

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: 以宁波市小浞江为例	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, 张隽瑀, 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)	

气溶胶中不同类型碳组分粒径分布特征

杜翔^{1,2}, 赵普生^{2*}, 董群^{2,3}, 苏捷²

(1. 南开大学环境科学与工程学院, 国家环境保护城市空气颗粒物污染防治重点实验室, 天津 300071; 2. 北京城市气象研究院, 北京 100089; 3. 宁波北仑区气象局, 宁波 315800)

摘要: 了解气溶胶碳组分粒径分布特征对于研究区域气溶胶生成转化机制、辐射特性等非常重要, 但北京地区针对气溶胶碳组分粒径分布特征的相关研究非常少。本研究利用 MOUDI-120 采样器在北京地区 3 个季节开展气溶胶分级样品的采集, 并分析其中不同类型的碳组分的含量, 进而系统研究不同季节及污染状况下, 各碳组分的粒径分布特征、来源及相互关系。结果表明, 碳组分主要富集在细粒子中, 秋冬季细粒子中碳组分的比重高于夏季。碳组分主要分布在两个模态, 即积聚模态和粗模态。OC1 和 OC2 主要分布在积聚模态, 在 0.056~0.56 μm 范围内有较高比例, OC3 + OC4 在粗模态的分布较为明显。Soot-EC 浓度较低, 没有明显的粒径分布特征, 在 0.10~0.18 μm 粒径段浓度较高, 表明高温燃烧排放的 EC 主要分布在超细粒径段。Char-EC 浓度远高于 Soot-EC, 在 EC 中占绝大部分比重。各主要碳组分在白天和夜晚的分布形态基本一致。夏季和冬季较有利于 SOC 的形成, OC/EC 比值明显高于秋季。OC/EC 值在不同粒径区间中差异很大, 由于水溶性有机物 (WSOC) 主要分布在 0.056~0.10 μm , OC/EC 值明显高于其他粒径段。白天及高温有利于气态有机物氧化生成 SOC, 致使夏季白天的 OC/EC 比值明显高于夜晚。各碳组分之间, EC1 和 OC1 相关性最强, 此外 EC1 和 K^+ 也有很强的相关性。

关键词: 北京; 气溶胶; 碳组分; 粒径分布; OC/EC

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)09-3849-07 DOI: 10.13227/j.hjxx.201903057

Size Distributions of Different Carbonaceous Components in Ambient Aerosols

DU Xiang^{1,2}, ZHAO Pu-sheng^{2*}, DONG Qun^{2,3}, SU Jie²

(1. State Environmental Protection Key Laboratory of Urban Ambient Air Particulate Matter Pollution Prevention and Control, College of Environmental Science and Engineering, Nankai University, Tianjin 300071, China; 2. Institute of Urban Meteorology, China Meteorological Administration, Beijing 100089, China; 3. Beilun Bureau of Meteorology, Ningbo 315800, China)

Abstract: It is important to obtain the size distribution of carbonaceous components in aerosols for studying the formation and transformation mechanisms and radiation characteristics of regional aerosols. However, only a few studies on the size distribution of aerosol carbonaceous fractions have been conducted in Beijing. In this study, a Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor (MOUDI)-120 sampler was used to collect size-resolved aerosol samples in three seasons in Beijing, and the concentrations of different types of carbonaceous fractions were analyzed. Furthermore, the size distribution, characteristics, sources, and interrelationship of each carbonaceous component in different seasons and under different pollution levels were systematically studied. The results show that the carbonaceous components were concentrated mainly in fine particles, and the proportion of carbonaceous components in fine particles in autumn and winter was higher than that in summer. The carbonaceous components are distributed in two main modes: accumulation mode and coarse mode. Organic carbon fraction 1 (OC1) and OC2 were distributed mainly in the accumulated mode, with a higher proportion in the range of 0.056-0.56 μm , and OC3 + OC4 was more abundant in the coarse mode. The concentration of Soot-elemental carbon (EC) was low but was highest in the 0.10-0.18 μm size range, which indicates that the EC emitted by high temperature combustion was distributed mainly in the ultra-fine particle size range. The Char-EC concentration was much higher, accounting for the majority of EC. The distribution appearances of the main carbonaceous components were essentially the same in the daytime and at night. Summer and winter were more conducive to the formation of SOC, and the OC/EC ratio was significantly higher than that in autumn. The OC/EC values varied greatly in different particle sizes because the water-soluble organic compounds (WSOC) were distributed mainly in the range of 0.056-0.10 μm , with significantly higher OC/EC values than other particle sizes. Sunlight and high temperature were beneficial to the oxidation of gaseous organic matter to SOC, resulting in the OC/EC ratio in summer in daytime to be significantly higher than that at night. Among the carbonaceous components, EC1 and OC1 had the strongest interrelation. In addition, EC1 also had stronger interrelation with potassium.

