

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.9

第40卷 第9期

目次

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征	杜翔, 赵普生, 董群, 苏捷 (3849)
郑州市 2014~2017 年大气污染特征及气象条件影响分析	郭蒙蒙, 姜楠, 王申博, 段时光, 张瑞芹 (3856)
济南市背景区域大气 PM _{2.5} 污染特征及其对能见度的影响	别淑君, 杨凌霄, 高颖, 姜盼, 李岩岩, 杨雨蒙, 赵彤, 王文兴 (3868)
聊城市冬季 PM _{2.5} 中多环芳烃来源解析及健康风险评估	刘晓迪, 侯战方, 孟静静, 燕丽, 周贝贝, 刘子亭, 衣雅男, 李静, 魏本杰, 伏梦璇 (3875)
2001~2017 年全国气溶胶光学厚度时空分布及变化趋势	刘海知, 郭海燕, 马振峰, 徐辉, 包红军, 徐成鹏 (3886)
长三角地区吸收性气溶胶时空分布特征	赵楠, 曹梵诗, 田晴, 陈勇航, 刘琼, 黄艺伟, 王羽佳 (3898)
燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征	杨艳蓉, 周雪明, 秦娟娟, 谭吉华, 胡京南, 陈荣志, 段菁春, 李艳 (3908)
高速公路沿线 PM _{2.5} 中重金属污染特征	李晓宝, 廖祖文, 赵红, 彭成辉, 谭腾飞, 黄萍 (3916)
北京市道路扬尘重金属污染特征及潜在生态风险	胡月琪, 郭建辉, 张超, 王铮, 颜旭, 杨懂艳, 刘兆莹 (3924)
风蚀扬尘抑尘剂效率测试方法与应用	秦建平, 李贝贝, 杨涛, 宋博, 黄玉虎, 张春荣 (3935)
京津冀地区典型印刷企业 VOCs 排放特征及臭氧生成潜势分析	刘文文, 方莉, 郭秀锐, 聂磊, 王敏燕 (3942)
成都市典型工艺过程源挥发性有机物源成分谱	周子航, 邓也, 吴柯颖, 谭钦文, 周小玲, 宋丹林, 黄凤霞, 曾文斌 (3949)
工业园区恶臭污染源排放特征和健康风险评估	孟洁, 翟增秀, 荆博宇, 崔焕文, 王亘 (3962)
典型华北农村地区冬季 HONO 的浓度水平及来源分析	王玉征, 薛朝阳, 张成龙, 刘鹏飞, 张圆圆, 陈晖, 陈建民, 牟玉静, 刘俊峰 (3973)
不同方法制备 Co ₃ O ₄ 催化剂 CO-SCR 性能及机制	仲雪梅, 张涛, 李佳萌, 秦萱, 王亚洲, 曾洁, 张光明, 常化振 (3982)
全氟烷基物质在胶州湾海水、沉积物及生物中污染特征	崔杰文, 彭吉星, 谭志军, 翟毓秀, 郭萌萌, 李兆新, 牟海津 (3990)
江苏水源地型水库异味物质发生风险及影响因素	史鹏程, 朱广伟, 杨文斌, 许海, 朱梦圆, 邹伟, 胡林娜, 笪文怡, 季鹏飞 (4000)
城镇流域水体-沉积物中溶解性有机质的荧光特性及影响因素: 以宁波市小浃江为例	高凤, 邵美玲, 唐剑锋, 曹昌丽, 易辉 (4009)
水华对沉积物中氮的转化和去除的影响	肖琳, 杨佳怡 (4018)
沉积物有效态磷对湖库富营养化的指示及适用性	刘辉, 胡林娜, 朱梦圆, 赵林林, 许海, 邹伟, 史鹏程, 韩慧洁, 季鹏飞, 朱广伟 (4023)
汾河下游雨季硝酸盐污染源解析	汪银龙, 冯民权, 董向前 (4033)
新疆喀什三角洲地下水化学特征及演化规律	魏兴, 周金龙, 乃尉华, 曾妍妍, 范薇, 李斌 (4042)
基于多个扩增子的 DNA metabarcoding 技术探究黄海微型真核浮游植物多样性	张莉, 张远, 林佳宁, 王书平 (4052)
FG、MFG 和 MBFG 浮游植物功能群的比较: 以贵州三座水库为例	陈倩, 李秋华, 马欣洋, 熊梅君, 何应, 韩孟书 (4061)
天然含铁矿物对砷的吸附效果及机制	邵金秋, 温其谦, 阎秀兰, 申俊峰, 杨林生, 杨硕 (4072)
镁-钙羟基磷灰石吸附剂对水中 Pb ²⁺ 的去除	何豪, 朱宗强, 刘杰, 朱义年, 阎起明, 刘阳, 莫南, 玄惠灵, 魏婉莹 (4081)
2,6-二氨基蒽醌/石墨烯复合电极强化电吸附 Pb ²⁺	晋圣兆, 向阳, 张隽琦, 张凯, 吉庆华 (4091)
钙掺杂四氧化三铁回收水中磷的实验	白润英, 刘建明, 郝俊峰, 徐慧, 胡文斌, 宋蕾, 刘宇红, 李会东, 周琦善 (4098)
大型城市污水处理厂处理工艺对微塑料的去除	贾其隆, 陈浩, 赵昕, 李磊, 聂云汉, 叶建峰 (4105)
A ² /O 流量分配处理低 C/N 污水性能与微生物结构优化	荣懿, 刘小钗, 何音旋, 章武首, 金鹏康 (4113)
上向流厌氧滤池 (UAF) 处理城市生活污水的运行效能	杨忠启, 刘秀红, 李海鑫, 刘智斌, 刘润雨, 杨庆 (4121)
微氧条件下自养-异养联合反硝化工艺的电子平衡分析	张若晨, 陈川, 邵博, 王威, 徐熙俊, 任南琪 (4128)
基于反硝化除磷的低温启动与稳定运行的中试试验	张帆, 于德爽, 刘杰, 王晓霞, 宋新新, 李传举, 赵峰辉 (4136)
聚己内酯与聚羟基丁酸戊酸酯的脱氮性能对比	易成豪, 秦伟, 陈湛, 文湘华 (4143)
厌氧氨氧化颗粒污泥快速培养及其抑制动力学	唐鹏, 于德爽, 陈光辉, 张培玉, 王晓霞, 吕廷廷, 黄硕, 刘诚诚 (4152)
Ca ²⁺ 对污泥硝化活性和絮凝沉降性能的影响	张兰河, 赵倩男, 张海丰, 贾艳萍, 李正, 陈子成, 郭静波, 赵天鹏 (4160)
从剩余污泥厌氧发酵上清液中以鸟粪石形式回收磷	畅萧, 曾薇, 王保贵, 许欢欢 (4169)
信号分子联合脱氮硫杆菌对同步脱氮除硫的影响	徐金兰, 陈紫薇, 张少枫, 魏清旋 (4177)
海水养殖尾水直排对河道沉积物细菌群落的影响	胡越航, 宣丽霞, 裴琼芬 (4185)
耦合短程硝化反硝化的垃圾渗滤液厌氧氨氧化处理系统构建及微生物群落分析	赵晴, 刘梦莹, 吕慧, 梁俊宇, 刁兴兴, 张鑫, 孟了 (4195)
稻秸添加对两种水稻土产甲烷古菌及细菌的影响	保琼莉, 王凤花, 保万魁, 黄益宗 (4202)
地膜覆盖对稻-油轮作农田温室气体排放的影响	陈世杰, 江长胜, 倪雪, 李晓茜, 郝庆菊 (4213)
氮肥深施及间种白三叶草对茶园 N ₂ O 排放的影响	吕天新, 伍延正, 沈健林, 陈丹, 姜文倩, 王娟, 李勇, 吴金水 (4221)
三峡库区及其下游溶解氧化亚氮 (N ₂ O) 分布和释放	程芳, 丁帅, 刘素美, 宋国栋, 张桂玲 (4230)
沉降除藻协同沉积物覆盖对藻华水体甲烷释放的影响	朱琳, 于江华, 施文卿, 易齐涛, 曹华勇, 蒲寅羽 (4238)
新建铅蓄电池集聚区对周边土壤环境的影响: 基于重金属空间特征	丁亚丽, 廖敏, 方至萍, 陈树森, 张云, 郭佳雯, 梁雨琦 (4244)
不同碳氮磷源改良剂对铅锌尾矿废弃地植被与土壤性质的影响	杨胜香, 李凤梅, 彭禧柱, 曹建兵, 高智席 (4253)
基于农产品安全的土壤重金属有效态含量限值推定方法	张云慧, 杜平, 何赢, 仲小飞, 罗会龙, 秦晓鹏, 徐刚 (4262)
缙云山不同土地利用方式下土壤植硅体碳的含量特征	罗东海, 王子芳, 陆畅, 黄容, 王富华, 李娇, 高明 (4270)
西南喀斯特土地利用变化对植物凋落物-土壤 C、N、P 化学计量特征和土壤酶活性的影响	田静, 盛茂银, 汪攀, 温培才 (4278)
调理剂+淹水措施对 Cd 污染稻田控 Cd 效果分析	彭鸥, 刘玉玲, 铁柏清, 何钟响, 杨蕊嘉, 李丹阳, 刘寿涛, 罗海艳 (4287)
海螺沟植物和积雪中有机磷酸酯的分布及来源	陈阳, 印红玲, 吴迪, 罗怡, 邓旭, 徐维新, 柳锦宝 (4295)
《环境科学》征订启事 (3923) 《环境科学》征稿简则 (3941) 信息 (4041, 4051, 4229)	

