

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法

杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺



■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年5月

第42卷 第5期
Vol.42 No.5

目次

北京冬季 PM _{2.5} 中有机气溶胶的化学特征和来源解析	徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏 (2101)
北京地区 2019 年 2~3 月供暖结束后两次污染过程特征分析	尹晓梅, 蒲维维, 王继康, 刘湘雪, 乔林 (2110)
北京 2019 年冬季一次典型霾污染特征与成因分析	廉涵阳, 杨欣, 张普, 陈义珍, 杨小阳, 赵好希, 何友江, 赵丹婷 (2121)
青岛沿海地区夏季和冬季新粒子生成特征对比	孙悦, 朱玉姣, 孟赫, 刘兵, 刘玉虹, 董灿, 姚小红, 王文兴, 薛丽坤 (2133)
太原市城乡居民采暖季室内灰尘中重金属的污染特征及其生态风险评价	黄浩, 徐子琪, 严俊霞, 赵秀阁, 王丹璐 (2143)
西安市新装修公共场所空气污染物浓度分析及健康风险评价	范洁, 樊灏, 沈振兴, 党文鹏, 郑伟, 王志华, 付毅 (2153)
超低排放典型燃烧源颗粒物及水溶性离子排放水平与特征	胡月琪, 王铮, 郭建辉, 冯亚君, 丁萌萌, 颜旭 (2159)
合肥市夏季大气颗粒物中微生物群落的高通量测序分析	姜少毅, 孙博文, 代海涛, 王润芳, 马大卫, 朱仁斌 (2169)
郑州市细颗粒物时空差异及管控措施影响	董喆, 袁明浩, 苏方成, 张剑飞, 孙佳葆, 张瑞芹 (2179)
2016~2019 年江西省臭氧污染特征与气象因子影响分析	钱悦, 许彬, 夏玲君, 陈燕玲, 邓力琛, 王欢, 张根 (2190)
天山北坡城市群气溶胶光学特性时空分布特征	张喆, 王建丽, 王瑾杰, 陈香月, 刘兴涛, 阿提干·吾斯曼 (2202)
基于高分影像的城市水体遥感综合分级方法	杨子谦, 刘怀庆, 吕恒, 李云梅, 朱利, 周亚明, 李玲玲, 毕顺 (2213)
太湖水体 Chl-a 预测模型 ARIMA 的构建及应用优化	李娜, 李勇, 冯家成, 单雅洁, 钱佳宁 (2223)
松花湖水空间差异及富营养化空间自相关分析	丁洋, 赵进勇, 张晶, 付意成, 彭文启, 陈渠昌, 李艳艳 (2232)
会仙岩溶湿地丰平枯水期地表水污染及灌溉适用性评价	朱丹尼, 邹胜章, 李军, 樊连杰, 赵一, 谢浩, 朱天龙, 潘民强, 徐利 (2240)
京杭大运河中下游段天然水化学变化特征及驱动因素	程中华, 邓义祥, 卓小可, 代丹, 于涛 (2251)
次降雨过程中不同土地利用配置对径流中氮流失的影响	罗义峰, 陈方鑫, 周豪, 龙翼, 严冬春, 谭文浩, 李丹丹, 陈晓燕 (2260)
碳氮同位素解析典型岩溶流域地下水中硝酸盐来源与归趋	任坤, 潘晓东, 梁嘉鹏, 彭聪, 曾洁 (2268)
冰封状态下里湖冰-水中浮游细菌群落结构差异	李文宝, 杨旭, 田雅楠, 杜蕾 (2276)
城市再生水河道沉积物细菌群落空间变化分析: 以京津冀北运河为例	邱莹, 靳燕, 苏振华, 邱琰茗, 赵栋梁, 郭道宇 (2287)
太湖春夏两季反硝化与厌氧氨氧化速率的空间差异及其影响因素	赵锋, 许海, 詹旭, 朱广伟, 郭宇龙, 康丽娟, 朱梦圆 (2296)
三峡库区典型支流水库浮游动植物群落结构特征及其与环境因子的关系	陈莎, 谢青, 付梅, 江韬, 王永敏, 王定勇 (2303)
铁硫改性生物炭去除水中的磷	桑倩倩, 王芳君, 赵元添, 周强, 蔡雨麒, 邓颖, 田文清, 陈永志, 马娟 (2313)
钢渣对水体中磷的去除性能及机制解析	罗晓, 张峻搏, 何磊, 杨雪晶, 吕鹏翼 (2324)
BS-18 两性修饰膨润土对四环素和诺氟沙星复合污染的吸附	王新欣, 孟昭福, 刘欣, 王腾, 胡啸龙, 孙秀贤 (2334)
Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ 复合光催化剂的制备及其可见光催化性能	高闯闯, 刘海成, 孟无霜, 郝双玲, 薛婷婷, 陈国栋, Joseph Acquah (2343)
可见光驱动下罗丹明 B 自活化过硫酸盐降解双酚 A	张怡晨, 白雪, 石娟, 金鹏康 (2353)
铁钛共掺杂氧化铝诱导表面双反应中心催化臭氧氧化去除水中污染物	张帆, 宋阳, 胡春, 吕来 (2360)
硫化铁铜双金属复合材料的制备及除铬机制	屈敏, 王源, 陈辉霞, 王兴润, 徐红彬 (2370)
电催化-生物电化学耦合系统处理青霉素废水的机制	曲有鹏, 吕江维, 董跃, 冯玉杰, 张杰 (2378)
缺氧/好氧交替连续流的生活污水好氧颗粒污泥运行及污染物去除机制	李冬, 杨敬畏, 李悦, 李帅, 张诗睿, 王文强, 张杰 (2385)
反硝化除磷污泥聚集体内原位除磷活性及有机物浓度的影响	吕永涛, 姜晓童, 徒彦, 王旭东, 潘永宝, 刘爽, 崔双科, 王磊 (2396)
基于臭氧旁路处理的污泥原位减量技术工艺	薛冰, 刘宾寒, 韦婷婷, 王先恺, 陈思思, 董滨 (2402)
活性炭对城市有机固废厌氧消化过程抗生素抗性基因行为特征的影响	马佳莹, 王盼亮, 汪冰寒, 苏应龙, 谢冰 (2413)
6 种农业废弃物初期碳源及溶解性有机物释放机制	凌宇, 闫国凯, 王海燕, 董伟羊, 王欢, 常洋, 李丛宇 (2422)
中国典型农田土壤有机碳密度的空间分异及影响因素	李成, 王让会, 李兆哲, 徐扬 (2432)
不同水分条件和微生物生物量水平下水稻土有机碳矿化及其影响因子特征	刘琪, 李宇虹, 李哲, 魏晓梦, 祝贞科, 吴金水, 葛体达 (2440)
青藏高原林地土壤的氮转化特征及其影响因素分析: 以祁连山和藏东南地区为例	何芳, 张丽梅, 申聪聪, 陈金全, 刘四义 (2449)
基于物元可拓模型的兰州市主城区公园表土重金属污染评价	胡梦琨, 李春艳, 李娜娜, 吉天琪, 郑登友 (2457)
长期施用化肥和有机肥对稻田土壤重金属及其有效性的影响	夏文建, 张丽芳, 刘增兵, 张文学, 蓝贤瑾, 刘秀梅, 刘佳, 刘光荣, 李祖章, 王萍 (2469)
川南山区土壤与农作物重金属特征及成因	韩伟, 王成文, 彭敏, 王乔林, 杨帆, 徐仁廷 (2480)
宁东能源化工基地核心区表层土壤中多环芳烃的空间分布特征、源解析及风险评价	杨帆, 罗红雪, 钟艳霞, 王幼奇, 白一茹 (2490)
重金属钝化剂阻控生菜 Cd 吸收的功能稳定性和适用性	庞发虎, 吴雪姣, 孔雪菲, 曾宪, 王晓宇, 陈兆进, 姚伦广, 韩辉 (2502)
典型污染稻田水分管理对水稻镉累积的影响	张雨婷, 田应兵, 黄道友, 张泉, 许超, 朱捍华, 朱奇宏 (2512)
油茶果壳改性生物炭吸附性能及其耦合淹水对土壤 Cd 形态影响	蔡彤, 杜辉辉, 刘孝利, 铁柏清, 杨宇 (2522)
土地利用变化对松花江下游湿地土壤真菌群落结构及功能的影响	徐飞, 张拓, 怀宝东, 隋文志, 杨雪 (2531)
渔业复垦塌陷地抗生素抗性基因与微生物群落	程森, 路平, 冯启言 (2541)
3 种常用除草剂对细菌抗生素耐药性的影响	李曦, 廖汉鹏, 崔鹏, 白玉丹, 刘晨, 文畅, 周顺桂 (2550)
污水再生利用微生物控制标准及其制定方法探讨	陈卓, 崔琦, 曹可凡, 陆韻, 巫寅虎, 胡洪营 (2558)
《环境科学》征订启事 (2439) 《环境科学》征稿简则 (2479) 信息 (2152, 2231, 2286)	