Key words: Beijing; aerosol; carbonaceous component; size distribution; OC/EC

碳组分是环境气溶胶中的重要化学组分, 包含有机碳 (OC) 和元素碳 (EC), 根据观测手段差异, 元素碳又被称为黑碳 (BC), 有机碳和元素碳加和称为总碳 (TC)。有机碳主要来源为化石燃料燃烧、机动车尾气、生物质燃烧和烹调过程中产生的一次排放的有机物, 此外挥发性有机物 (VOCs) 经过气粒转化或者凝结吸附等过程, 可生成二次有机碳

(SOC)。EC 基本上为一次污染物, 源自化石或生物质的不完全燃烧。华北地区 OC 和 EC 占 $\text{PM}_{2.5}$ 质量

收稿日期: 2019-03-06; 修订日期: 2019-04-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41675131); 北京市优秀人才培养项目 (2014000021223ZK49)

作者简介: 杜翔 (1993~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向气溶胶理化特征, E-mail: 120445687@qq.com

* 通信作者, E-mail: pszhao@ium.cn

浓度的比例分别在 15% ~ 20% 和 5% ~ 8% 左右, 燃煤污染越重的地区总碳占 $\text{PM}_{2.5}$ 的比例越高^[1,2]. 气溶胶中有机物种类众多, 包含大量对人体健康有害的物质, 如多环芳烃等^[3,4]. 此外, OC 可以对光线产生散射作用, 影响大气能见度和气溶胶的辐射效应^[5], 其中部分有机物具有水溶性, 可以促使气溶胶吸湿增长, 进一步提升其散射能力^[6]. EC 对消光的贡献主要是吸收作用, 是大气消光的重要组成部分, 北京地区 EC 的吸收系数占到总消光系数的 4% 左右^[7].

气溶胶根据其粒径分布特征可归纳为 4 种模态: 核模态 (3 ~ 20 nm)、爱根模态 (20 ~ 100 nm)、积聚模态 (0.1 ~ 1 μm) 和粗模态 (大于 1 μm), 积聚模态中又有两个亚模态, 凝结模态和液滴模态. 不同模态气溶胶在理化特征、来源及形成机制方面均有较大差别^[8~11]. 了解气溶胶及其主要化学组分的详细粒径分布特征, 对于开展气溶胶生成转化机理、消光及辐射特性、吸湿增长能力等方面的研究非常重要.

获取气溶胶中 OC 和 EC 的粒径分布信息, 主要有如下几种途径, 利用气溶胶质谱可以在线观测气溶胶中有机物的含量和分布特征^[12], 利用单颗粒黑碳光度计 (SP2) 可以在线观测黑碳气溶胶的浓度、粒径分布和混合状态. 此外, 还可以利用分级采样器采集不同粒径等级的气溶胶样品, 分析采样膜上的 OC 和 EC 的含量信息^[13], 此种方法不仅可以得到 OC 和 EC 的总量, 还可以得到更细节的不同类型碳组分浓度.

随着污染源的治理, 很多区域性气溶胶污染得到了很大程度缓解, 北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度下降明显. 但是, 京津冀地区仍然是中国气溶胶污染及雾、霾最严重的区域. 此外, 由于污染源的变化和城市群的发展, 使得北京及较大区域内的气溶胶, 无论在浓度水平还是环境效应上, 近些年一直在变化^[1, 2, 14~16], 不同季节、天气及污染条件下, 气溶胶及其主要吸湿及消光化学组分的分布特点也有很大差异^[13,17,18]. 北京及周边地区针对 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分和来源开展了很多研究, 但对主要化学组分的多粒径等级的分布特征研究较少, 且大多数针对水溶性离子的粒径分布^[19~22], 对于含碳组分粒径分布特征的研究更少. 赵普生课题组 2013 ~ 2017 年间, 在北京地区利用 MOUDI-120 和 122 分级采样器系统采集了不同粒径等级的气溶胶样品, 并分析了不同季节及污染状况下, 主要化学组分的粒径分布特征, 此外还创新性地研究了采样时采样器内的实际相对湿度^[13,17, 23]. 但以上研究中, 针对含碳组分只

分析了 OC 和 EC 整体的特征, 并没有针对更详细含碳组分展开深入讨论.

本文利用 2013 ~ 2015 年在北京地区采样得到的气溶胶分级碳组分信息, 深入分析不同季节气溶胶中精细化碳组分的分布特征, 并进一步分析不同类型 OC 和 EC 之间, 以及碳组分和水溶性离子在浓度特征和来源方面的关系, 以期为进一步开展相关研究和业务应用提供依据和参考.

1 材料与方法

1.1 样品采集和处理

观测点位于北京海淀区北京城市气象研究院楼顶 (39°94'N, 116°30'E), 距地面约 36 m, 采样口距离顶楼地面约 1.5 m. 该观测点周围无固定污染源, 其观测结果可代表北京城区大气污染状况.

选择 MOUDI-120 型 10 级微孔分级采样器 (Micro-Orifice Uniform Deposit Impactor, MSP 公司) 对气溶胶样品进行采集. 采样器流量为 30 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$, 校正空气动力学切割粒径分别为 0.056、0.10、0.18、0.32、0.56、1.0、1.8、3.1、6.2、9.9 和 18 μm , 每组样品共 10 级 (大于 18 μm 及小于 0.056 μm 的气溶胶粒子不收集).