燃煤锅炉颗粒物化学组成排放特征

杨艳蓉¹, 周雪明², 秦娟娟¹, 谭吉华¹, 胡京南², 陈荣志¹, 段菁春^{2*}, 李艳¹

(1. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012)

摘要: 本研究收集了兰州市不同吨位燃煤锅炉颗粒物排放样品, 分析并评估了锅炉烟气中水溶性无机离子、碳质组分、水溶性有机物 (WSOC) 以及多环芳烃 (PAHs) 的排放水平、排放特征及其影响因素。结果表明, SO_4^{2-} 、 Cl^- 和 Ca^{2+} 是燃煤锅炉样品中最主要的水溶性离子, 分别占水溶性离子总和的 35.13%、23.16% 和 22.20%。不同吨位燃煤锅炉样品的 OCEC 及其热解成分谱较为相似, OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2 和 EC3 分别占 TC 的 1.04%、8.26%、20.09%、6.78%、51.08%、7.09% 和 5.66%, 其中 EC1 的含量最高, 是最主要的碳质组分。WSOC/TC 和 WSOC/OC 分别为 0.09 ± 0.07 和 0.23 ± 0.12 , 且不同吨位锅炉之间差异较大。菲 (Phe)、芘 (Pyr) 和苯并(k)荧蒽 (BkF) 是 PAHs 的 3 个主要成分, 分别占 PAHs 总和的 16.69%、11.93% 和 10.66%。不同吨位燃煤锅炉所排放颗粒物中水溶性离子、OCEC 以及 WSOC 均与锅炉吨位大小无明显线性相关, 随着吨位的增加 PAHs 轻组分含量减小。

关键词: 燃煤锅炉; 水溶性离子; 碳质组分; 多环芳烃 (PAHs); 排放特征

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3908-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.201811185

Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers

YANG Yan-rong¹, ZHOU Xue-ming², QIN Juan-juan¹, TAN Ji-hua¹, HU Jing-nan², CHEN Rong-zhi¹, DUAN Jing-chun^{2*}, LI Yan¹

(1. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China)

Abstract: Samples of particulate matter from coal-fired boilers of different tons were collected in Lanzhou city, and the water-soluble inorganic ions, carbonaceous species, water-soluble organic compounds (WSOC) and polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs) were analyzed. The results showed that SO_4^{2-} , Cl^- , and Ca^{2+} were the most important water-soluble ions in the coal-fired boiler samples, accounting for 35.13%, 23.16%, and 22.20% of the total mass of water-soluble ions, respectively. The pyrolysis composition spectra of the carbonaceous species were similar among the coal-fired boilers, and organic carbon fraction (OC1, OC2, OC3, and OC4), and elemental carbon fraction (EC1, EC2, and EC3) accounted for 1.04%, 8.26%, 20.09%, 6.78%, 51.08%, 7.09%, and 5.66% of the total carbon (TC), respectively. EC1 had the highest content and was the most important carbonaceous species. The average ratios of WSOC/TC and WSOC/OC were 0.09 ± 0.07 and 0.23 ± 0.12 , respectively, and the difference among the boilers of different tons was large. Phenanthrene (Phe), pyrene (Pyr), and benzene(k)anthracene (BkF) were the three main components of the PAHs, accounting for 16.69%, 11.93%, and 10.66% of the total PAHs, respectively. The particulate water-soluble ions, organic/elemental carbon aerosol (OCEC) and WSOC emitted from different tons coal-fired boilers were not significantly linearly related to the tonnage of the steam boiler, and low molecular weight PAHs decreased with the increase of tonnage of the steam boiler.

Key words: coal-fired boilers; water-soluble ions; carbon components; polycyclic aromatic hydrocarbons (PAHs); emission characteristics

煤炭在我国能源结构中的比重长期保持在 70% 以上, 而且 85% 的煤炭是通过直接燃烧使用, 因此煤炭燃烧所排放的大气污染物是我国城市空气质量恶化的主要原因^[1~3]。大气颗粒物来源解析是目前空气质量管理工作中的重点, 其中以成分谱为基础的受体模型解析法应用最为广泛, 因此受体模型源解析的核心步骤就是获得准确且有代表性的源成分谱和标志物。由于不同类型的燃煤排放中无机成分相近从而较难得到精细化的源解析结果, 因此目前并没有有效手段区分不同燃煤源的贡献, 这增

加了城市空气质量管理的难度和成本。

目前我国研究人员在不同燃煤源成分谱上做了大量工作。有机物方面, 研究发现不同煤阶的煤和不同燃煤源排放的多环芳烃 (polycyclic aromatic hydrocarbons, PAHs) 成分谱均存在明显差异^[4, 5]。朱先磊等^[6, 7]不仅开展过燃煤源 PAHs 的成分谱研

收稿日期: 2018-11-23; 修订日期: 2019-03-26

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0208900); 国家自然科学基金项目 (41475116, 41675127)

作者简介: 杨艳蓉 (1994~), 女, 硕士, 主要研究方向为大气颗粒物来源解析, E-mail: yangyanrong17@mails.ucas.ac.cn

* 通信作者, E-mail: duanjc@craes.org.cn

究, 还建立了不同吨位锅炉具有代表性的 PAHs 源成分谱. Bi 等^[8]发现正构烷烃、正构烯烃和正构脂肪酸等均是燃煤排放较好的指示物. 无机物方面, 胡月琪等^[9]发现 SO_4^{2-} 是燃煤锅炉烟气中最主要的水溶性离子. 夏永军等还探究了燃煤锅炉排放的颗粒物中 $\text{PM}_{2.5}$ 与 PM_{10} 的组分差异^[10]. 另有研究利用在线单颗粒气溶胶质谱 (SPAMS) 构建了石家庄市固定排放源成分谱^[11]. 以上研究为探究燃煤成分谱积累了大量数据, 但这些研究往往局限于单一燃烧方式或单一物种, 缺乏较全面系统地研究.

本文采集兰州市不同吨位燃煤锅炉源样品, 开展有机组分[包括有机碳 (organic carbon, OC)、元素碳 (elemental carbon, EC)、水溶性有机物 (water-soluble organic compounds, WSOC)、多环芳烃 (PAHs)] 和无机组分 (水溶性无机离子) 等研究, 利用不同燃煤方式在燃烧温度、污染控制技术等方面的不同而引起的颗粒物排放在化学组分方面存在的差异性, 筛选可能存在的有效化学物种及指标. 本研究结果将有助于解决城市空气质量管理中, 单纯使用无机化学成分进行源解析而发生的共线性问题, 还有利于明确控制重点, 对降低社会控制成本具有一定意义.