北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中有机气溶胶的化学特征和来源解析

徐楠, 王甜甜, 李晓, 唐荣志, 郭松, 胡敏*

(北京大学环境科学与工程学院, 环境模拟与污染控制国家重点联合实验室, 教育部区域污染控制国际合作联合实验室, 北京 100871)

摘要: 为探讨北京冬季大气细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 中有机气溶胶的浓度水平、分布特征和来源变化, 对 2016 年 11 月 10 日~12 月 10 日采集的北京大气 $\text{PM}_{2.5}$ 样品进行气相色谱-质谱测定, 定量了 129 种颗粒有机物 (POM), 约占有机物总量的 $(9.3 \pm 1.2)\%$ 。其中含量最高的是糖类, 仅左旋葡聚糖即可占到定量有机物的 18%, 其次是正构烷酸、正构烷烃、二元羧酸和多环芳烃。根据 POM 示踪物的变化特征, 分析了供暖和生物质燃烧传输对北京冬季有机气溶胶的影响。相比于非供暖期间, 供暖期间化石燃料示踪物藿烷的质量浓度及在有机物中的占比都明显升高, 各组分间的分布也更加趋向于燃煤排放的特征。正构烷烃主峰碳数和奇偶分布的变化, 反映了化石燃料贡献增强的影响。生物质燃烧示踪物左旋葡聚糖的浓度权重轨迹 (CWT) 模型结果表明, 北京周围区域的秸秆燃烧污染会通过传输影响北京的有机气溶胶组成。利用分子示踪-化学质量平衡 (MM-CMB) 模型对 2016 年北京冬季有机碳 (OC) 进行了来源解析, 并与 2006 年的结果进行比较, 以定量 10 年间各污染源贡献发生的变化。2016 年与 2006 年相比, 机动车对有机气溶胶贡献明显增加, 燃煤和木材燃烧的贡献则大幅度降低, 餐饮排放的贡献也不容忽视。因此, 控制机动车和餐饮源的排放对改善北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染问题至关重要。

关键词: 大气细颗粒物; 有机气溶胶; 北京; 冬季; 来源解析

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)05-2101-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.202009241

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Winter in Beijing

XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, TANG Rong-zhi, GUO Song, HU Min*

(State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, International Joint Laboratory for Regional Pollution Control, Ministry of Education, College of Environmental Sciences and Engineering, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: To explore the concentrations, characteristics, and sources of organic aerosols in winter in Beijing, atmospheric fine particulate matter ($\text{PM}_{2.5}$) samples were collected from November 10, 2016 to December 10, 2016. One hundred and twenty-nine particulate organic matters (POM) were quantified by gas chromatography-mass spectrometry, accounting for approximately $9.3\% \pm 1.2\%$ of the total concentration of organic matter. The most abundant class was sugar, among which levoglucosan alone accounted for 18% of the quantified organic matter mass. The next most abundant classes were alkanic acids, normal alkanes, dicarboxylic acids, and polycyclic aromatic hydrocarbons. The influence of winter heating and biomass burning emissions on organic aerosols in winter in Beijing was analyzed by the characteristics of the molecular markers in the POM. Compared with those during the non-heating period, the concentrations and proportions of hopane species, which are tracers for fossil fuels, increased in the organic matters during the heating period. Moreover, the influence of coal burning emissions on the distribution of hopane species was enhanced. The species with the maximum concentration and carbon predominance index in *n*-alkanes also reflected the influence of enhanced fossil fuel emissions. The results of the concentration-weighted trajectory model for levoglucosan, a tracer for biomass combustion, suggested that straw burning pollution in the surrounding areas of Beijing would affect the composition of organic aerosols in Beijing via air mass transport. A molecular marker-based chemical mass balance model was used to apportion the sources of organic carbon in the winter of 2016 in Beijing, and the results were compared with those of research in 2006 to quantify the changes in the source contributions over 10 years. The contribution of motor vehicles increased significantly in 2016 compared with that in 2006, whereas the contribution of coal burning and wood burning decreased to a large extent. The contribution of cooking emissions could not be ignored. Therefore, the control of motor vehicle and cooking emissions is of great importance to reduce the problem of $\text{PM}_{2.5}$ pollution in winter in Beijing.

Key words: fine particulate matter; organic aerosols; Beijing; winter; source apportionment

有机气溶胶是细颗粒物 ($\text{PM}_{2.5}$) 的重要组成部分。有研究表明在中纬度大陆地区, 有机组分可以占到 $\text{PM}_{2.5}$ 总质量的 20%~50%^[1,2]。但颗粒有机物 (POM) 组成复杂, 且在大气中的浓度低, 物理化学性质差别大, 因此目前所能精确定量的物种仅占有机物总质量的 10%~40%^[3]。POM 中含有许多对人体有害的物质, 如多环芳烃和亚硝胺类化合物等^[4-6]。有机气溶胶也可以通过影响云凝结核

(CCN) 的形成, 通过改变云的性质产生间接的气候影响^[7]。近年来的研究表明, 有机气溶胶中的吸

收稿日期: 2020-09-24; 修订日期: 2020-11-10

基金项目: 国家重点研发计划项目 (2016YFC0202000); 国家自然科学基金项目 (91844301, 91544214); 大气重污染成因与治理攻关项目 (DQGG0103)

作者简介: 徐楠 (1995~), 女, 博士研究生, 主要研究方向为气溶胶物理化学特性及其环境效应, E-mail: nanxu@pku.edu.cn

* 通信作者, E-mail: minhu@pku.edu.cn

光组分棕色碳 (BrC) 能影响消光和能见度,也是气候模型中估算辐射强迫不确定性的重要来源^[8]。

各种污染源排放的 POM 不同,特别是一些标志性物种,在不同来源中差别很大,因此 POM 具有重要的源指示作用,对这些示踪物进行分析,可以判断出颗粒物的来源特征。多环芳烃 (PAHs) 主要由化石燃料、生物质等的不完全燃烧产生^[9]。二元羧酸主要来自二次转化,但是燃煤源和餐饮源也会排放少量的二元羧酸^[10]。糖类,特别是左旋葡聚糖,主要来源于生物质燃烧,是生物质燃烧的标志性物种^[11,12]。藿烷类物质均来自化石燃料燃烧,其分布具有机动车、煤炭燃烧来源的指纹特征^[13]。正构烷烃同系物之间的碳数分布也可以用于推测其来源^[14,15]。He 等^[16]在 2005 年首次详细报道了北京 PM_{2.5} 中的颗粒有机物种,并依据示踪物特征分析了不同季节中来源的差异。

POM 按照来源可分为一次源和二次源,一次源指直接排放到大气中的颗粒有机物,既有人为源贡献,如生物质燃烧和化石燃料燃烧等;也有天然源贡献,如植物碎屑和海洋生物等。分子示踪-化学质量平衡 (MM-CMB) 被广泛地应用于有机气溶胶的来源解析,不少研究者曾在北京,特别是北京大学城市大气环境定位观测站展开过相关研究。Zheng 等^[17]首次应用该模型对 2000 年北京的有机气溶胶进行了源解析,探究了不同季节的来源的差异。于娜等^[18]对北京城区和郊区不同站点四季的来源进行了分析。Wang 等^[19]利用中国本地的源谱对北京 2005~2006 年冬季和夏季的有机气溶胶进行了来源解析。此外,Guo 等^[20]和 Tang 等^[21]也分别用该方法探讨了 2008 年和 2016 年北京夏季有机气溶胶的来源。