2013-07-12 ~ 2013-07-18、2014-01-13 ~ 2014-01-19、2014-07-03 ~ 2014-07-05、2014-10-09 ~ 2014-10-20 以及 2015-01-26 ~ 2015-01-28 开展分级采样. 每天采集两次, 采样时段为 08:00 ~ 19:00, 20:00 ~ 次日 07:00, 单次采样时段为 11 h, 每次采样中间间隔 1 h, 用于滤膜更换和设备清洗. 采样器正常采样 30 min 后, 使用流量计对流量进行测量, 然后根据导出的各级之间的压差变化, 计算采样时段内的实际流量. 夏季、秋季和冬季分别采集了 15 组、14 组和 18 组样品. 具体采样时段及对应的 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度 (Teom1405DF 数据) 详见文献 [13, 17]. 此外, 前期研究中, 利用采样过程中采样器各级内部的压强、温度, 结合环境温度、相对湿度、大气压等数据, 计算了采样器内部的实际相对湿度, 发现在采样时, 切割粒径在 1.0 μm 以下等级的内部实际相对湿度大多在 40% 以下, 考虑到粗模态粒子吸湿性较差, 所以近似认为采样期间各粒径段粒子均处于较为干燥的状态.

采样时选择 47 mm 石英滤膜 (Pall), 石英膜在使用前在 800℃ 的马弗炉中烘烤 3 h, 用来除去其自身杂质. 采样时采样器各级之间添加特氟龙垫圈来抵消石英膜的厚度, 保证切割粒径的准确. 由于石英膜对温湿度较为敏感, 极易发生碎屑掉落, 且每

级滤膜采集到的分级气溶胶样品量很少，所以石英膜不能用于分级样品称重。

1.2 样品分析

MOUDI-120 采样器具有膜托旋转功能，可以使采集样品在滤膜上均匀分布，在 1/4 石英滤膜上截取 0.5 cm² 的圆片，进入 DRI-2001A 型碳分析仪，选择 IMPROVE_A 升温协议^[24~26]，分析得到单位滤膜面积中 OC1、OC2、OC3、OC4、OP、EC1、EC2 和 EC3 等组分的量。其中 OC = OC1 + OC2 + OC3 + OC4 + OP，EC = EC1 + EC2 + EC3 - OP。测量每级滤膜上采集到气溶胶样品的面积，进而计算每张滤膜采集到的碳组分的总质量，除以采样流量得到碳组分的环境质量浓度。

采样过程中，既有气态有机物吸附到滤膜上产生的正误差，也有颗粒态有机物挥发产生的负误差，所以采样中产生的 OC 偏差无法定量得到。滤膜在储存、移动和裁剪等环节中也可能产生的污染

或者误差，本研究中采用相同方法分析了 20 张空白滤膜，计算得到空白膜中 OC 和 EC 的平均含量，作为分析误差扣除。

2 结果与讨论

2.1 碳组分粒径分布整体特征

表 1 为不同季节细粒子 (<1.8 μm) 和粗粒子 (>1.8 μm) 中不同类型碳组分的平均浓度，可以发现秋季和冬季采样时段里，细粒子 (<1.8 μm) 中碳组分平均浓度远高于夏季，主要是由于秋季和冬季所有采样时段 PM_{2.5} 平均浓度高于夏季 (86.6 μg·m⁻³)，特别是秋季，所有 14 个采样时段 PM_{2.5} 总平均浓度达到 218.4 μg·m⁻³，冬季为 131.3 μg·m⁻³。如果以 1.8 μm 以下粒子中碳组分浓度近似为 PM_{2.5}，可以发现秋冬季细粒子中碳组分的比重仍然高于夏季。粗粒子中碳组分浓度远低于细粒子，即碳组分主要富集在细粒子中。

表 1 不同季节细粒子 (<1.8 μm) 和粗粒子 (>1.8 μm) 中不同类型碳组分的平均浓度

Table 1 Average concentrations of different carbonaceous components in fine (<1.8 μm) and coarse (>1.8 μm) particles for different seasons		碳组分浓度/μg·m ⁻³									
粒径范围/μm	季节	OC1	OC2	OC3	OC4	EC1	EC2	EC3	OC	EC	OC/EC
<1.8	夏季	0.60	4.12	2.46	1.36	2.61	0.54	0.00	8.55	3.15	2.71
	秋季	3.82	6.65	6.41	4.52	13.15	0.95	0.13	21.40	14.22	1.50
	冬季	2.73	3.99	4.73	5.46	6.85	0.47	0.02	16.91	7.34	2.30
>1.8	夏季	0.24	1.23	1.62	1.05	0.81	0.20	0.00	4.14	1.01	4.10
	秋季	0.87	2.13	3.58	3.35	3.34	0.66	0.12	9.92	4.12	2.41
	冬季	0.71	1.32	1.92	1.87	1.86	0.28	0.02	5.83	2.16	2.70

图 1 为 3 个季节 OC 和 EC 的平均粒径分布，明显可以看到碳组分的两个主要模态，即积聚模态和粗模态，在夏季和秋季还可以看出积聚模态中存在两个亚模态，即凝结模态 (condensation mode) 和液滴模态 (droplet mode)。其中夏季分布中凝结模态较为明显。