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究结合兰州市环境监测站每年例行污染源监测, 收集不同燃煤锅炉颗粒物样品, 并收集同期各燃煤设备的负荷、工况和煤质参数等数据. 对收集的样品按吨位进行分类, 实现各种类型燃煤设备的全覆盖, 并从中挑选 24 台次不同吨位燃煤锅炉 (0.5、1、2、4、6、10、15、20、30 和 35 t) 进行样品分析. 挑选方案兼顾锅炉吨位、燃烧方式及锅炉年代等因素, 力求所选样品具有典型性及代表性, 其中除 0.5、30 和 35t 锅炉因数量较少仅选择 1 台外, 其它吨位锅炉均选择 3 台, 并对其中一台锅炉选取 3 组平行样 (如图 1). 采样时间为 2012 年兰州大气冬防期间, 该期间兰州市尚未加强锅炉的排放控制, 燃煤锅炉颗粒物排放总体处于较高的水平. 虽然目前国内部分地区已实现超低排放, 燃煤锅炉颗粒物排放水平显著降低, 但是本研究结果对于控制相对落后的地区以及历史数据分析有较大的借鉴意义.

1.2 样品分析方法

1.2.1 水溶性无机离子

使用直径为 1 cm 的打孔器从滤筒上切割出 6 片小膜, 为加强不同样品分析结果的可比性, 截取

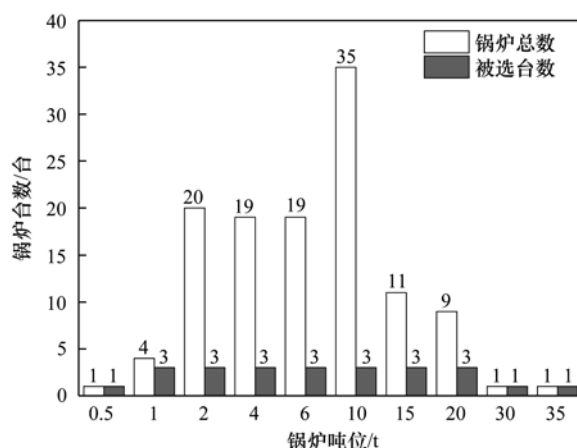


图1 兰州市燃煤锅炉及本研究被选燃煤锅炉吨位分布

Fig. 1 Coal-fired boilers in Lanzhou City and the tonnage distribution of selected coal-fired boilers in this study

小膜时切割口均匀分布且不同样品尽量保持相同位置. 重复两次 15 min 的超声振荡, 合并提取液并过滤. 随后采用 Dionex ICS 1100 以及 Dionex ICS 900 型离子色谱仪分别测定样品中的阴阳离子, 通过减去空白样品, 从而得到 8 种主要水溶性无机离子 (Na^+ 、 NH_4^+ 、 K^+ 、 Mg^{2+} 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 、 NO_3^- 及 SO_4^{2-}) 的质量浓度.

1.2.2 碳质组分

本研究采用 DRI 型热/光碳分析仪, 根据热光反射法分析 OC 和 EC. 首先, 从样品膜上截取出 0.526 cm^2 置于分析仪中, 在无氧且纯氮气的条件下, 在不同温度梯度下进行加热, 将有机碳组分 OC1、OC2、OC3 和 OC4 转化为气态 CO_2 ; 随后在含 2% 氧气的氮气条件下, 于更高的温度梯度进行加热, 分别使元素碳组分 EC1、EC2、EC3 逸散出来. 并在还原条件下使 CO_2 转化为 CH_4 , 使用 FID 检测 CH_4 . 有机碳在加热过程中热解碳化形成的元素碳定义为裂解碳 (OP), 因此 OC 的定义为 OC1、OC2、OC3、OC4 以及 OP 的总和, 而 EC 的定义为 EC1、EC2 和 EC3 之和减去 OP.

1.2.3 水溶性有机碳

WSOC 前处理方法同水溶性无机离子, 并采用 Analytic Jena AG multi N/C 3100 型号的总有机碳分析仪测定其质量浓度, 进样之后 WSOC 在 680°C 的高温条件下被 Pt 催化氧化为 CO_2 气体, 再用非色散红外检测器进行检测, 从而间接得到提取液中 WSOC 的质量浓度^[12].

1.2.4 多环芳烃 (PAHs)

本研究采用 HP6890-Micromass VG Platform 型号的气相色谱-质谱联用仪 (GC-MS) 测定锅炉烟气颗粒物中的多环芳烃. 所分析组分包含萘 (Acl)、二氢萘 (Ace)、芴 (FL)、菲 (Phe)、蒽 (Ant)、荧蒽

(Flu)、芘(Pyr)、苯并(a)蒽(BaA)、蒽(Chr)、苯并(b)荧蒽(BbF)、苯并(k)荧蒽(BkF)、苯并(a)芘(BAP)、二苯并(ah)蒽(DahA)、茚并(1,2,3-cd)芘(IcdP)以及苯并(ghi)芘(BghiP)。利用有机溶剂提取样品后,将提取液体积调节至1 μL ,以不分流的进样方式进行测定。以电子轰击源作为质谱离子源,选取分子离子为特征离子进行单离子扫描,并选用内标法进行定量,每个样品在测样之前需加入氘代指示物,定量结果利用这些指示物的回收率进行校正。

2 结果与讨论

2.1 水溶性无机离子的特征

如图2所示,本研究中测定了燃煤锅炉样品排放颗粒物中8种水溶性无机离子,按照占比依次为 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 NH_4^+ 、 K^+ 和 NO_3^- ,分别占水溶性离子质量总和的35.13%、23.16%、22.20%、11.62%、3.64%、2.17%、1.10%和0.98%(图2)。 SO_4^{2-} 是最主要的水溶性离子,其次为 Cl^- 和 Ca^{2+} ,三者之和占水溶性离子质量总和的80.49%,这与其他相关研究结果相似^[9,13]。除了0.5 t和30 t锅炉之外,其他不同吨位燃煤锅炉之间的离子组成差异并不明显,且离子组成与锅炉吨位大小之间并无明显的线性关系(图3)。

NH_4^+ 和 K^+ 在离子组成中占比较低,且不同吨位燃煤锅炉之间 NH_4^+ 含量比较稳定,研究表明生物质燃烧是大气细颗粒物中 NH_4^+ 和 K^+ 的重要一次来源^[14-16],因此可以用 NH_4^+ 和 K^+ 在离子组成

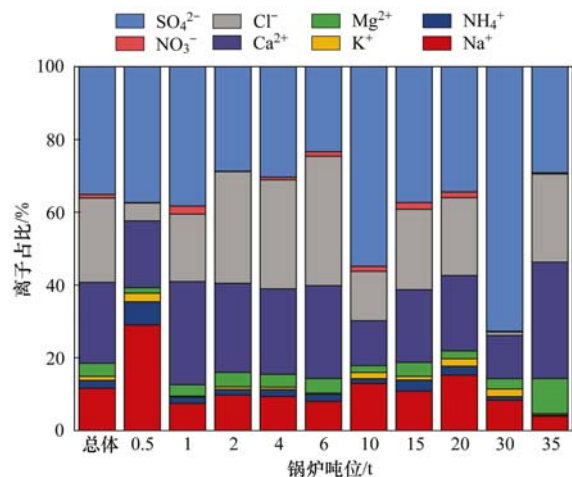


图2 燃煤锅炉样品水溶性无机离子谱分布

Fig. 2 Distribution of water-soluble inorganic ion spectrum of coal-fired boiler samples

中的比例来区分二者。本研究中 Cl^- 含量较高而 K^+ 含量较低,二者质量比(K^+/Cl^-)的平均值为 0.07 ± 0.12 ,远低于生物质燃烧源的 K^+/Cl^- (3.95)^[17-18],可能说明 K^+/Cl^- 可以作为用来区分二者的特征比值。

其他水溶性无机离子之间的比值也可以反映污染源的来源。如表1所示,本研究中 $n(\text{Cl}^-)/n(\text{Na}^+)$ 量比的变化范围为0.23~5.03,平均值为 1.98 ± 1.36 ,与海盐气溶胶中的比值($n[\text{Cl}^-]/n[\text{Na}^+] = 1.2$)差别较大^[19],说明 $n[\text{Cl}^-]/n[\text{Na}^+]$ 可以用于区分燃煤源和海盐。 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 质量比通常用来评估燃煤源与移动源排放的相对贡献,当 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-} > 1$ 认为污染物主要来自机动车

