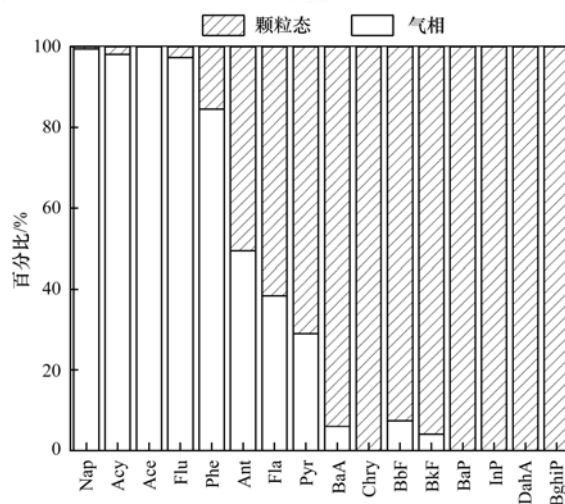


图4 17:56 ~ 20:55 时间段大气中 PAHs 的组成分布

Fig. 4 Composition of PAHs in air during the period of 17:56-20:55

2.4 降雪后大气中 PAHs 来源的变化规律

前面的研究发现, 降雪后 24 h 内大气中 PAHs 的浓度呈现明显的变化规律, 人类活动和气象因素可能是导致大气中 PAHs 浓度变化的主要原因. 本节将对降雪后 24 h 内大气中 PAHs 的来源进行定性识别, 试图进一步说明人类活动和气象因素对于大气中 PAHs 的影响. 特征分子比值法是大气中 PAHs

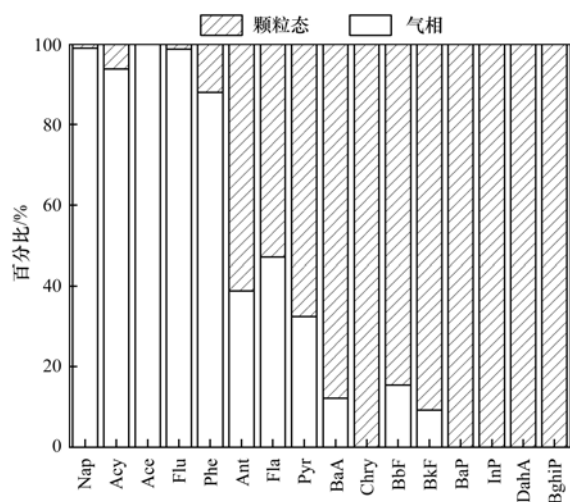


图5 23:49~02:47时间段大气中PAHs的组成分布

Fig. 5 Composition of PAHs in air during the period of 23:49-02:47

来源解析的重要方法,在大气中PAHs的定性识别中得到了广泛的应用^[24~26]. 本文选取 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 两组分子比值用于大气中PAHs的来源识别,结果如图6所示.

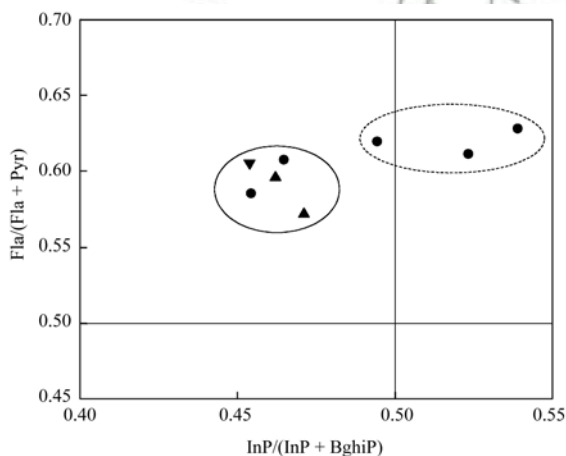


图6 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 和 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 分子比值

Fig. 6 Ratios of $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ and $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$

有研究表明,当 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的比值大于0.5时,表示PAHs主要来源于生物质和煤等固体燃料的燃烧源,当 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 的比值在0.2和0.5之间时,表示PAHs主要来源于液体化石燃烧的燃烧源(如汽车尾气),当 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 的比值大于0.5时,表示PAHs主要来源于生物质和煤等固体燃料的燃烧源^[27,28]. 从图6中可以得出,降雪后的连续8个时间段内大气中 $\text{Fla}/(\text{Fla} + \text{Pyr})$ 的比值都大于0.5,8个数值没有显著差异,说明生物质和煤等固体燃料的燃烧源是大气中PAHs的主要来