2.2 不同碳组分粒径分布特征

利用碳分析仪分析滤膜样品时，会经历多个不同温度状态，进而分析出多个不同的含碳组分，分析过程中温度的不同，也表明这些碳组分的存在形态和来源有较大差异。前期研究表明，在 OC 中，OC1 析出温度最低，通常为半挥发性有机物，OC2

通常被认识是二次有机碳，而 OC3 和 OC4 则主要为一次来源。对于 EC 来说，EC1 (或 EC1-OP) 通常被称为 Char-EC，即化石燃料或生物质在较低的温度下不完全燃烧生成的元素碳，在碳分析仪中，在相对较低的温度下即可析出；EC2 + EC3 通常被称为 Soot-EC，是燃料在温度较高条件下燃烧生成，通常为机动车尾气或者燃煤源排放^[27~30]。

从图 2 中可知，OC1 和 OC2 主要分布在积聚模态，在粗模态也有少量分布，且在夏季以及其他季节的清洁条件下，OC1 和 OC2 在 0.056~0.56 μm 范围内占整体 OC1 和 OC2 的比例明显高于其他条件，表明在夏季以及清洁条件下，有利于气粒转化生成的

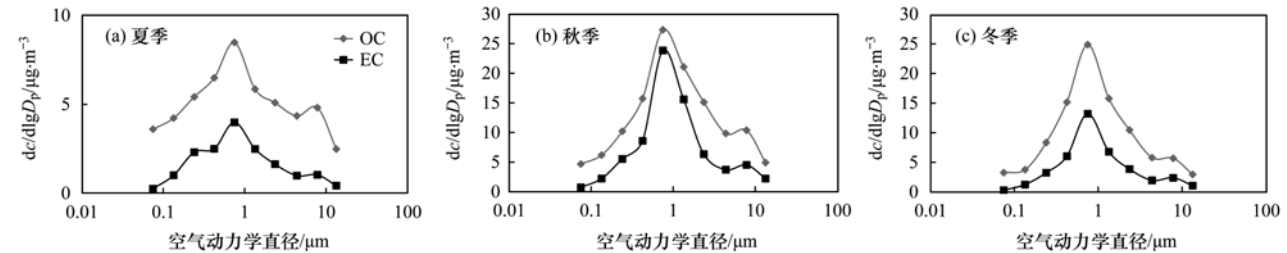


图 1 不同季节碳组分整体分布特征

Fig. 1 Size distributions of OC and EC for different seasons

半挥发性有机物在较细粒径段的富集. 与 OC1 和 OC2 相比, OC3 + OC4 在粗模态的分布较为明显, 尤其是夏季和清洁条件下, OC3 + OC4 在粗模态的浓度甚至会高于积聚模态. 从表 1 中发现, 粗粒子中 OC3 + OC4 浓度在不同季节的差异小于细粒子, 也表明有机碳的一次来源在粗模态中相对比较稳定.

Soot-EC 由于浓度较低, 没有明显的粒径分布特征, 多数情况下在 $0.10 \sim 0.18 \mu\text{m}$ 粒径段浓度较高, 表明高温燃烧排放的 EC 主要分布在超细粒径段. Char-EC 浓度远高于 Soot-EC, 在 EC 中占绝大部分比重, 其分布形态和特征与图 1 中 EC 基本类似.