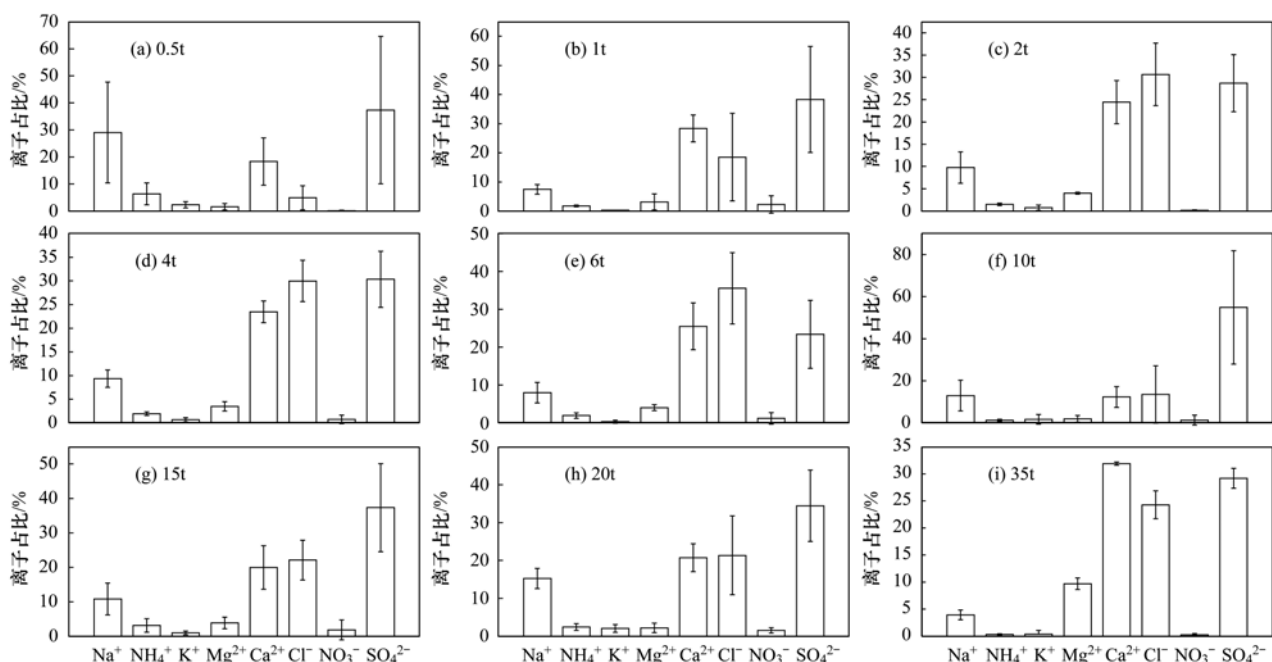


图3 不同吨位燃煤锅炉样品水溶性无机离子谱分布

Fig. 3 Distribution of water-soluble inorganic ion spectrum of samples of coal-fired boilers of different tons

尾气,当 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-} < 1$ 则认为污染物主要来自燃煤烟气^[20],燃煤锅炉样品中 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 在0~0.23之间变化,这说明 $\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$ 是一个区分燃煤源与移动源的良好指标.大气颗粒物中的 Mg^{2+} 和 Ca^{2+} 主要来源于扬尘和燃煤烟气,本研究中 $\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$

质量比的变化范围为0.04~0.33,平均值为 0.16 ± 0.07 ,明显高于扬尘颗粒物中的比值(0.09)^[21]. $\text{K}^+/\text{SO}_4^{2-}$ 平均值为 0.04 ± 0.04 ,远低于生物质燃烧源(0.22)^[22],因此 $\text{K}^+/\text{SO}_4^{2-}$ 可以用于区分生物质燃烧源和燃煤源.

表 1 燃煤锅炉样品中水溶性无机离子比值

无机离子比值	质量浓度比			量浓度比		
	最大值	最小值	平均值	最大值	最小值	平均值
K^+/Cl^-	0.47	0.00	0.07 ± 0.12	0.43	0.00	0.02 ± 0.10
Cl^-/Na^+	7.77	0.35	2.81 ± 2.17	5.03	0.23	1.98 ± 1.36
$\text{NO}_3^-/\text{SO}_4^{2-}$	0.23	0.00	0.04 ± 0.06	0.35	0.00	0.06 ± 0.09
$\text{K}^+/\text{SO}_4^{2-}$	0.25	0.00	0.04 ± 0.04	0.60	0.00	0.09 ± 0.11
$\text{Mg}^{2+}/\text{Ca}^{2+}$	0.33	0.04	0.16 ± 0.07	0.55	0.06	0.27 ± 0.12

2.2 碳质组分的特征

如图4所示,兰州市不同吨位碳质组分OC1、OC2、OC3、OC4、EC1、EC2和EC3分别占TC的1.04%、8.26%、20.09%、6.78%、51.08%、7.09%和5.66%.EC1的含量最高,是最主要的碳质组分,其次为OC3.不同吨位燃煤锅炉样品的OCEC及其热解成分谱较为相似,除10t和20t的锅炉外,其余吨位燃煤锅炉的

EC含量均大于OC.值得注意的是,来自同一台0.5t锅炉的3个重复样品,它们的OCEC热解成分谱却差异较大,这表明锅炉的运行稳定性可能会显著影响燃煤锅炉的OCEC热解成分谱,在燃烧不完全的情况下,燃煤锅炉排放的OC含量可能明显上升.10、15和20t燃煤锅炉在吨位相同锅炉不同的情况下,OCEC热解成分谱也具有显著的差异.

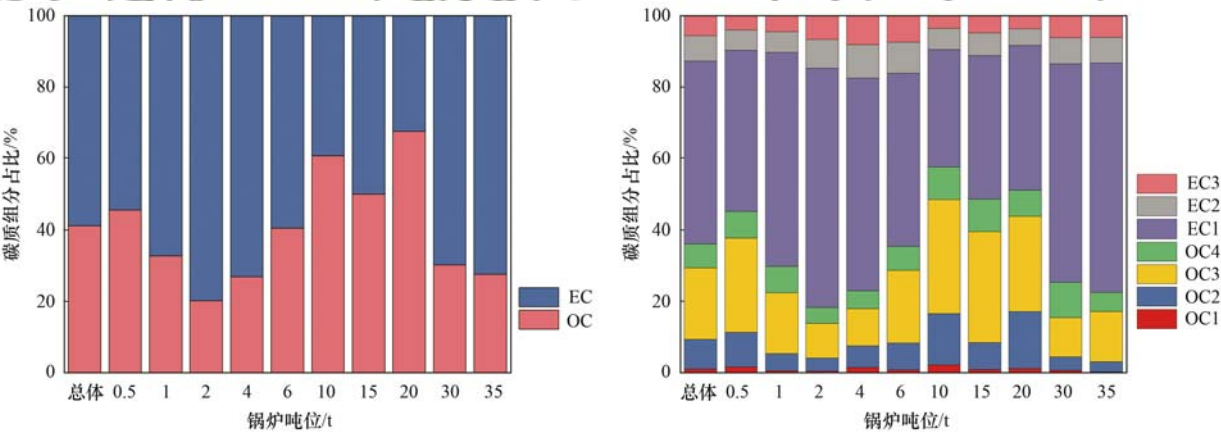


图 4 燃煤锅炉样品 OCEC 热解成分谱

Fig. 4 OC/EC pyrolysis composition spectrum of coal-fired boiler samples

图5显示了不同吨位燃煤锅炉中OC/TC和EC/TC的分布,从而得到不同吨位燃煤锅炉OC/EC的比值在0.14~4.96之间变化,平均值为 1.05 ± 1.14 ,与其他研究中烟煤排放的OC/EC(1.4 ± 1.3)比较接近^[23],与报道中机动车排放的OC/EC亦相差无几(1.19)^[24],但是明显小于生物质燃烧源的OC/EC(2.8~15)^[23, 25].由于燃烧温度对OC/EC比值有较大影响,不同污染源产生的OC/EC比值分布范围较广,因此使用OC/EC的比值进行来源判断的准确度还有待考证.本研究中 K^+/TC 质量比的变化范围是0~0.06,平均值为 0.03 ± 0.04 ,有报道称此比值的大小受生物质类型影响严

重^[26],在不同生物质燃烧烟气中的变化范围在0~0.16之间不等^[18, 26~28],因此 K^+/TC 无法作为区分燃煤源与生物质燃烧源的特征指标.