北京冬季污染程度较为突出,其中有机物的贡献不可忽略。为探讨北京冬季大气 PM_{2.5} 中有机气溶胶的浓度水平、分布特征、来源以及近年来污染源贡献的变化,本研究基于北京大学城市大气环境定位观测站,利用气相色谱-质谱 (GC-MS) 定量了 2016 年北京冬季 PM_{2.5} 中的 129 种颗粒有机物。利用有机物种的源指示作用,分析了供暖和生物质燃烧传输对北京冬季有机气溶胶的影响。《大气污染防治行动计划》实施以来,北京市大气污染程度明显降低,各污染来源的贡献也发生了较大的改变。利用 MM-CMB 模型,对 2016 年北京冬季有机碳 (OC) 进行了来源解析,并与 2006 年 Wang 等^[19]的结果进行了比较,定量分析了 10 年间 OC 来源的变化。通过研究人为措施 (供暖、生物质燃烧) 对有机气溶胶产生的影响,以及《大气污染防治行动计

划》实施以来北京冬季有机气溶胶来源的变化,以期污染防治政策的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 样品采集

本研究于 2016 年 11 月 10 日至 2016 年 12 月 10 日,在北京大学城市大气环境定位观测站 (116.31°E, 39.99°N) 进行大气 PM_{2.5} 采样。采样器架设于北京大学理科一号楼楼顶平台,距地面约 20 m,周围无明显的局地源排放,为典型城市站点^[22]。两台大气悬浮颗粒物连续采样器 (RP-2025, Thermo) 分别采用 47 mm 聚四氟乙烯滤膜 (样品用于 PM_{2.5} 质量浓度分析) 和 47 mm 石英纤维滤膜 [样品用于总有机碳 (OC)、元素碳 (EC) 质量浓度分析], 采样流量为 16.7 L·min⁻¹, 采样时段为 08:00 到次日 07:59。另外,一台武汉天虹 TH-1000C II 型智能大流量空气颗粒物采样器使用大石英纤维滤膜,主要用于 POM 的分析,采样流量为 1.05 m³·min⁻¹, 采样时段为 08:00 到次日 07:45。

1.2 样品分析

PM_{2.5} 质量浓度及 OC、EC 的测定方法和质量控制按照文献^[23,24]进行。此外,使用 GC-MS 系统 (6890/5973 型,美国安捷伦) 定量了 129 种颗粒有机物种。首先对样品进行前处理,在样品中预先加入同位素化合物作为内标,用有机溶剂二氯甲烷/甲醇 (体积比, 3:1) 在室温下对石英纤维滤膜采集的样品进行 3 次超声提取,每次 20 min。过滤后的提取液首先通过旋转蒸发初步浓缩至一定体积,再采用超纯氮气流将溶液进一步浓缩至约 1 mL。由于气相色谱采用的色谱柱是弱极性柱 DB5-MS,因此需要将提取溶液分为两份,其中一份直接进样,用于测定非极性和弱极性物质。另一份使用衍生化试剂 BSTFA/TMCS (体积比, 99:1, SUPELCO), 将极性化合物转化为三甲基硅烷化衍生物后再进样,用于测定极性物质。利用保留时间和质谱图定性,用内标标准曲线法定量。具体的定量方法和质量控制参照文献^[12,25]进行。

2 结果与讨论

2.1 颗粒有机物化学组成

POM 组成复杂、性质多变,现有技术所能检测出的单一化合物的总质量仅占有机气溶胶总量的少数部分。本研究共用 GC-MS 定量了 129 种有机物,包括的 67 种非极性或弱极性物质和 59 种极性物质。观测期间个别样品由于采样或测定仪器原因未进行测定。定量的物质按照类别可分为糖类 3 种、

正构烷酸 12 种、正构烷烃 27 种、二元羧酸 10 种、多环芳烃 29 种、芳香酸 4 种、不饱和脂肪酸 3 种、固醇 7 种、单甘油酯 3 种、甲氧基酚 10 种、松香酸（萜类）2 种、正构烷醇 3 种、藿烷 3 种、甾烷 4 种、环烷烃 1 种和支链烷烃 2 种，其它类别 3 种。观测期间 OC 的平均质量浓度为 $(24.2 \pm 14.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，定量出的极性有机物的平均质量为 $(2.6 \pm 1.5) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，非极性为 $(0.8 \pm 0.6) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，总量为 $(3.4 \pm 2.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，可以占到总有机物（OM， $1.6 \times \text{OC}$ ）的 $(9.3 \pm 1.2)\%$ 。表 1 按照类别列出了定量有机物的平均质量浓度，图 1 为定量有机物主要类别的占比，以及含碳物质[包括元素碳（EC）和 OM]与 PM_{2.5} 之间的关系。图 2 为各类有机物的质量浓度时间序列，定量的有机物与 OM 的质量浓度变化表现出非常一致的趋势。

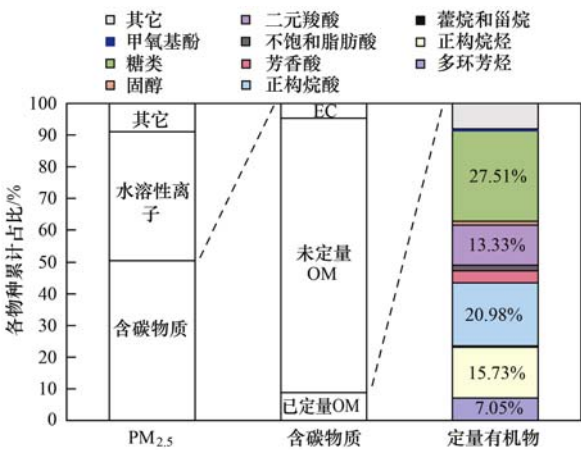


图 1 定量有机物主要类别的占比
Fig. 1 Proportion of major classes of quantified organic matter

定量有机物中含量最多的是糖类，平均质量浓度为 $0.97 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，占到定量有机物的 $(27.5 \pm 7.4)\%$ 。其次是正构烷酸，占 $(21.0 \pm 4.5)\%$ ，接

下来依次是正构烷烃、二元羧酸和多环芳烃，分别占 15.7%、13.3% 和 7.0%。4 类物种总量占到总定量有机物的 85% 左右。就单个物质看来，质量浓度最高的是左旋葡聚糖，为 $(597.8 \pm 384.1) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ，可占总定量有机物的 17.6%。其次是十六烷酸，质量浓度是 $(314.8 \pm 168.2) \text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$ ，接下来分别是甘露聚糖、甘油和十八烷酸。

表 1 观测期间不同类别定量有机物的平均质量浓度		
Table 1 Average concentrations of different classes of quantified organic matter during observations		
类别	物种个数	质量浓度/ $\text{ng} \cdot \text{m}^{-3}$
糖类	3	970.0 ± 632.6
正构烷酸	12	676.4 ± 354.3
正构烷烃	27	544.2 ± 365.7
二元羧酸	10	424.6 ± 242.0
多环芳烃	29	241.7 ± 166.0
芳香酸	4	131.8 ± 91.3
不饱和脂肪酸	3	58.9 ± 54.9
固醇	7	40.7 ± 30.9
单甘油酯	3	21.7 ± 12.5
甲氧基酚	10	21.2 ± 12.0
松香酸	2	17.0 ± 12.0
正构烷醇	3	18.7 ± 12.1
环烷烃	1	16.2 ± 14.5
藿烷	3	11.8 ± 9.0
支链烷烃	2	9.4 ± 7.4
甾烷	4	2.2 ± 2.2
其它	3	189.5 ± 158.2
总量	129	$3\,396.9 \pm 2\,003.6$

2.2 供暖对有机气溶胶的影响

为分析供暖对北京有机气溶胶的影响，将观测分为供暖时期和非供暖时期。2016 年京津冀地区集中供暖从 11 月 15 日开始逐步实行。11 月 21 日由于强冷空气的影响，风速较高，PM_{2.5}降低至观测期间最低值，仅为 $9.8 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ，污染物在该日得到了