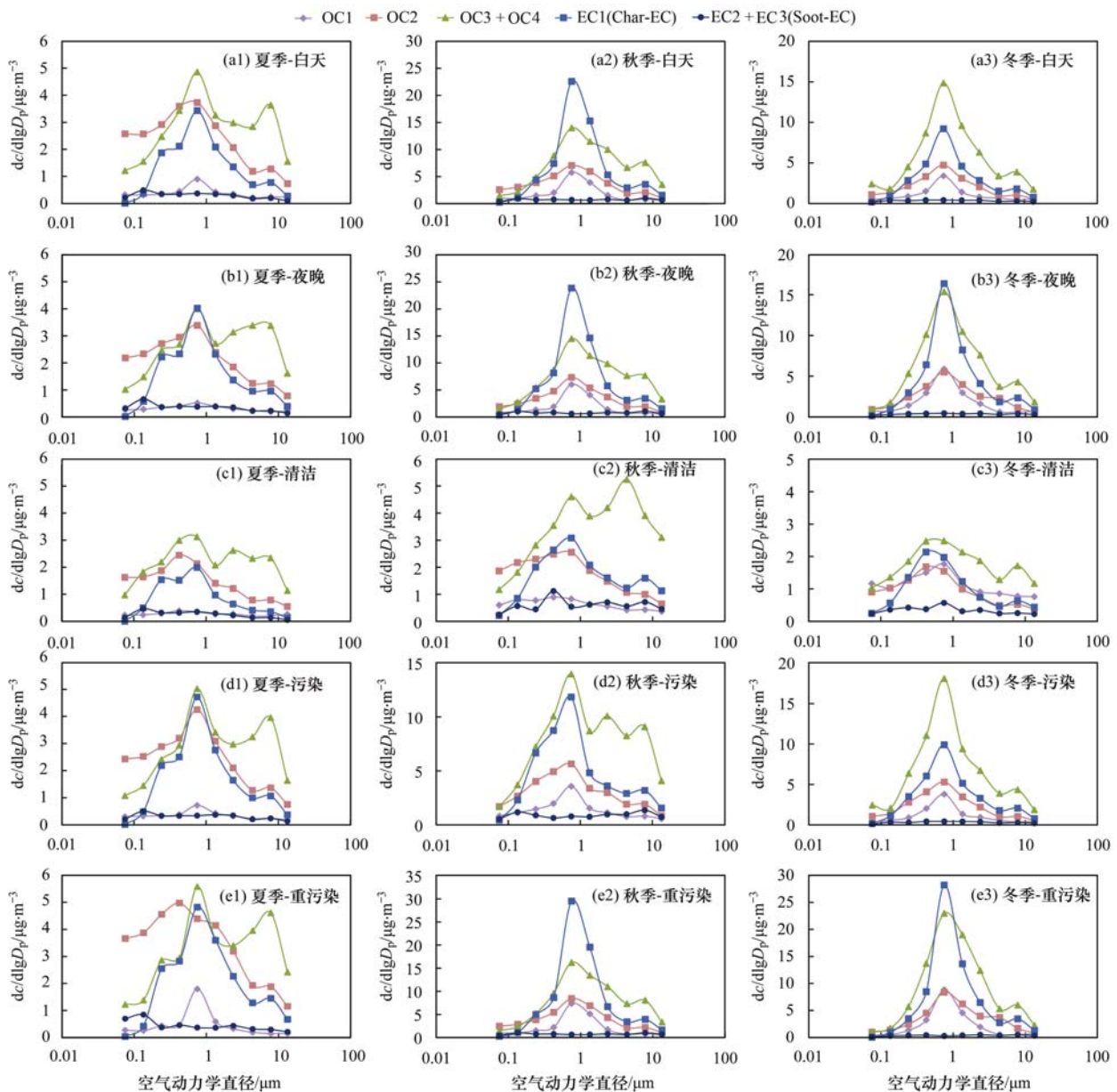


图 2 不同季节及污染状况下各不同碳组分粒径分布特征

Fig. 2 Size distributions of different carbonaceous components for different seasons and pollution levels

各主要碳组分在白天和夜晚的分布形态基本一致, 在各粒径段的浓度水平也基本一致. 只有冬季的 OC1 和 EC1(Char-EC) 在夜间的浓度水平明显高于白天, 在相关研究中, OC1 和 Char-EC 被放到一起进行特征分析, 表明了二者间在分布特征和来源方面的相似性^[29].

2.3 各碳组分之间及其与水溶性离子的关系

OC/EC 值是评估气溶胶中碳组分特征的重要

指标, 主要用来表征碳组分的来源以及其中 SOC 的占比^[2]. SOC 来源主要有两类, 一种是反应性气态有机气体被氧化后生成的有机颗粒物, 另一种是半挥发性有机物由于温度变化, 产生凝结或凝聚而形成的有机颗粒物, 通常高温和较强的氧化环境有利于第一种反应发生, 第二种 SOC 则大量产生于冬季^[2]. 由表 1 可知, 夏季和冬季 OC/EC 比值明显高于秋季, 在细粒子中此特征更为明显, 表明夏季

和冬季较有利于 SOC 的形成。

从图 3 中发现, OC/EC 值在不同粒径区间中差异很大, 在 $0.056 \sim 0.10 \mu\text{m}$ 粒径段, OC/EC 值明显高于其他粒径段, 主要是由于水溶性有机物 (WSOC) 主要分布在这一区间中, 使得 OC/EC 值升高^[6,23]。此外, 粗模态的 OC/EC 值相比积聚模态略高, 主要是由于 EC 在粗模态中分布较少, 浓度相对较低。3 个季节中白天的 OC/EC 比值在各粒径段大多高于夜晚, 此特征在夏季全粒径段以及其他季节的爱根模态较为明显, 说明白天光照高温对气态有机物氧化生成 SOC 有较大影响。

计算所有样品中主要碳组分以及 K^+ 和二次离

子($\text{SO}_4^{2-} + \text{NO}_3^- + \text{NH}_4^+$) 相互之间的皮尔逊相关系数(表 2), 发现 EC1 和 OC1, 以及 EC1 和 K^+ 的相关性最强。 K^+ 被认为主要源自生物质燃烧, 所以其与 EC1 的来源较为相似, 前面已经结合昼夜差异讨论了 EC1 和 OC1 分布和特征上的相似性, 这里重点分析 EC1 和 K^+ 的相关性。

图 4 为不同季节及污染状态下 EC1 与 OC1 和 K^+ 关系, 散点颜色代表该采样时段 $\text{PM}_{2.5}$ 的平均浓度。发现 EC1 与 OC1, 以及 EC1 与 K^+ 的相关性特征较为相似, 均为污染状况下相关性强于清洁状况, 表明污染条件下, 气溶胶化学组分相对较为稳定。此外, 夏季 EC1 与 OC1, 以及 EC1 与 K^+ 的相