2.3 WSOC 的特征

本研究发现不同吨位燃煤锅炉样品中WSOC是OC的重要组成部分(图5),WSOC/TC和WSOC/OC的变化范围分别为0.01~0.30和0.02~0.05,平均值分别为 0.09 ± 0.07 和 0.23 ± 0.12 ,远低于生物质燃烧源排放颗粒物WSOC/TC(0.47)^[24, 28].不同吨位锅炉之间WSOC/TC和WSOC/OC差异较大,其中2t和4t锅炉的WSOC/TC最小,10t和20t锅炉的WSOC/OC最小,这种

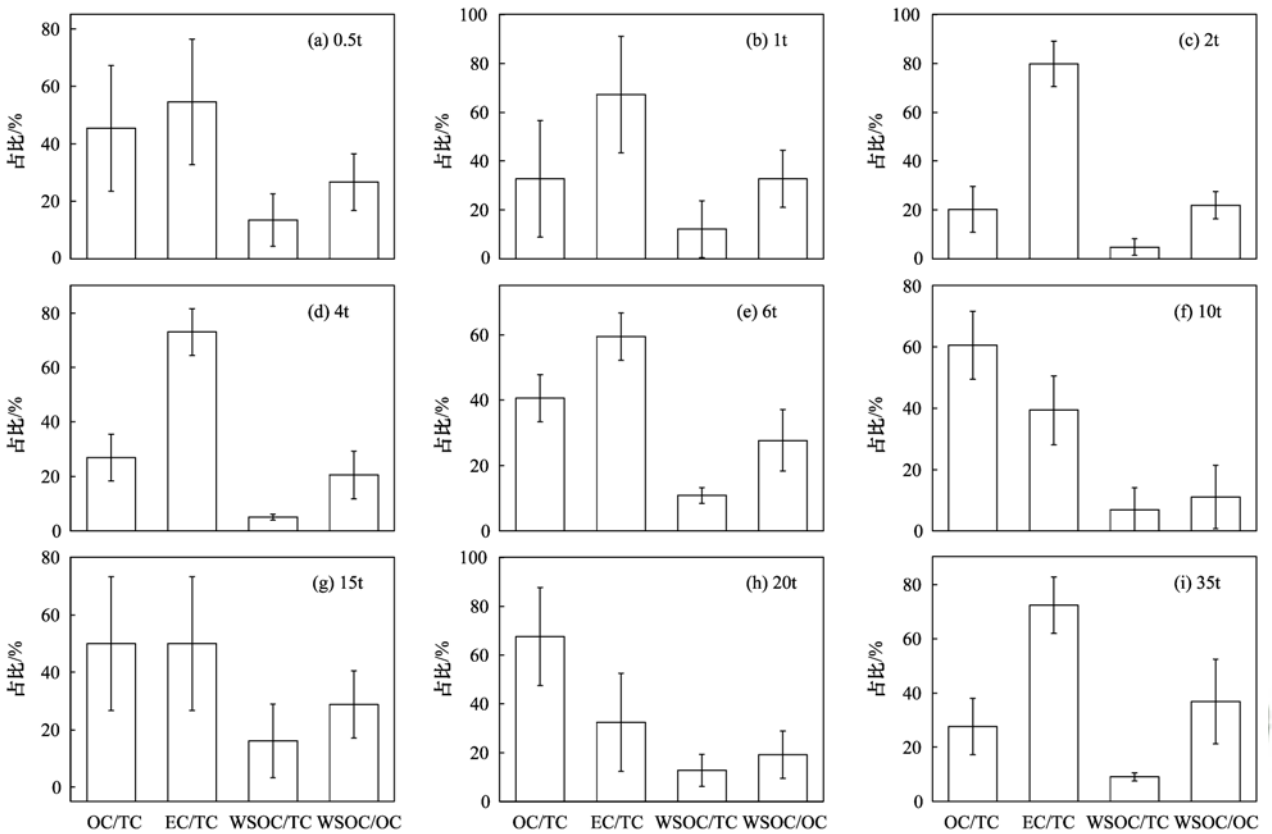


图 5 不同吨位燃煤锅炉样品中碳质组分比例分布

Fig. 5 Proportion distribution of carbonaceous components in samples of coal-fired boilers of different tonnage

差异可能与锅炉的燃烧状态和燃烧方式有关. 除此之外, WSOC/TC、WSOC/OC 这两个比值的大小与锅炉吨位亦无明显线性关系.

2.4 多环芳烃的特征

图 6 是燃煤锅炉样品排放颗粒物 PAHs 的组成分布. 整体来看: 苾 (Acl)、二氢苾 (Ace)、芴 (FL)、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) 和苯并(ghi)芘 (BghiP) 分别占 PAHs 总和的 1.46%、3.05%、6.21%、16.69%、5.95%、9.00%、11.93%、6.00%、8.69%、10.66%、2.29%、6.12%、2.51%、5.61% 和 3.82%. 其中菲 (Phe)、芘 (Pyr) 和苯并(k)荧蒽 (BkF) 是 3 个主要的 PAHs 成分. 轻组分 PAHs (分子量较小的 2~3 环 PAHs) 以菲、芴和蒽等为主, 中组分 PAHs (分子量适中的 4 环 PAHs) 主要是芘和荧蒽等, 而重组分 PAHs (分子量较大的 5~6 环 PAHs) 则主要为苯并(a)芘和茚并(1,2,3-cd)芘等. 在不同吨位燃烧锅炉排放的 PAHs 中菲 (Phe) 始终是占比最高 (20 t 锅炉除外) 的成分, 在低吨位燃煤锅炉排放中轻组分的占比比较高, 随着吨位的增加轻组分的占比相对减小, 而重

组分的占比随着吨位的增加而增加, 且在高吨位燃煤锅炉排放中所占比例较高. 低吨位燃煤锅炉排放的轻组分较多, 可能是由于原煤在燃烧过程中热解挥发, 未及时完全燃烧; 而高吨位燃煤锅炉排放的重组分较多可能是有机质在高温未完全燃烧进而被自由基氧化生成所致.

表 2 为燃煤锅炉样品颗粒态 PAHs 的特征比值, 其中 Ant/(Phe + Ant) 的变化范围为 0.11 ~ 0.48, 有研究认为蒽 (Ant) 的热力学稳定性不如菲 (Phe), 当此比值大于 0.1 时可表示燃烧源, 与本研究结果一致^[29]; 本研究中 Flu/(Pyr + Flu) 的平均值为 0.43 ± 0.04, 而其他研究结果认为煤燃烧产生的该比值大于 0.5^[30]; BaA/(Chr + BaA) 的变化范围是 0.21 ~ 0.77, 平均值为 0.42 ± 0.15, 而通常燃烧源的该比值大于 0.35^[31], 这一差异可能是原煤在燃烧过程中部分产生热解所致^[30]. 燃煤锅炉样

表 2 燃煤锅炉样品中 PAHs 的特征比值			
Table 2 Characteristic ratios of PAHs in coal-fired boiler samples			
PAHs 特征比值	最大值	最小值	平均值
Ant/(Phe + Ant)	0.48	0.11	0.27 ± 0.12
Flu/(Pyr + Flu)	0.51	0.34	0.43 ± 0.04
BaA/(Chr + BaA)	0.77	0.21	0.42 ± 0.15
IcdP/(IcdP + BghiP)	0.78	0.06	0.60 ± 0.15
BaP/BghiP	2.85	0.09	1.85 ± 0.60