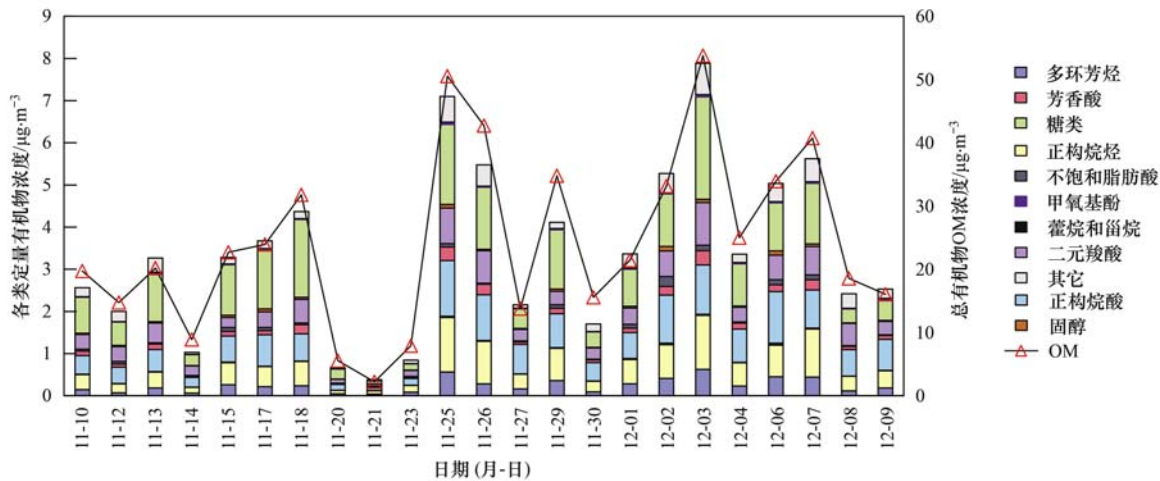


图 2 各类有机物的质量浓度时间序列
Fig. 2 Temporal variations in major classes of quantified organic matter

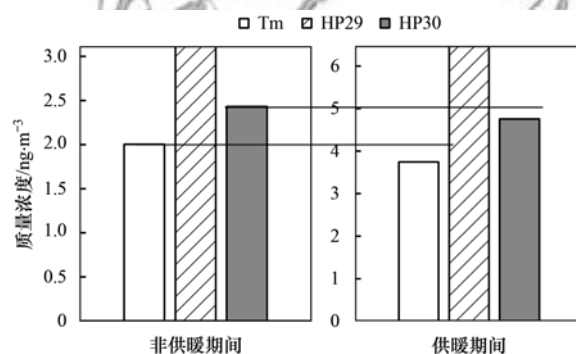
较大程度地清除. 为避免两个时期之间的影响, 以 11 月 21 日作为划分. 11 月 10 ~ 20 日受到供暖的影响较小, 为非供暖时期, 11 月 23 日至 12 月 10 日为供暖时期.

POM 中含有很多源示踪物, 它们浓度的变化可以反映出源排放贡献的差异. 其中, 藿烷类物种浓度和正构烷烃分布特征可以用于判断观测期间化石燃料燃烧来源的贡献变化. 藿烷类物质非常稳定, 均来自化石燃料燃烧, 尤其是机动车燃油和燃煤. 尽管环境大气中藿烷类物质含量比较低, 但是不少研究都表明其分布具有化石燃料污染源的指纹特征^[26,27]. 本研究一共检测了 3 种藿烷类物质: 17A(H)-22,29,30-三降藿烷 (Tm)、17B(H)-21A(H)-30-降藿烷 (HP29) 和 17A(H)-21B(H)-藿烷 (HP30). 图 3 是汽油车、柴油车和燃煤排放源谱中 3 种藿烷的相对强度对比^[19]. 燃煤排放的 3 种藿烷中, HP29 的质量浓度明显较高. 而 HP30 则是机动车尾气排放的浓度最高的物种, 因此可以通过两者的比值来判断机动车和燃煤贡献的相对大小. 供暖和非供暖期间藿烷物种质量浓度的比较如图 4 所示, 供暖期间 3 种藿烷的质量浓度约是非供暖期间的两倍, HP29 在 3 种藿烷中的占比也明显提高. 此外, 3 种藿烷 (Tm、HP29 和 HP30) 在总有机物 OM 中的质量浓度占比, 分别从非供暖期间的 0.06‰、0.09‰ 和 0.07‰, 上升至供暖期间的 0.07‰、0.13‰ 和 0.09‰, 其中上升幅度最大的是 HP29. 表明供暖期间中化石燃料、特别是燃煤的贡献, 较非供暖期间明显有所提高.

不同来源的正烷烃其碳数范围、主峰碳数和奇偶优势不同, 从正烷烃同系物之间的分布可以推测出它们可能的来源. 主峰碳数 (C_{max}) 是指正构烷烃各浓度中含量最高的碳数. 正构烷烃主峰碳数一般作为有机物来源成熟度的标志, 成熟度较高的来源如化石燃料具有较低的主峰碳数. 有研究表明煤和石油等化石燃料燃烧产生的正烷烃分布主要在 C27 以下, 最大碳数浓度在 C22 ~ C25, 无明显的奇

碳优势^[14,28,29]. 而生物源颗粒物, 包括生物质燃烧、植物碎屑, 排放的正构烷烃 C_{max} 一般在 C29、C31 或 C33 附近^[12,15,30]. 两个时段的平均正构烷烃碳数分布对比如图 5 所示. 供暖期间与非供暖期间相比, C22 ~ C25 的正构烷烃质量浓度大幅度上升, 而较高碳数的正构烷烃浓度变化则较小, 这是由于化石燃料贡献增加. 考虑到机动车排放放在两个时期应该相对较为稳定, 主要的差异来自于燃煤贡献的增加.

CPI 被定义为正构烷烃中奇数碳烷烃和偶数碳烷烃的总和之比^[31]. 自然界许多生物存在着特定奇数碳正构烷烃超过偶数碳的特性, 经过漫长的地质沉积后, 奇偶碳数趋向一致, 即 CPI 趋近于 1. 自然源如高等植物、细菌等现代生物, 正构烷烃的 CPI 值一般大于 5; 化石来源如石油及其产品中, CPI 值一般小于 1.2. 混合源烷烃的 CPI 值则随着自然源和人为源的相对贡献大小, 而在二者之间变化^[32]. 以 C16 ~ C35 的正构烷烃计算 CPI, 非供暖期间的平均 CPI 为 1.6 ± 0.2 , 而供暖期间的 CPI 则下降到 1.3 ± 0.1 , 反映出化石燃料源贡献增加的影响.



两根横线说明与非供暖期间相比, 供暖期间 Tm 和 HP30 的增长幅度相对于 HP29 较小, 表明 HP29 相对其他两种藿烷更加突出, 反映出燃煤的贡献增强

图 4 非供暖期间和供暖期间的藿烷物种质量浓度比较

Fig. 4 Comparison of the hopane species concentrations between the heating period and the non-heating period

2.3 生物质燃烧污染传输对有机气溶胶的影响

左旋葡聚糖是生物质燃烧产生细粒子中含量最高的有机物, 并且可以在大气中长距离传输, 是典型的生物质燃烧的示踪物^[33-36]. 为研究周围省份的生物质燃烧对北京有机气溶胶的影响, 运用浓度权重轨迹 (CWT) 模型^[37,38], 以 HYSPLIT 模型^[39] (<http://ready.arl.noaa.gov/HYSPLIT.php>) 计算的反向轨迹的停留时间为权重, 将受体点左旋葡聚糖质量浓度分配至研究区域内的格点中, 对北京生物质燃烧来源有机物的输送通道及潜在源分布进行分析. CWT 的分布值越高表明经过此处的轨迹对受体点北京的左旋葡聚糖浓度有较大的贡献, 也意味

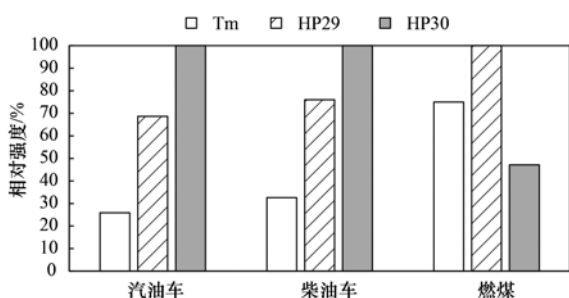


图 3 不同化石燃料排放来源中 3 种藿烷的相对强度比较^[19]