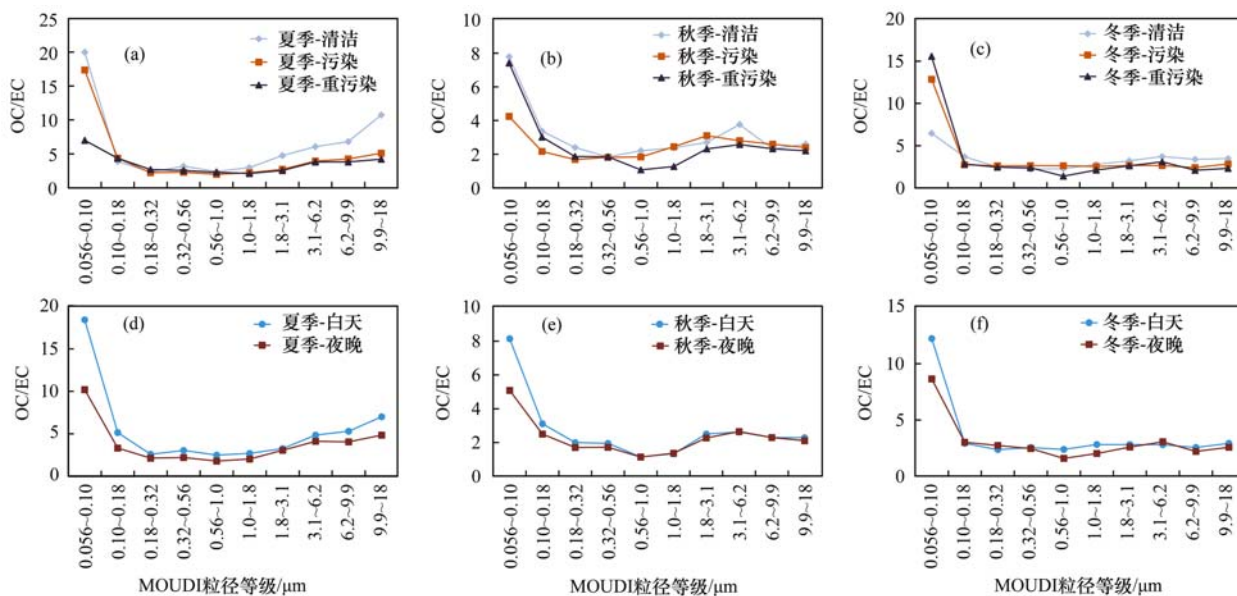
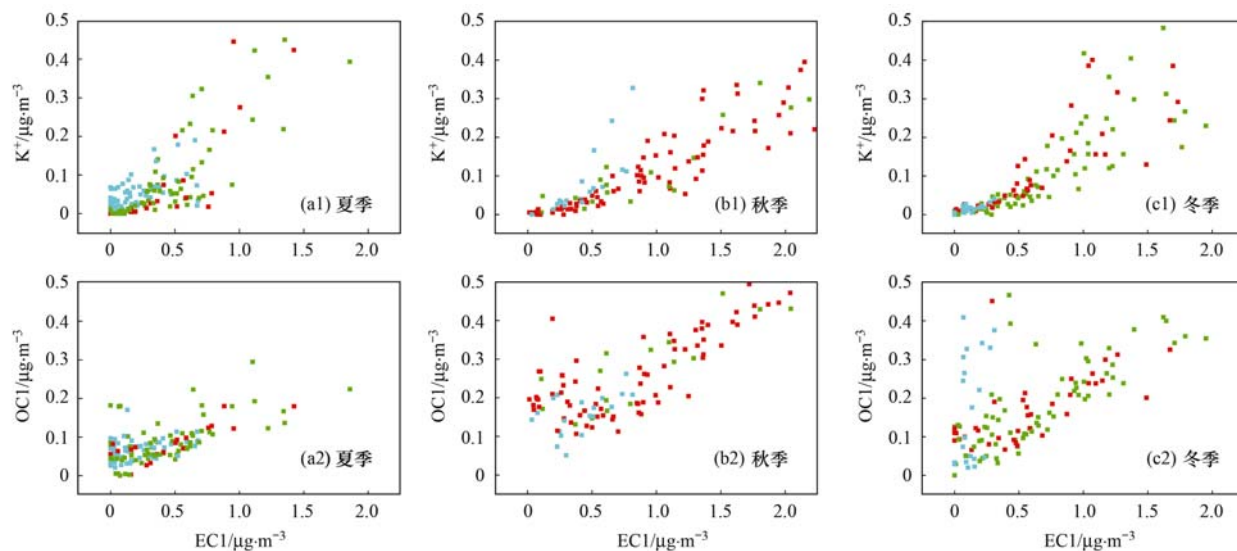


图 3 不同季节各粒径段 OC/EC 比值

Fig. 3 OC/EC values of different size ranges for different seasons



散点颜色代表采样时段 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度: 蓝色 $\text{PM}_{2.5} \leq 75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 绿色 $75 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3} < \text{PM}_{2.5} \leq 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$, 红色 $\text{PM}_{2.5} > 150 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$