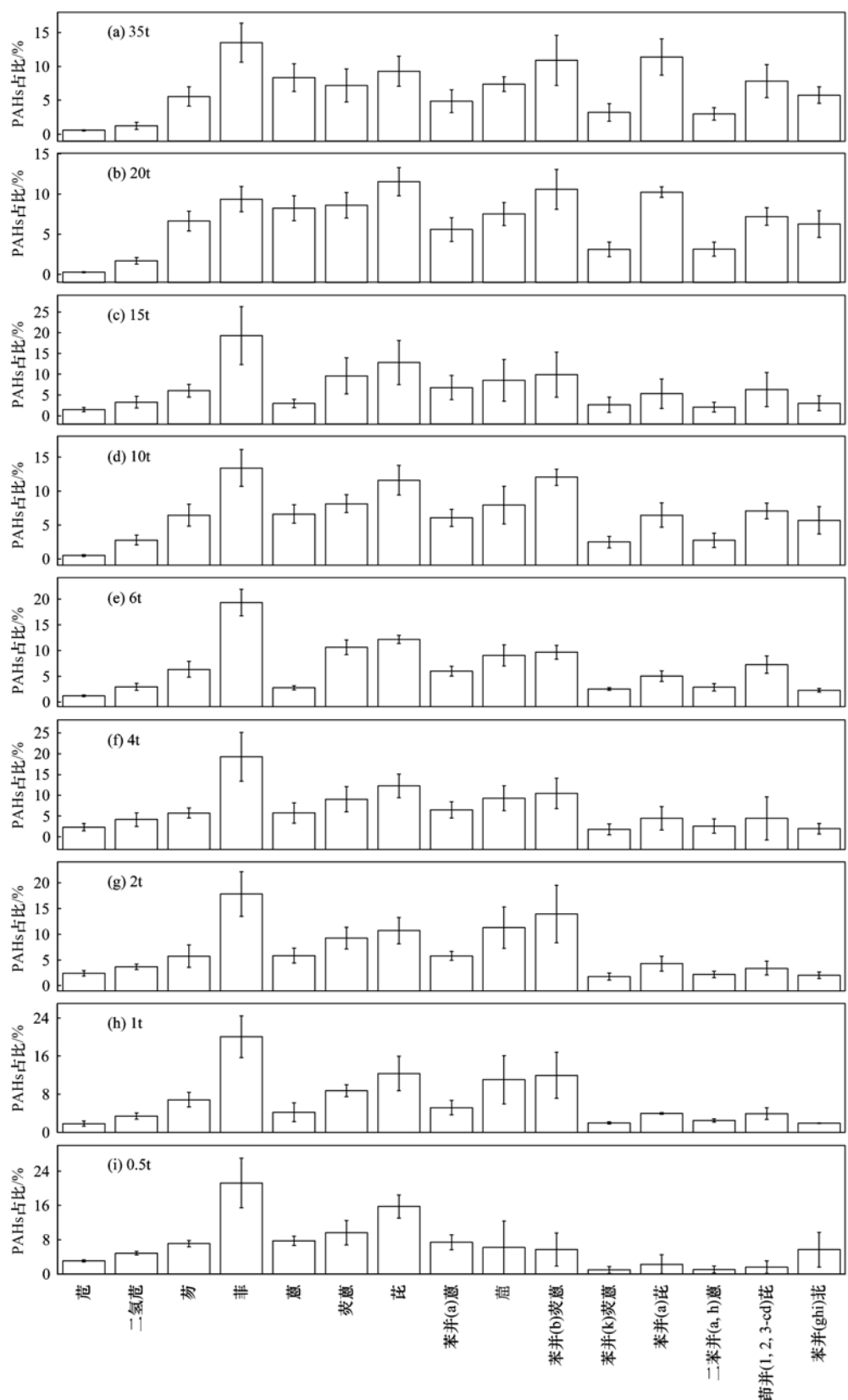


图 6 不同吨位燃煤锅炉样品中 PAHs 组成分布

Fig. 6 Distribution of PAHs in samples of coal-fired boilers of different tonnage

品的 IcdP/(IcdP + BghiP) 的平均值为 0.60 ± 0.15 ，其他文献报道当此比值大于 0.5 时，可用于表征生物质燃烧源和燃煤源^[30]，与本研究结果相符。BaP/BghiP 的平均值为 1.85 ± 0.60 ，这与其他关于燃煤

源的研究结论相似^[32]。

3 结论

(1) SO_4^{2-} 、 Cl^- 以及 Ca^{2+} 是兰州市燃煤锅炉样

品中最主要的3种水溶性离子,分别占水溶性离子总和的35.13%、23.16%以及22.20%。不同吨位燃煤锅炉样品的OCEC及其热解成分谱较为相似,其中EC1是燃煤锅炉样品中最主要的碳质组分。平均OC/EC为 1.06 ± 1.14 ,与生物质燃烧源有明显区别。WSOC/TC和WSOC/OC平均值分别为 0.09 ± 0.07 和 0.23 ± 0.12 ,不同吨位锅炉之间WSOC/TC和WSOC/OC差异较大。特征比值 K^+/Cl^- 和 K^+/SO_4^{2-} 可用来有效区分燃煤源和生物质燃烧源。

(2) 菲(Phe)、芘(Pyr)和苯并(k)荧蒽(BkF)是3个主要的PAHs成分,分别占PAHs总和的16.69%、11.93%和10.66%。部分PAHs之间的特征比值,比如 $Ant/(Phe + Ant)$ 和 $IcdP/(IcdP + BghiP)$ 可以作为区分燃煤源与其他人为源的指标。

(3) 兰州市不同吨位燃煤锅炉所排放颗粒物中水溶性离子、OCEC以及WSOC均与锅炉吨位大小无明显线性关系,随着吨位增加,轻组分PAHs的占比相对减小,重组分PAHs的占比相对增加。

参考文献:

- [1] 郑玫, 张延君, 闫才青, 等. 上海PM_{2.5}工业源谱的建立[J]. 中国环境科学, 2013, **33**(8): 1354-1359.
Zheng M, Zhang Y J, Yan C J, *et al.* Establishing PM_{2.5} industrial source profiles in Shanghai[J]. China Environmental Science, 2013, **33**(8): 1354-1359.
- [2] 路娜, 李治国, 周静博, 等. 2015年石家庄市采暖期一次重污染过程细颗粒物在线来源解析[J]. 环境科学, 2017, **38**(3): 884-893.
Lu N, Li Z G, Zhou J B, *et al.* Online source analysis of particulate matter (PM_{2.5}) in a heavy pollution process of Shijiazhuang city during heating period in 2015 [J]. Environmental Science, 2017, **38**(3): 884-893.
- [3] 王新, 聂燕, 陈红, 等. 兰州城区大气PM_{2.5}污染特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(5): 1619-1628.
Wang X, Nie Y, Chen H, *et al.* Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou city [J]. Environmental Science, 2016, **37**(5): 1619-1628.
- [4] Chen Y J, Sheng G Y, Bi X H, *et al.* Emission factors for carbonaceous particles and polycyclic aromatic hydrocarbons from residential coal combustion in China[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(6): 1861-1867.
- [5] Yang H H, Lee W J, Chen S J, *et al.* PAH emission from various industrial stacks [J]. Journal of Hazardous Materials, 1998, **60**(2): 159-174.
- [6] 朱先磊, 刘维立, 卢妍妍, 等. 民用燃煤、焦化厂和石油沥青工业多环芳烃源成分谱的比较研究[J]. 环境科学学报, 2002, **22**(2): 199-203.
Zhu X L, Liu W L, Lu Y Y, *et al.* A comparison of PAHs source profiles of domestic coal combustion, coke plant and petroleum asphalt industry [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, **22**(2): 199-203.
- [7] 朱先磊, 刘维立, 卢妍妍, 等. 燃煤烟尘多环芳烃成分谱特征的研究[J]. 环境科学研究, 2001, **14**(5): 4-8.
Zhu X L, Liu W L, Lu Y Y, *et al.* Study on the characteristics of PAHs source profile of coal combustion [J]. Research of Environmental Sciences, 2001, **14**(5): 4-8.
- [8] Bi X H, Simoneit B R T, Sheng G Y, *et al.* Characterization of molecular markers in smoke from residential coal combustion in China[J]. Fuel, 2008, **87**(1): 112-119.
- [9] 胡月琪, 马召辉, 冯亚君, 等. 北京市燃煤锅炉烟气中水溶性离子排放特征[J]. 环境科学, 2015, **36**(6): 1966-1974.
Hu Y Q, Ma Z H, Feng Y J, *et al.* Emission characteristics of water-soluble ions in fumes of coal fired boilers in Beijing [J]. Environmental Science, 2015, **36**(6): 1966-1974.
- [10] 夏永军, 黄学敏, 宋文斌, 等. 西安市燃煤锅炉排放颗粒物中PM_{2.5}和PM₁₀的组分研究[J]. 环境污染与防治, 2017, **39**(2): 207-211.
- [11] 周静博, 任毅斌, 洪纲, 等. 利用SPAMS研究石家庄市冬季连续灰霾天气的污染特征及成因[J]. 环境科学, 2015, **36**(11): 3972-3980.
Zhou J B, Ren Y B, Hong G, *et al.* Characteristics and formation mechanism of a multi-day haze in the winter of Shijiazhuang using a single particle aerosol mass spectrometer (SPAMS) [J]. Environmental Science, 2015, **36**(11): 3972-3980.
- [12] Tan J H, Zhang L M, Zhou X M, *et al.* Chemical characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Lanzhou, China [J]. Science of the Total Environment, 2017, **601-602**: 1743-1752.
- [13] 郭兴明, 郝吉明, 段雷, 等. 大容量燃煤电站锅炉水溶性离子排放特征[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2006, **46**(12): 1991-1994.
- [14] Andreae M O. Soot carbon and excess fine potassium: long-range transport of combustion-derived aerosols [J]. Science, 1983, **220**(4602): 1148-1151.
- [15] Qiao T, Zhao M F, Xiu G L, *et al.* Seasonal variations of water soluble composition (WSOC, Hulis and WSIs) in PM₁ and its implications on haze pollution in urban Shanghai, China [J]. Atmospheric Environment, 2015, **123**: 306-314.
- [16] Ma Y, Weber R J, Lee Y N, *et al.* Characteristics and influence of biomass on the fine-particle ionic composition measured in Asian outflow during the Transport and Chemical Evolution Over the Pacific (TRACE-P) experiment [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2003, **108**(D21): 8816.
- [17] Watson J G, Chow J C, Houck J E. PM_{2.5} chemical source profiles for vehicle exhaust, vegetative burning, geological material, and coal burning in Northwestern Colorado during 1995 [J]. Chemosphere, 2001, **43**(8): 1141-1151.
- [18] Schmidl C, Bauer H, Dattler A, *et al.* Chemical characterisation of particle emissions from burning leaves [J]. Atmospheric Environment, 2008, **42**(40): 9070-9079.
- [19] Keene W C, Pszenny A A P, Galloway J N, *et al.* Sea-salt corrections and interpretation of constituent ratios in marine precipitation [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 1986, **91**(D6): 6647-6658.
- [20] Yao X H, Chan C K, Fang M, *et al.* The water-soluble ionic composition of PM_{2.5} in Shanghai and Beijing, China [J]. Atmospheric Environment, 2002, **36**(26): 4223-4234.
- [21] He Q S, Yan Y L, Guo L L, *et al.* Characterization and source analysis of water-soluble inorganic ionic species in PM_{2.5} in Taiyuan city, China [J]. Atmospheric Research, 2017, **184**: 48-55.
- [22] Shen Z X, Cao J J, Arimoto R, *et al.* Ionic composition of TSP and PM_{2.5} during dust storms and air pollution episodes at Xi'an, China [J]. Atmospheric Environment, 2009, **43**(18): 2911-2918.
- [23] Tian J, Ni H Y, Cao J J, *et al.* Characteristics of carbonaceous particles from residential coal combustion and agricultural biomass

- burning in China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8** (3): 521-527.
- [24] Hu Z F, Kang S C, Li C L, *et al.* Light absorption of biomass burning and vehicle emission-sourced carbonaceous aerosols of the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2017, **24**(18): 15369-15378.
- [25] Samara C, Voutsas D, Kouras A, *et al.* Organic and elemental carbon associated to PM₁₀ and PM_{2.5} at urban sites of northern Greece[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2014, **21**(3): 1769-1785.
- [26] Zhang Y Y, Obrist D, Zielinska B, *et al.* Particulate emissions from different types of biomass burning [J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **72**: 27-35.
- [27] McDonald J D, Zielinska B, Fujita E M, *et al.* Emissions from charbroiling and grilling of chicken and beef[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2003, **53** (2): 185-194.
- [28] Tao J, Zhang L M, Engling G, *et al.* Chemical composition of PM_{2.5} in an urban environment in Chengdu, China: importance of springtime dust storms and biomass burning[J]. *Atmospheric Research*, 2013, **122**: 270-283.
- [29] Zhou J B, Wang T G, Huang Y B, *et al.* Size distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in urban and suburban sites of Beijing, China[J]. *Chemosphere*, 2005, **61**(6): 792-799.
- [30] 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.
- [31] Liu S Z, Tao S, Liu W X, *et al.* Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons in North China: A winter-time study[J]. *Environmental Science & Technology*, 2007, **41** (24): 8256-8261.
- [32] Grimmer G, Jacob J, Naujack K W. Profile of the polycyclic aromatic compounds from crude oils: Part 3. Inventory by GCGC/MS. —PAH in environmental materials[J]. *Fresenius' Zeitschrift Für Analytische Chemie*, 1983, **314**(1): 29-36.