Fig. 3 Comparison of the relative intensities of the three hopanes emitted by the combustion of different fossil fuels

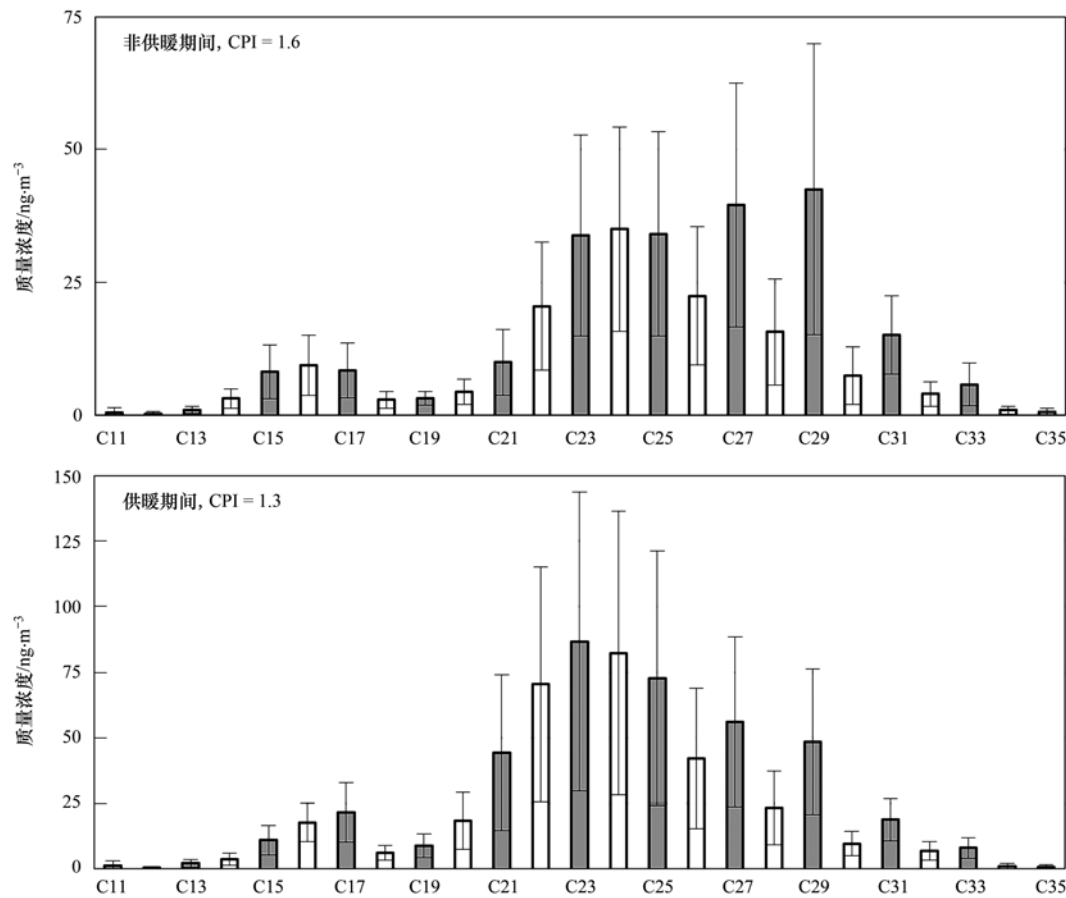
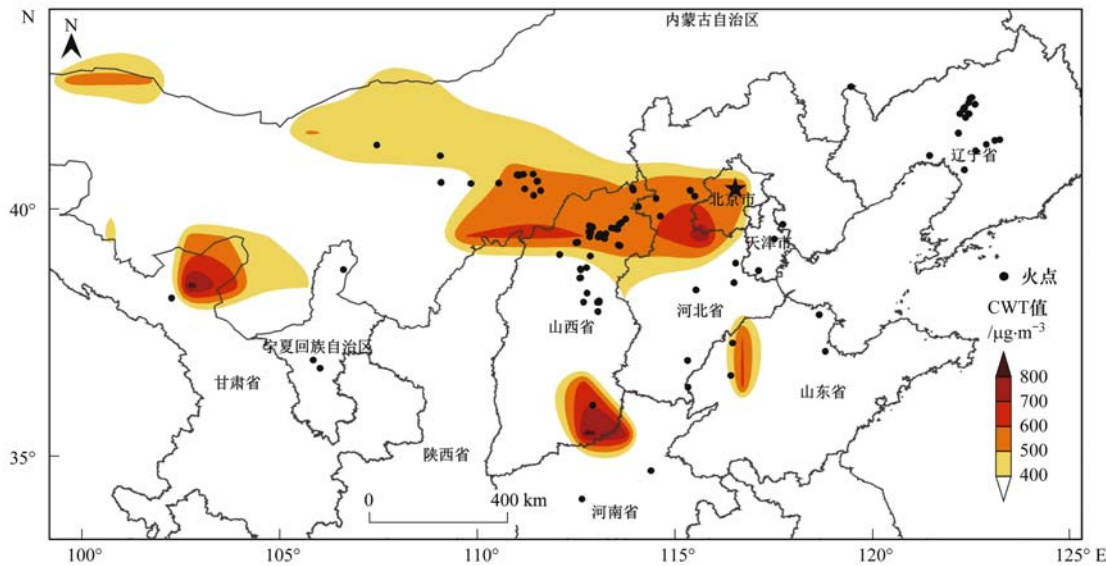


图5 非供暖期间和供暖期间正构烷烃质量浓度分布比较

Fig. 5 Comparison of the *n*-alkanes distributions between the heating period and the non-heating period

着相对较高的生物质燃烧污染传输影响。根据环境保护部卫星环境应用中心发布的环境卫星秸秆焚烧火点监测月报，尽管观测期间内北京市内火点数为零，但是与北京临近的省份，如山西省在观测期间

共有 44 个火点，内蒙古自治区 17 个，河北省 11 个。图 6 叠加了 CWT 的区域分布值以及观测期间秸秆焚烧火点地理位置分布。CWT 模型显示的北京生物质燃烧有机物的潜在来源地主要分布在河北



火点数据来源于环境卫星秸秆焚烧火点监测月报 (<http://hjj.mep.gov.cn/jgjs/>)

图6 左旋葡聚糖的 CWT 值以及北京市周围火点分布情况

Fig. 6 CWT values for levoglucosan and the distribution of fire points around Beijing

中部、山西北部及东南部和内蒙古的中部地区,与北京周围的秸秆焚烧火点分布较为一致,表明这些区域的秸秆焚烧对北京的生物质燃烧来源的有机气溶胶可能有一定的贡献.此外,这些火点绝大部分出现在11月20日之前.11月10~20日共有63个火点,而11月21日至12月10日仅出现了9个火点.以11月21日作为划分,11月10~20日秸秆焚烧活动较为频繁,左旋葡聚糖在总有机物OM中的占比为 $(17.2 \pm 3.7)\%$;而11月23日至12月10日秸秆焚烧活动明显减弱,左旋葡聚糖在总有机物OM中的占比减少为 $(12.2 \pm 3.1)\%$.考虑到农村生物能源燃料的室内燃烧的贡献较为稳定,两个阶段左旋葡聚糖的占比的差异应该来自于秸秆焚烧.