图 4 不同季节 EC1 与 OC1 和 K^+ 关系

Fig. 4 Comparisons of EC1, OC1, and K^+ for different seasons

表 2 主要碳组分及其与水溶性离子的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficients between carbonaceous components and water-soluble ions

	OC1	OC2	OC3 + OC4	EC1	EC2 + EC3	K ⁺	二次离子
OC1	1						
OC2	0.794	1					
OC3 + OC4	0.773	0.788	1				
EC1	0.948	0.838	0.777	1			
EC2 + EC3	0.208	0.336	0.314	0.221	1		
K ⁺	0.859	0.829	0.824	0.909	0.174	1	
二次离子	0.716	0.758	0.675	0.795	0.153	0.908	1

1) 黑体字体为横列项与竖列项相关性较好, 即 OC1 与 EC1、EC1 与 K⁺ 相关性好

关系数较低, 主要是由于夏季光化学反应较为剧烈, 各种组分的来源和浓度水平有较大波动. 冬季 OC1 与 EC1 散点图中发现, 清洁条件下 OC1/EC1 比值明显高于污染状况, 根据冬季清洁条件碳组分分布可以发现[图 2(c3)], EC1 积聚模态的质量中值粒径(MMD)明显低于其他状况, 粗模态 EC1 与 OC1 浓度差异相对较大. 主要因为冬季清洁状况大多伴随北风, 采集到的气溶胶中沙尘等地壳来源较多, 受人为影响较小, EC 浓度非常低. 前期研究也表明, 华北地区在扬沙或浮尘状况下 OC/EC 值较高^[2].

3 结论

(1) 粗粒子中碳组分浓度远低于细粒子, 即碳组分主要富集在细粒子中, 秋冬季细粒子中碳组分的比重高于夏季. 碳组分主要分布在两个模态, 即积聚模态和粗模态, 在夏季和秋季还可以看出积聚模态中存在两个亚模态.

(2) OC1 和 OC2 主要分布在积聚模态, 且在夏季以及其他季节的清洁条件下, 有利于气粒转化生成的半挥发性有机物在较细粒径段的富集, 使得 OC1 和 OC2 在 0.056 ~ 0.56 μm 范围内有较高比例. OC3 + OC4 在粗模态的分布较为明显, 与其他碳组分相比, 在粗模态中相对比较稳定. Soot-EC 浓度较低, 没有明显的粒径分布特征, 在 0.10 ~ 0.18 μm 粒径段浓度较高, 表明高温燃烧排放的 EC 主要分布在超细粒径段. Char-EC 浓度远高于 Soot-EC, 在 EC 中占绝大部分比重. 各主要碳组分在白天和夜晚的分布形态基本一致, 在各粒径段的浓度水平也基本一致. 只有冬季的 OC1 和 EC1 (Char-EC) 在夜间的浓度水平明显高于白天.

(3) 夏季和冬季较有利于 SOC 的形成, 夏季和冬季 OC/EC 比值明显高于秋季, 在细粒子中此特征更为明显. OC/EC 值在不同粒径区间中差异很大, 由于水溶性有机物(WSOC)主要分布在 0.056 ~ 0.10 μm 粒径段, OC/EC 值明显高于其他粒径段. 夏季全粒径段以及其他季节的爱根

模态粒子在白天的 OC/EC 比值明显高于夜晚, 主要由于白天及高温有利于气态有机物氧化生成 SOC.

(4) 各碳组分之间, EC1 和 OC1 相关性最强, 此外 EC1 和 K⁺ 的相关性也很强, 均为污染状况下相关性强于清洁状况, 秋冬季相关性较强.

参考文献:

[1] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM_{2.5} in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.

[2] Zhao P S, Dong F, Yang Y D, *et al.* Characteristics of carbonaceous aerosol in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, **71**: 389-398.

[3] Pope C A, Dockery D W. Health effects of fine particulate air pollution: lines that connect[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2006, **56**(6): 709-742.

[4] Mauderly J L, Chow J C. Health effects of organic aerosols[J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(3): 257-288.

[5] DeBell L J, Gebhart K A, Hand J L, *et al.* Spatial and seasonal patterns and temporal variability of haze and its constituents in the United States-Report IV[R]. Fort Collins: Cooperative Institute for Research in the Atmosphere, Colorado State University, 2006.

[6] Liu H J, Zhao C S, Nekat B, *et al.* Aerosol hygroscopicity derived from size-segregated chemical composition and its parameterization in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2014, **14**(5): 2525-2539.

[7] 陈一娜, 赵普生, 何迪, 等. 北京地区大气消光特征及参数化研究[J]. *环境科学*, 2015, **36**(10): 3582-3589.

Chen Y N, Zhao P S, He D, *et al.* Characteristics and parameterization for atmospheric extinction coefficient in Beijing[J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(10): 3582-3589.

[8] John W. Size distribution characteristics of aerosols[A]. In: Kulkarni P, Baron P A, Willeke K (Eds.). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 41-54.

[9] Ramachandran G, Cooper D W. Size distribution data analysis and presentation[A]. In: Kulkarni P, Baron P A, Willeke K (Eds.). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications*[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 479-506.

[10] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change*[M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2016. 325-361.