源. 而 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 的比值在8个数据之间具有明显的差异,可以看出,降雪后的前半段和后半段的比值分布在不同区间,前半段的比值集中在0.5以上,说明生物质和煤等固体燃料的燃烧源是大气中PAHs的主要来源,而后半段的比值则都小于0.5,说明液体化石燃烧的燃烧源是大气中PAHs的主要来源,这也与实际情况相符. 该采样点是哈尔滨的典型城区,采样时间为冬季供暖期,所以汽车尾气的排放和燃煤锅炉的烟气排放都较为普遍. 另外,从图2可以看出,在后半段大气中PAHs的浓度具有明显的变化,但是 $\text{InP}/(\text{InP} + \text{BghiP})$ 的比值却没有显著差异,见图6中的实线圆,说明浓度的变化并没有影响来源的解析结果. 综上所述,降雪后的24 h内,大气中PAHs的来源也发生了相应的变化.

3 结论

(1)降雪中16种PAHs的检出率为100%,说明降雪中PAHs的污染较为普遍. 降雪中颗粒态和溶解态的组成特征与大气中气相和颗粒相的组成特征具有明显的差异性,说明降雪对于颗粒相PAHs的去除效率高于气相PAHs.

(2)降雪后24 h内,大气中PAHs的浓度呈现下降-上升-下降的周期性变化规律,人类活动的排放(如汽车尾气)是浓度上升的主要原因,气象因素(如空气的扩散稀释作用)是浓度下降的主要原因.

(3)降雪后24 h内,大气中16种PAHs的在气相和颗粒相中的组成特征变化较小,其组成特征主要受PAHs的物理化学性质决定.

(4)固体燃料燃烧源和液体燃料燃烧源是降雪后24 h内大气中PAHs的主要来源,PAHs的来源的贡献率也会随着时间发生变化.

参考文献:

- [1] 李琦路, 吴锦涛, 张颖, 等. 新乡市机动车排放对道路灰尘中重金属与多环芳烃污染的影响[J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5258-5264.
Li Q L, Wu J T, Zhang Y, et al. Effects of vehicle emissions on heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons pollution in road dust in Xinxiang[J]. Environmental Science, 2019, 40(12): 5258-5264.
- [2] 刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 等. 聊城市冬季PM_{2.5}中多环芳烃来源解析及健康风险评估[J]. 环境科学, 2019, 40(9): 3875-3885.
Liu X D, Hou Z F, Meng J J, et al. Source analysis and health risk assessment of PAHs in PM_{2.5} during winter in Liaocheng City[J]. Environmental Science, 2019, 40(9): 3875-3885.
- [3] Zhang J, Li R F, Zhang X Y, et al. Vehicular contribution of PAHs in size dependent road dust: a source apportionment by PCA-MLR, PMF, and Unmix receptor models[J]. Science of the Total Environment, 2019, 649: 1314-1322.
- [4] Wei C, Bandowe B A M, Han Y M, et al. Polycyclic aromatic