2.4 2016年与2006年北京冬季OC来源的比较

Wang等^[19]利用POM中的分子示踪物和化学质量平衡(MM-CMB)模型对2006年冬季PM_{2.5}中OC的来源进行了解析.为与2006年的结果进行比较^[19],利用相同的源谱和示踪物(包括EC、左旋葡聚糖、胆固醇和菜油甾醇,以及多种正构烷烃、正构烷酸、多环芳烃和藿烷),对2016年北京冬季观测期间的OC进行了源解析.2016年各来源的平均贡献质量浓度与2006年结果的比较如图7所示.就化石燃料来看,2016年汽油车与柴油车排放的贡献浓度都有所升高,而煤炭燃烧排放的贡献则大幅下

降,仅为2006年的四分之一.这些变化与机动车保有量和能源消费结构改变相关.近年来京津冀机动车保有量有了大幅提高,根据北京统计年鉴的数据,2006年北京市机动车保有量为275.4万辆^[40],而2016年已经达到571.7万辆^[41],接近2006年的两倍.此外,天津市和河北省的民用汽车保有量也分别由2006年的81.7万辆^[42]和301.7万辆^[43]上升至2016年的273.8万辆^[44]和1291.7万辆^[45].虽然机动车排放标准由2006年的国Ⅲ标准提升至2016年的国Ⅴ标准,单位机动车排放的污染物会有所降低,但不足以抵消保有量大幅增加带来的影响.从能源结构上看,京津冀煤炭占总能源消耗的比重有所下降,2006年北京、天津和河北的煤炭能源比重分别为52%^[40]、85%^[42]和92%^[43],而2016年则下降到了10%^[41,45]、51%^[44]和85%^[45].2006年北京市的煤炭消费量为2914.4万t^[40],而2016年下降到了847.8万t^[41],仅为2006年的30%,同时煤炭标准的提高也有助于降低其对OC的贡献.秸秆燃烧的排放也有所增加,可能与谷物的产量有关.2006年全国的谷物产量为45099.2万t,而2016年为56538.1万t^[46].而与此相比,木材燃烧的排放贡献大幅降低.植物碎屑的排放略微上升,2006年北京市森林覆盖率为35.9%^[40],2016年上升至42.3%^[41].餐饮源排放则比较稳定,几乎没有变化.

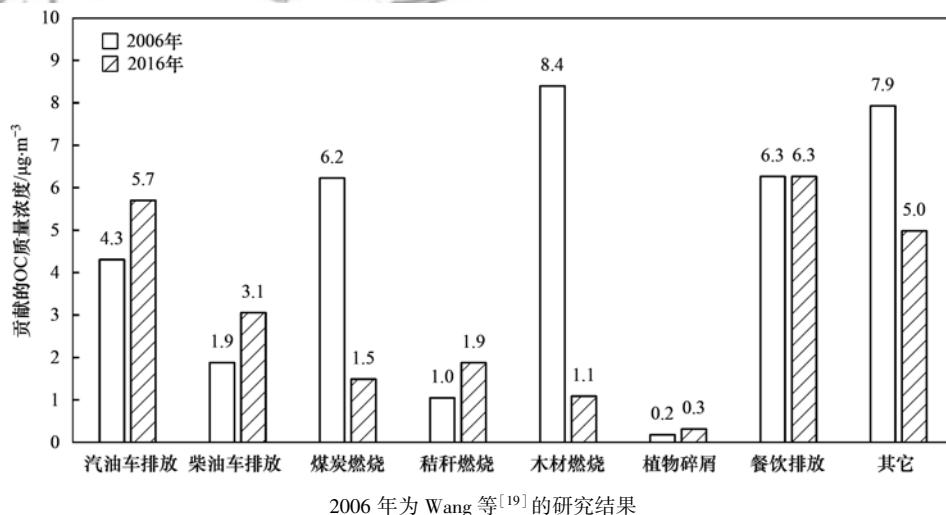


图7 2016年与2006年北京冬季不同来源贡献的OC质量浓度对比

Fig. 7 Comparison of the OC concentrations contributed by different sources in the winters of 2016 and 2006 in Beijing

2006~2016年这10年间,随着污染源的数量和排放的变化,OC与PM_{2.5}质量浓度也发生了较大的改变.2016年PM_{2.5}的OC总质量浓度由2006年的 $36.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ 下降至 $24.2 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$,PM_{2.5}的质量浓度也由 $127.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ^[19]下降至 $80.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$.从2016年与2006年各来源贡献占比的对比结果来看

(图8),2016年汽油车和柴油车排放贡献的占比大幅提高,汽油车由12%提高至23%,柴油车由5%提高至12%,约为2006年的两倍.此外,尽管餐饮源排放贡献的质量浓度没有增加,但由于OC总量的降低,其对OC的贡献占比也从17%增加至25%.而煤炭燃烧和木材燃烧排放的占比大幅下

降, 分别从 17% 和 23% 下降至 6% 和 5%。OC 的一次来源中, 机动车源和餐饮源排放的贡献愈发凸显。

利用源谱中 OC 占 PM_{2.5} 总质量浓度的比值, 估算各一次来源对 PM_{2.5} 的贡献^[19], 加入典型二次组分硫酸盐、硝酸盐和铵盐 (SNA) 的占比, 结果如图 9 所示。一次来源中机动车排放的贡献最高, 占 26%, 其次是餐饮排放, 占 9%。由于餐饮源排放的

颗粒物大部分是有机物, 因此餐饮源对 PM_{2.5} 的贡献相较于对 OC 的贡献明显减少。生物质燃烧, 包括木材燃烧和秸秆燃烧也占到 9%。燃煤排放仅贡献 4%。机动车的总贡献占所有一次来源贡献的一半以上, 表明机动车污染控制对于北京冬季至关重要。此外, 二次生成的无机盐 (SNA) 占到 PM_{2.5} 总质量浓度的 36%, 反映出其气态前体物如 SO₂ 和 NO_x 控制的重要性。

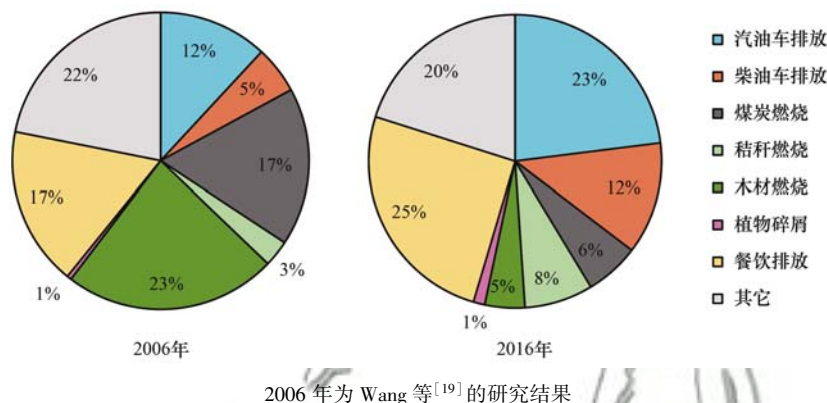


图 8 2016 年与 2006 年北京冬季 OC 来源解析结果对比

Fig. 8 Comparison of the source apportionment results for OC in the winters of 2016 and 2006 in Beijing

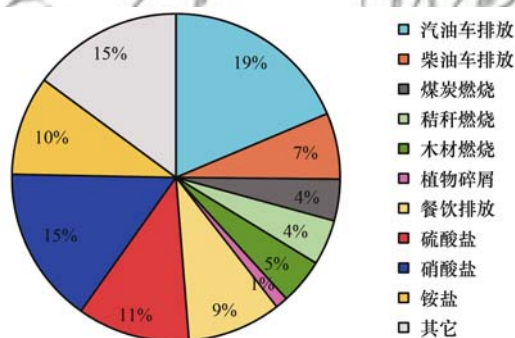


图 9 2016 年北京冬季 PM_{2.5} 来源解析结果

Fig. 9 Source apportionment results for PM_{2.5} in the winter of 2016 in Beijing

3 结论

(1) 观测期间 PM_{2.5} 中 OC 的平均质量浓度为 $(24.2 \pm 14.0) \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$, 用 GC-MS 定量其中的 129 种颗粒有机物, 定量的有机物质量浓度占到总有机物的 9.3%。其中含量最多的是糖类。其次是正构烷酸, 正构烷烃、二元羧酸和多环芳烃。

(2) 供暖期间化石燃料的示踪物藿烷的质量浓度约是非供暖期间的两倍, 其在 OM 中的占比也有所增加。燃煤的特征排放物种 HP29 在 3 种藿烷中的占比也高于非供暖期间。此外, 供暖期间正构烷烃在碳数为 22~25 处的分布明显增强, CPI 指数由 1.6 下降至 1.3, 表明化石燃料的贡献相对升高。这些颗粒有机物的特征印证了供暖期间燃煤来源增加的影响。

(3) CWT 模型的结果表明, 观测期间北京生物质燃烧有机物的潜在来源在河北、山西和内蒙古等区域有广泛的分布, 与北京周围秸秆焚烧火点分布情况较为一致。秸秆焚烧较为频繁的阶段, 左旋葡聚糖在 OM 中的占比明显增加, 表明北京周围区域的秸秆燃烧污染可以通过传输影响北京有机气溶胶的组成。