CONTENTS

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols	DU Xiang, ZHAO Pu-sheng, DONG Qun, <i>et al.</i> (3849)
Analysis of Air Pollution Characteristics and Meteorological Conditions in Zhengzhou from 2014 to 2017	GUO Meng-meng, JIANG Nan, WANG Shen-bo, <i>et al.</i> (3856)
Characteristics of Atmospheric PM _{2.5} Pollution and Its Influence on Visibility in Background Areas of Ji'nan	BIE Shu-jun, YANG Ling-xiao, GAO Ying, <i>et al.</i> (3868)
Source Analysis and Health Risk Assessment of PAHs in PM _{2.5} During Winter in Liaohe City	LIU Xiao-di, HOU Zhan-fang, MENG Jing-jing, <i>et al.</i> (3875)
Temporal-Spatial Characteristics and Variability in Aerosol Optical Depth over China During 2001-2017	LIU Hai-zhi, GUO Hai-yan, MA Zhen-feng, <i>et al.</i> (3886)
Spatial-Temporal Distribution of Absorptive Aerosols in the Yangtze River Delta	ZHAO Nan, CAO Fan-shi, TIAN Qing, <i>et al.</i> (3898)
Emission Characteristics of Chemical Composition of Particulate Matter from Coal-fired Boilers	YANG Yan-rong, ZHOU Xue-ming, QIN Juan-juan, <i>et al.</i> (3908)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in PM _{2.5} Near Highway	LI Xiao-bao, LIAO Zu-wen, ZHAO Hong, <i>et al.</i> (3916)
Pollution Characteristics and Potential Ecological Risks of Heavy Metals in Road Dust in Beijing	HU Yue-qi, GUO Jian-hui, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (3924)
Application of Test Method for Dust Suppression Efficiency of Wind Erosion Dust Suppressant	QIN Jian-ping, LI Bei-bei, YANG Tao, <i>et al.</i> (3935)
Emission Characteristics and Ozone Formation Potential of VOCs in Printing Enterprises in Beijing-Tianjin-Hebei	LIU Wen-wen, FANG Li, GUO Xiu-rui, <i>et al.</i> (3942)
Source Profiles of VOCs Associated with Typical Industrial Processes in Chengdu	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, WU Ke-ying, <i>et al.</i> (3949)
Characterization and Health Risk Assessment of Exposure to Odorous Pollutants Emitted from Industrial Odor Sources	MENG Jie, ZHAI Zeng-xiu, JING Bo-yu, <i>et al.</i> (3962)
Analysis of HONO Concentration and Source in Typical Rural Area of North China	WANG Yu-zheng, XUE Chao-yang, ZHANG Cheng-long, <i>et al.</i> (3973)
CO-SCR Performance and Mechanism over Co ₃ O ₄ Catalysts	ZHONG Xue-mei, ZHANG Tao, LI Jia-yin, <i>et al.</i> (3982)
Pollution Characteristics of Perfluorinated Alkyl Substances (PFASs) in Seawater, Sediments, and Biological Samples from Jiaozhou Bay, China	 CUI Wen-jie, PENG Ji-xing, TAN Zhi-jun, <i>et al.</i> (3990)
Occurrence and Influencing Factors of Odorous Compounds in Reservoirs Used as Drinking Water Resources in Jiangsu Province	 SHI Peng-cheng, ZHU Guang-wei, YANG Wen-bin, <i>et al.</i> (4000)
Fluorescence Characteristics and Influencing Factors of Dissolved Organic Matter (DOM) in Water and Sediment of Urban Watershed: A Case Study of Xiaojia River in Ningbo City	 GAO Feng, SHAO Mei-ling, TANG Jian-feng, <i>et al.</i> (4009)
Water Bloom Modified Sediment Nitrogen Transformation and Removal	 XIAO Lin, YANG Jia-yi (4018)
Applicability of Bioavailable Phosphorus in Sediments to Indicating Trophic Levels of Lakes and Reservoirs	LIU Hui, HU Lin-na, ZHU Meng-yuan, <i>et al.</i> (4023)
Analysis of Nitrate Pollution Sources in the Rainy Season of the Lower Fenhe River	WANG Yin-long, FENG Min-quan, DONG Xiang-qian (4033)
Hydrochemical Characteristics and Evolution of Groundwater in the Kashgar Delta Area in Xinjiang	WEI Xing, ZHOU Jin-long, NAI Wei-hua, <i>et al.</i> (4042)
Community Diversity of Eukaryotic Nano-phytoplankton in Yellow Sea Using DNA Metabarcoding Technology Based on Multiple Amplicons	 ZHANG Li, ZHANG Yuan, LIN Jia-ning, <i>et al.</i> (4052)
Comparison of Functional Groups of Phytoplankton in FG, MFG, and MBFG; Taking Three Reservoirs as an Example in Guizhou Plateau	CHEN Qian, LI Qiu-hua, MA Xin-yang, <i>et al.</i> (4061)
Adsorption and Mechanism of Arsenic by Natural Iron-containing Minerals	SHAO Jin-qiu, WEN Qi-qian, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4072)
Removal of Pb ²⁺ from Aqueous Solution by Magnesium-Calcium Hydroxyapatite Adsorbent	HE Hao, ZHU Zong-qiang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4081)
Intensified Electrosorption of Pb ²⁺ by 2,6-diaminoanthraquinone/Graphene Composite Electrode	JIN Sheng-yao, XIANG Yang, ZHANG Jun-yu, <i>et al.</i> (4091)
Experiment on Recovery of Phosphorus from Aqueous Solution by Calcium Doped Fe ₃ O ₄	BAI Run-ying, LIU Jian-ming, HAO Jian-feng, <i>et al.</i> (4098)
Removal of Microplastics by Different Treatment Processes in Shanghai Large Municipal Wastewater Treatment Plants	JIA Qi-long, CHEN Hao, ZHAO Xin, <i>et al.</i> (4105)
Enhanced Nutrient Removal and Microbial Community Structure in a Step-feed A ² /O Process Treating Low-C/N Municipal Wastewater	RONG Yi, LIU Xiao-chai, HE Yin-xuan, <i>et al.</i> (4113)
Performances Analysis of an Upflow Anaerobic Filter for Domestic Sewage Treatment	YANG Zhong-qi, LIU Xiu-hong, LI Hai-xin, <i>et al.</i> (4121)
Electron Equilibrium Analysis of Integrated Autotrophic and Heterotrophic Denitrification Process Under Micro-aerobic Conditions	ZHANG Ruo-chen, CHEN Chuan, SHAO Bo, <i>et al.</i> (4128)
Pilot Study on Start-up and Stable Operation at Low Temperature Based on Denitrifying Phosphorus Removal	ZHANG Fan, YU De-shuang, LIU Jie, <i>et al.</i> (4136)
Comparison of Polycaprolactone and Poly-3-hydroxybutyrate-co-3-hydroxyvalerate for Nitrogen Removal	YI Cheng-hao, QIN Wei, CHEN Zhan, <i>et al.</i> (4143)
Rapid Cultivation of Anaerobic Ammonium Oxidation Granular Sludge and Inhibition Kinetics of Granular Sludge	TANG Peng, YU De-shuang, CHEN Guang-hui, <i>et al.</i> (4152)
Effect of Ca ²⁺ on the Nitrification Activity and the Flocculation and Sedimentation Performances of the Activated Sludge	ZHANG Lan-he, ZHAO Qian-nan, ZHANG Hai-feng, <i>et al.</i> (4160)
Recovery of Phosphorus in the Form of Struvite from the Anaerobic Fermentation Supernatant of Excess Sludge	CHANG Xiao, ZENG Wei, WANG Bao-gui, <i>et al.</i> (4169)
Effect of Signal Molecule Combined with <i>Thiobacillus denitrificans</i> on Simultaneous Removal of Nitrogen and Sulfur	XU Jin-lan, CHEN Zi-wei, ZHANG Shao-feng, <i>et al.</i> (4177)
Bacterial Community Composition in Channel Sediment in Response to Mariculture Wastewater Drainage	HU Yue-hang, XUAN Li-xia, QIU Qiong-fen (4185)
Setup and Microbial Community Analysis of ANAMMOX System for Landfill Leachate Treatment Coupling Partial Nitrification-Denitrification Process	 ZHAO Qing, LIU Meng-ying, LÜ Hui, <i>et al.</i> (4195)
Effects of Rice Straw Addition on Methanogenic Archaea and Bacteria in Two Paddy Soils	BAO Qiong-li, WANG Feng-hua, BAO Wan-kui, <i>et al.</i> (4202)
Effect of Plastic Film Mulching on Greenhouse Gas Emissions from Rice-Rapeseed Rotation in Cropland	CHEN Shi-jie, JIANG Chang-sheng, NI Xue, <i>et al.</i> (4213)
N ₂ O Emissions from a Tea Field with Deep Application of Nitrogen Fertilizer and Intercropping with White Clover	LÜ Tian-xin, WU Yan-zheng, SHEN Jian-lin, <i>et al.</i> (4221)
Distribution and Emission of Nitrous Oxide (N ₂ O) in Three Gorges Reservoir and Downstream River	CHENG Fang, DING Shuai, LIU Su-mei, <i>et al.</i> (4230)
Synergy of Algal Sedimentation and Sediment Capping for Methane Emission Control in Bloom Waters	ZHU Lin, YU Jiang-hua, SHI Wen-qing, <i>et al.</i> (4238)
Impact of Newly Build Lead-Acid Battery Agglomeration Area on the Surrounding Soil Environment: A Study Based on the Spatial Characteristics of Heavy Metals	 DING Ya-li, LIAO Min, FANG Zhi-ping, <i>et al.</i> (4244)
Effects of Amendments with Different C/N/P Ratios on Plant and Soil Properties of a Pb-Zn Mine Tailings	YANG Sheng-xiang, LI Feng-mei, PENG Xi-zhu, <i>et al.</i> (4253)
Derivation of the Thresholds of Available Concentrations of Heavy Metals in Soil Based on Agricultural Product Safety	ZHANG Yun-hui, DU Ping, HE Ying, <i>et al.</i> (4262)
Content of Soil Phytolith-Occcluded Organic Carbon in Different Land Use Patterns at Jinyun Mountain	LUO Dong-hai, WANG Zi-fang, LU Chang, <i>et al.</i> (4270)
Influence of Land Use Change on Litter and Soil C, N, P Stoichiometric Characteristics and Soil Enzyme Activity in Karst Ecosystem, Southwest China	 TIAN Jing, SHENG Mao-yin, WANG Pan, <i>et al.</i> (4278)
Effect of Conditioning Agent Combined with Flooding Measures on Absorption and Accumulation of Cadmium in Rice	PENG Ou, LIU Yu-ling, TIE Bai-qing, <i>et al.</i> (4287)
Distribution and Sources of OPEs in Plants and Snow in Hailuoguo	CHEN Yang, YIN Hong-ling, WU Di, <i>et al.</i> (4295)