- hydrocarbons (PAHs) and their derivatives (alkyl-PAHs, oxygenated-PAHs, nitrated-PAHs and azaarenes) in urban road dusts from Xi'an, Central China[J]. *Chemosphere*, 2015, **134**: 512-520.
- [5] Qu Y J, Gong Y M, Ma J, *et al.* Potential sources, influencing factors, and health risks of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in the surface soil of urban parks in Beijing, China[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **260**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114016.
- [6] Jia J P, Bi C J, Zhang J F, *et al.* Characterization of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) in vegetables near industrial areas of Shanghai, China: sources, exposure, and cancer risk [J]. *Environmental Pollution*, 2018, **241**: 750-758.
- [7] Ma W L, Zhu F J, Liu L Y, *et al.* PAHs in Chinese atmosphere Part II: health risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2020, **200**, doi: 10.1016/j.ecoenv.2020.110774.
- [8] Idowu O, Semple K T, Ramadass K, *et al.* Beyond the obvious: environmental health implications of polar polycyclic aromatic hydrocarbons[J]. *Environment International*, 2019, **123**: 543-557.
- [9] 孔祥胜, 祁士华, 黄保健, 等. 广西乐业大石围天坑群多环芳烃的干湿沉降[J]. *环境科学*, 2012, **33**(3): 746-753.
- Kong X S, Qi S H, Huang B J, *et al.* Atmospheric deposition of PAHs in Dashiwei Karst Tiankeng Group in Leye, Guangxi[J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(3): 746-753.
- [10] Gui S, Song Z H, Zhang L M., *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons in fresh snow in the city of Harbin in northeast China[J]. *Atmospheric Environment*, 2019, **215**, doi: 10.1016/j.atmosenv.2019.116915.
- [11] Garban B, Blanchoud H, Motelay-Massei A, *et al.* Atmospheric bulk deposition of PAHs onto France: trends from urban to remote sites[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(34): 5395-5403.
- [12] Park J S, Wade T L, Sweet S T. Atmospheric deposition of PAHs, PCBs, and organochlorine pesticides to Corpus Christi Bay, Texas[J]. *Atmospheric Environment*, 2002, **36**(10): 1707-1720.
- [13] Ma W L, Li Y F, Qi H, *et al.* Seasonal variations of sources of polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) to a northeastern urban city, China[J]. *Chemosphere*, 2010, **79**(4): 441-447.
- [14] Lei Y D, Wania F. Is rain or snow a more efficient scavenger of organic chemicals? [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(22): 3557-3571.
- [15] Meyer T, Wania F. Organic contaminant amplification during snowmelt[J]. *Water Research*, 2008, **42**(8-9): 1847-1865.
- [16] Yang M M, Wang Y, Li H L, *et al.* Polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) associated with PM_{2.5} within boundary layer: cloud/fog and regional transport[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, **627**: 613-621.
- [17] Chen S C, Liao C M. Health risk assessment on human exposed to environmental polycyclic aromatic hydrocarbons pollution sources[J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **366**(1): 112-123.
- [18] Wang S B, Ji Y Q, Zhao J B, *et al.* Source apportionment and toxicity assessment of PM_{2.5}-bound PAHs in a typical iron-steel industry city in northeast China by PMF-ILCR[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, **713**, doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136428.
- [19] Cao Z G, Wang M M, Shi S Y, *et al.* Size-distribution-based assessment of human inhalation and dermal exposure to airborne parent, oxygenated and chlorinated PAHs during a regional heavy haze episode[J]. *Environmental Pollution*, 2020, **263**, doi: 10.1016/j.envpol.2020.114661.
- [20] 王娟, 郭观林, 秦宁, 等. 某工业城市大气颗粒物中PAHs的粒径分布及人体呼吸系统暴露评估[J]. *环境科学*, 2019, **40**(10): 4345-4354.
- Wang J, Guo G L, Qin N, *et al.* Size distribution characteristics and inhalation exposure of particle-bound PAHs in an industrial city[J]. *Environmental Science*, 2019, **40**(10): 4345-4354.
- [21] Lin Y C, Li Y C, Amesho K T T, *et al.* Characterization and quantification of PM_{2.5} emissions and PAHs concentration in PM_{2.5} from the exhausts of diesel vehicles with various accumulated mileages[J]. *Science of The Total Environment*, 2019, **660**: 188-198.
- [22] Melymuk L, Robson M, Helm P A, *et al.* PCBs, PBDEs, and PAHs in Toronto air: spatial and seasonal trends and implications for contaminant transport[J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **429**: 272-280.
- [23] Kalisa E, Nagato E, Bizuru E, *et al.* Pollution characteristics and risk assessment of ambient PM_{2.5}-bound PAHs and NPAHs in typical Japanese and New Zealand cities and rural sites[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2019, **10**(5): 1396-1403.
- [24] Tobiszewski M, Namieśnik J. PAH diagnostic ratios for the identification of pollution emission sources[J]. *Environmental Pollution*, 2012, **162**: 110-119.
- [25] 顾爱军, 刘佳澍, 罗世鹏, 等. 常州市大气PM_{2.5}中PAHs污染特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(8): 3110-3119.
- Gu A J, Liu J S, Luo S P, *et al.* Pollution characteristics and source identification of PAHs in atmospheric PM_{2.5} in Changzhou city[J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(8): 3110-3119.
- [26] 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 等. 2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价[J]. *环境科学*, 2020, **41**(2): 564-573.
- Zhang Y X, Cao F, Zheng H, *et al.* Source apportionment and health risk assessment of polycyclic aromatic hydrocarbons in PM_{2.5} in Changchun city, autumn of 2017[J]. *Environmental Science*, 2020, **41**(2): 564-573.
- [27] 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.
- [28] Liang X X, Junaid M, Wang Z F, *et al.* Spatiotemporal distribution, source apportionment and ecological risk assessment of PBDEs and PAHs in the Guanlan River from rapidly urbanizing areas of Shenzhen, China[J]. *Environmental Pollution*, 2019, **250**, doi: 10.1016/j.envpol.2019.04.107.

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)