(4) 相较于 2006 年, 2016 年北京的 PM_{2.5} 和 OC 的质量浓度均有了大幅度地下降。源解析结果表明, 2016 年北京燃煤和木材燃烧排放的质量浓度较 2006 年大幅度降低, 占比也分别从 17% 和 23% 下降至 6% 和 5%。秸秆燃烧和植物碎屑的排放贡献则略有上升。而 2016 年北京冬季汽油车和柴油车贡献浓度和占比都明显增加, 汽油车对 OC 的贡献由 2006 年的 12% 提高至 23%, 柴油车由 5% 提高至 12%。餐饮排放的质量浓度虽然保持稳定, 但由于 OC 的总质量浓度的下降, 其贡献在 OC 中的占比则相对增加。这些变化与机动车保有量和能源消费结构改变相关。近年来, 北京及其周围地区的机动车保有量大幅增加, 而煤炭占总能源消耗的比重有所下降。2016 年北京 PM_{2.5} 来源贡献的估算结果表明, 一次来源中机动车排放的贡献最高, 占 26%, 其次是餐饮排放, 占 9%。机动车的总贡献占所有一次来源贡献的一半以上。2006~2016 年这 10 年间北京污染源贡献发生的变化, 反映出近年来对煤炭和木材燃烧控制的成效。然而目前对机动车排放

的控制还不足以抵消机动车保有量大幅增加的影响。同时餐饮源排放的贡献也是不可忽略的,并且在污染总浓度降低的背景下逐渐突出。因此,控制机动车和餐饮源污染对北京冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 污染至关重要。

参考文献:

- [1] Saxena P, Hildemann L M. Water-soluble organics in atmospheric particles: a critical review of the literature and application of thermodynamics to identify candidate compounds [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1996, **24**(1): 57-109.
- [2] Putaud J P, Raes F, Van Dingenen R, *et al.* A european aerosol phenomenology-2: chemical characteristics of particulate matter at kerbside, urban, rural and background sites in Europe [J]. *Atmospheric Environment*, 2004, **38**(16): 2579-2595.
- [3] Seinfeld J H, Pandis S N. *Atmospheric chemistry and physics: from air pollution to climate change* [M]. New York: Wiley, 1997.
- [4] Nisbet I C T, Lagoy P K. Toxic equivalency factors (TEFs) for Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) [J]. *Regulatory Toxicology and Pharmacology*, 1992, **16**(3): 290-300.
- [5] Mauderly J L, Chow J C. Health effects of organic aerosols [J]. *Inhalation Toxicology*, 2008, **20**(3): 257-288.
- [6] Clarke A G, Karani G N. Characterisation of the carbonate content of atmospheric aerosols [J]. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 1992, **14**(1-4): 119-128.
- [7] Novakov T, Penner J E. Large contribution of organic aerosols to cloud-condensation-nuclei concentrations [J]. *Nature*, 1993, **365**(6449): 823-826.
- [8] Alexander D T L, Crozier P A, Anderson J R. Brown carbon spheres in east asian outflow and their optical properties [J]. *Science*, 2008, **321**(5890): 833-836.
- [9] Ravindra K, Sokhi R, Van Grieken R. Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: source attribution, emission factors and regulation [J]. *Atmospheric Environment*, 2008, **42**(13): 2895-2921.
- [10] Chebbi A, Carlier P. Carboxylic acids in the troposphere, occurrence, sources, and sinks; a review [J]. *Atmospheric Environment*, 1996, **30**(24): 4233-4249.
- [11] Simoneit B R T. Biomass burning- a review of organic tracers for smoke from incomplete combustion [J]. *Applied Geochemistry*, 2002, **17**(3): 129-162.
- [12] Zhang Y X, Shao M, Zhang Y H, *et al.* Source profiles of particulate organic matters emitted from cereal straw burnings [J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2007, **19**(2): 167-175.
- [13] Zhang Y X, Schauer J J, Zhang Y H, *et al.* Characteristics of particulate carbon emissions from real-world chinese coal combustion [J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, **42**(14): 5068-5073.
- [14] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 2. Noncatalyst and catalyst-equipped automobiles and heavy-duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(4): 636-651.
- [15] Rogge W F, Hildemann L M, Mazurek M A, *et al.* Sources of fine organic aerosol. 4. Particulate abrasion products from leaf surfaces of urban plants [J]. *Environmental Science & Technology*, 1993, **27**(13): 2700-2711.
- [16] He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Seasonal pollution characteristics of organic compounds in atmospheric fine particles in Beijing [J]. *Science of the Total Environment*, 2006, **359**(1-3): 167-176.
- [17] Zheng M, Salmon L G, Schauer J J, *et al.* Seasonal trends in $\text{PM}_{2.5}$ source contributions in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2005, **39**(22): 3967-3976.
- [18] 于娜,魏永杰,胡敏,等. 北京城区和郊区大气细粒子有机物污染特征及来源解析 [J]. *环境科学学报*, 2009, **29**(2): 243-251.
- Yu N, Wei Y J, Hu M, *et al.* Characterization and source identification of ambient organic carbon in $\text{PM}_{2.5}$ in urban and suburban sites of Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, **29**(2): 243-251.
- [19] Wang Q, Shao M, Zhang Y, *et al.* Source apportionment of fine organic aerosols in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, **9**(21): 8573-8585.
- [20] Guo S, Hu M, Guo Q, *et al.* Quantitative evaluation of emission controls on primary and secondary organic aerosol sources during Beijing 2008 olympics [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(16): 8303-8314.
- [21] Tang R Z, Wu Z P, Li X, *et al.* Primary and secondary organic aerosols in summer 2016 in Beijing [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, **18**(6): 4055-4068.
- [22] Huang X F, He L Y, Hu M, *et al.* Annual variation of particulate organic compounds in $\text{PM}_{2.5}$ in the urban atmosphere of Beijing [J]. *Atmospheric Environment*, 2006, **40**(14): 2449-2458.
- [23] 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.
- [24] 郇宁,曾立民,邵敏,等. 北京市冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 中碳组分的测量与分析 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2006, **42**(2): 265-270.
- Huan N, Zeng L M, Shao M, *et al.* Measurement and discussion of carbonaceous $\text{PM}_{2.5}$ during winter in Beijing [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2006, **42**(2): 265-270.
- [25] 何凌燕,胡敏,黄晓锋,等. 北京市大气气溶胶 $\text{PM}_{2.5}$ 中极性有机化合物的测定 [J]. *环境科学*, 2004, **25**(5): 15-20.
- He L Y, Hu M, Huang X F, *et al.* Determination of polycyclic aromatic hydrocarbons in atmospheric fine particulate matter in Beijing city [J]. *Environmental Science*, 2004, **25**(5): 15-20.
- [26] Oros D R, Simoneit B R T. Identification and emission rates of molecular tracers in coal smoke particulate matter [J]. *Fuel*, 2000, **79**(5): 515-536.
- [27] Cai T Q, Zhang Y, Fang D Q, *et al.* Chinese vehicle emissions characteristic testing with small sample size: results and comparison [J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, **8**(1): 154-163.
- [28] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 2. C_1 through C_{30} organic compounds from medium duty diesel trucks [J]. *Environmental Science & Technology*, 1999, **33**(10): 1578-1587.
- [29] Schauer J J, Kleeman M J, Cass G R, *et al.* Measurement of emissions from air pollution sources. 5. C_1 - C_{32} organic compounds from gasoline-powered motor vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2002, **36**(6): 1169-1180.
- [30] Zhao Y L, Hu M, Slanina S, *et al.* Chemical compositions of fine particulate organic matter emitted from chinese cooking [J].