- [11] Wu Z J, Hu M, Lin P, *et al.* Particle number size distribution in the urban atmosphere of Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(34): 7967-7980.
- [12] Wexler A S, Johnston M V. Real-time particle analysis by mass spectrometry [A]. In: Kulkarni P, Baron P A, Willeke K (Eds.). *Aerosol Measurement: Principles, Techniques, and Applications* [M]. 3rd ed. Hoboken: John Wiley & Sons, Inc., 2011. 233-254.
- [13] Zhao P S, Chen Y N, Su J. Size-resolved carbonaceous components and water-soluble ions measurements of ambient aerosol in Beijing [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2017, **54**: 298-313.
- [14] Zhao P S, Zhang X L, Xu X F, *et al.* Long-term visibility trends and characteristics in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Research*, 2011, **101**(3): 711-718.
- [15] 赵普生, 张小玲, 徐晓峰. 利用日均及 14 时气象数据进行霾日判定的比较分析 [J]. *环境科学学报*, 2011, **31**(4): 704-708.
- Zhao P S, Zhang X L, Xu X F. Comparison between two methods of distinguishing haze days with daily mean and 14 o'clock meteorological data [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, **31**(4): 704-708.
- [16] 赵普生, 徐晓峰, 孟伟, 等. 京津冀区域霾天气特征 [J]. *中国环境科学*, 2012, **32**(1): 31-36.
- Zhao P S, Xu X F, Meng W, *et al.* Characteristics of hazy days in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei [J]. *China Environmental Science*, 2012, **32**(1): 31-36.
- [17] Su J, Zhao P S, Dong Q. Chemical compositions and liquid water content of size-resolved aerosol in Beijing [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2018, **18**(3): 680-692.
- [18] 苏捷, 赵普生, 陈一娜. 北京地区不同天气条件下气溶胶数浓度粒径分布特征研究 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1208-1218.
- Su J, Zhao P S, Chen Y N. Characteristics of number concentration size distributions of aerosols under different weather processes in Beijing [J]. *Environment Science*, 2016, **37**(4): 1208-1218.
- [19] Yao X H, Lau A P S, Fang M, *et al.* Size distributions and formation of ionic species in atmospheric particulate pollutants in Beijing, China: 1-inorganic ions [J]. *Atmospheric Environment*, 2003, **37**(21): 2991-3000.
- [20] 胡敏, 赵云良, 何凌燕, 等. 北京冬、夏季颗粒物及其离子成分质量浓度谱分布 [J]. *环境科学*, 2005, **26**(4): 1-6.
- Hu M, Zhao Y L, He L Y, *et al.* Mass Size distribution of Beijing particulate matters and its inorganic water-soluble ions in winter and summer [J]. *Environmental Science*, 2005, **26**(4): 1-6.
- [21] Guo S, Hu M, Wang Z B, *et al.* Size-resolved aerosol water-soluble ionic compositions in the summer of Beijing: implication of regional secondary formation [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2010, **10**(3): 947-959.
- [22] Wang X F, Wang T, Pathak R K, *et al.* Size distributions of aerosol sulfates and nitrates in Beijing during the 2008 Olympic Games: Impacts of pollution control measures and regional transport [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2013, **30**(2): 341-353.
- [23] 杜翔, 赵普生, 苏捷, 等. 北京地区气溶胶水溶性组分粒径分布特征 [J]. *环境科学*, 2018, **39**(11): 4858-4865.
- Du X, Zhao P S, Su J, *et al.* Size distributions of water-soluble components in ambient aerosol of Beijing [J]. *Environment Science*, 2018, **39**(11): 4858-4865.
- [24] Chow J C, Watson J G, Pritchett L C, *et al.* The DRI thermal/optical reflectance carbon analysis system: description, evaluation and applications in U. S. air quality studies [J]. *Atmospheric Environment*, 1993, **27**(8): 1185-1201.
- [25] Chow J C, Watson J G, Crow D, *et al.* Comparison of IMPROVE and NIOSH carbon measurements [J]. *Aerosol Science and Technology*, 2001, **34**(1): 23-34.
- [26] Chow J C, Watson J G, Chen L W A, *et al.* The IMPROVE_A temperature protocol for thermal/optical carbon analysis: maintaining consistency with a long-term database [J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2007, **57**(9): 1014-1023.
- [27] Zhu C S, Chen C C, Cao J J, *et al.* Characterization of carbon fractions for atmospheric fine particles and nanoparticles in a highway tunnel [J]. *Atmospheric Environment*, 2010, **44**(23): 2668-2673.
- [28] Han Y M, Lee S C, Cao J J, *et al.* Spatial distribution and seasonal variation of Char-EC and Soot-EC in the atmosphere over China [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(38): 6066-6073.
- [29] Lim S, Lee M, Lee G, *et al.* Ionic and carbonaceous compositions of PM₁₀, PM_{2.5} and PM_{1.0} at Gosan ABC Superstation and their ratios as source signature [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2012, **12**(4): 2007-2024.
- [30] Lu T, Huang Z, Cheung C S, *et al.* Size distribution of EC, OC and particle-phase PAHs emissions from a diesel engine fueled with three fuels [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **438**: 33-41.

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 Jin-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)