- Environmental Science & Technology, 2007, **41**(1): 99-105.
- [31] Simoneit B R T. Characterization of organic constituents in aerosols in relation to their origin and transport: a review [J]. International Journal of Environmental Analytical Chemistry, 1986, **23**(3): 207-237.
- [32] de Almeida Azevedo D, Moreira L S, de Siqueira D S. Composition of extractable organic matter in aerosols from urban areas of rio de janeiro city, Brazil [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(30): 4987-5001.
- [33] Simoneit B R T, Schauer J J, Nolte C G, *et al.* Levoglucosan, a tracer for cellulose in biomass burning and atmospheric particles [J]. Atmospheric Environment, 1999, **33**(2): 173-182.
- [34] Simoneit B R T, Elias V O. Organic tracers from biomass burning in atmospheric particulate matter over the ocean [J]. Marine Chemistry, 2000, **69**(3-4): 301-312.
- [35] Simoneit B R T, Elias V O. Detecting organic tracers from biomass burning in the atmosphere [J]. Marine Pollution Bulletin, 2001, **42**(10): 805-810.
- [36] Bhattarai H, Saikawa E, Wan X, *et al.* Levoglucosan as a tracer of biomass burning: recent progress and perspectives [J]. Atmospheric Research, 2019, **220**: 20-33.
- [37] Hsu Y K, Holsen T M, Hopke P K. Comparison of hybrid receptor models to locate PCB sources in Chicago [J]. Atmospheric Environment, 2003, **37**(4): 545-562.
- [38] Wang Y Q, Zhang X Y, Arimoto R. The contribution from distant dust sources to the atmospheric particulate matter loadings at Xian, China during spring [J]. Science of the Total Environment, 2006, **368**(2-3): 875-883.
- [39] Stein A F, Draxler R R, Rolph G D, *et al.* NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2015, **96**(12): 2059-2077.
- [40] 北京市统计局. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [41] 北京市统计局. 北京统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [42] 天津市统计局. 天津统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [43] 河北省人民政府. 河北经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2007.
- [44] 天津市统计局. 天津统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [45] 河北省人民政府. 河北经济年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.
- [46] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2017.



CONTENTS

Chemical Characteristics and Source Apportionment of Organic Aerosols in Atmospheric PM _{2.5} in Winter in Beijing	XU Nan, WANG Tian-tian, LI Xiao, <i>et al.</i> (2101)
Characteristics of Two Pollution Episodes Before and After City Heating in Beijing from February to March of 2019	YIN Xiao-mei, PU Wei-wei, WANG Ji-kang, <i>et al.</i> (2110)
Analysis of Characteristics and Causes of a Typical Haze Pollution in Beijing in the Winter of 2019	LIAN Han-yang, YANG Xin, ZHANG Pu, <i>et al.</i> (2121)
New Particle Formation Events in Summer and Winter in the Coastal Atmosphere in Qingdao, China	SUN Yue, ZHU Yu-jiao, MENG He, <i>et al.</i> (2133)
Characteristics of Heavy Metal Pollution and Ecological Risk Evaluation of Indoor Dust from Urban and Rural Areas in Taiyuan City During the Heating Season	HUANG Hao, XU Zi-qi, YAN Jun-xia, <i>et al.</i> (2143)
Concentration Analysis and Health Risk Assessment of Air Pollutants in Newly Decorated Public Places in Xi'an	FAN Jie, FAN Hao, SHEN Zhen-xing, <i>et al.</i> (2153)
Emission Concentration and Characteristics of Particulate Matter and Water-Soluble Ions in Exhaust Gas of Typical Combustion Sources with Ultra-Low Emission	HU Yue-qi, WANG Zheng, GUO Jian-hui, <i>et al.</i> (2159)
High-Throughput Sequencing Analysis of Microbial Communities in Summertime Atmospheric Particulate Matter in Hefei City	JIANG Shao-yi, SUN Bo-wen, DAI Hai-tao, <i>et al.</i> (2169)
Spatiotemporal Variations in Fine Particulate Matter and the Impact of Air Quality Control in Zhengzhou	DONG Zhe, YUAN Ming-hao, SU Fang-cheng, <i>et al.</i> (2179)
Characteristics of Ozone Pollution and Relationships with Meteorological Factors in Jiangxi Province	QIAN Yue, XU Bin, XIA Ling-jun, <i>et al.</i> (2190)
Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Aerosol Optical Properties in Urban Agglomerations on the North Slope of the Tianshan Mountains	ZHANG Zhe, DING Jian-li, WANG Jin-jie, <i>et al.</i> (2202)
Comprehensive Classification Method of Urban Water by Remote Sensing Based on High-Resolution Images	YANG Zi-qian, LIU Huai-qing, LÜ Heng, <i>et al.</i> (2213)
Construction and Application Optimization of the Chl-a Forecast Model ARIMA for Lake Taihu	LI Na, LI Yong, FENG Jia-cheng, <i>et al.</i> (2223)
Spatial Differences in Water Quality and Spatial Autocorrelation Analysis of Eutrophication in Songhua Lake	DING Yang, ZHAO Jin-yong, ZHANG Jing, <i>et al.</i> (2232)
Pollution and Irrigation Applicability of Surface Water from Wet, Normal, and Dry Periods in the Huixian Karst Wetland, China	ZHU Dan-ni, ZOU Sheng-zhang, LI Jun, <i>et al.</i> (2240)
Changes in Water Chemistry and Driving Factors in the Middle and Lower Reaches of the Beijing-Hangzhou Grand Canal	CHENG Zhong-hua, DENG Yi-xiang, ZHUO Xiao-ke, <i>et al.</i> (2251)
Effects of Different Land Use Practices on Nitrogen Loss from Runoff During Rainfall Events	LUO Yi-feng, CHEN Fang-xin, ZHOU Hao, <i>et al.</i> (2260)
Sources and Fate of Nitrate in Groundwater in a Typical Karst Basin: Insights from Carbon, Nitrogen, and Oxygen Isotopes	REN Kun, PAN Xiao-dong, LIANG Jia-peng, <i>et al.</i> (2268)
Changes in the Bacterioplankton Community Between "Ice" and "Water" in the Frozen Dali Lake	LI Wen-bao, YANG Xu, TIAN Ya-nan, <i>et al.</i> (2276)
Analysis of the Spatial Changes in Bacterial Communities in Urban Reclaimed Water Channel Sediments; A Case Study of the North Canal River	QIU Ying, JIN Yan, SU Zhen-hua, <i>et al.</i> (2287)
Spatial Differences and Influencing Factors of Denitrification and ANAMMOX Rates in Spring and Summer in Lake Taihu	ZHAO Feng, XU Hai, ZHAN Xu, <i>et al.</i> (2296)
Structural Characteristics of Zooplankton and Phytoplankton Communities and Its Relationship with Environmental Factors in a Typical Tributary Reservoir in the Three Gorges Reservoir Region	CHEN Sha, XIE Qing, FU Mei, <i>et al.</i> (2303)
Application of Iron and Sulfate-Modified Biochar in Phosphorus Removal from Water	SANG Qian-qian, WANG Fang-jun, ZHAO Yuan-tian, <i>et al.</i> (2313)
Analysis of the Performance and Mechanism of Phosphorus Removal in Water by Steel Slag	LUO Xiao, ZHANG Jun-bo, HE Lei, <i>et al.</i> (2324)
Adsorption of BS-18 Amphoterically Modified Bentonite to Tetracycline and Norfloxacin Combined Pollutants	WANG Xin-xin, MENG Zhao-fu, LIU Xin, <i>et al.</i> (2334)
Preparation of Ag ₃ PO ₄ /g-C ₃ N ₄ Composite Photocatalysts and Their Visible Light Photocatalytic Performance	GAO Chuang-chuang, LIU Hai-cheng, MENG Wu-shuang, <i>et al.</i> (2343)
Activation of Permonosulfate by Rhodamine B for BPA Degradation Under Visible Light Irradiation	ZHANG Yi-chen, BAI Xue, SHI Juan, <i>et al.</i> (2353)
Fe-Ti Co-Doped Alumina-Induced Surface Dual Reaction Center for Catalytic Ozonation to Remove Pollutants from Water	ZHANG Fan, SONG Yang, HU Chun, <i>et al.</i> (2360)
Preparation of Sulfidated Copper-Iron Bimetallic Compositing Material and Its Mechanism for Chromium Removal	QU Min, WANG Yuan, CHEN Hui-xia, <i>et al.</i> (2370)
Mechanisms of Penicillin Wastewater Treatment by Coupled Electrocatalytic and Bioelectrochemical Systems	QU You-peng, LÜ Jiang-wei, DONG Yue, <i>et al.</i> (2378)
Aerobic Granular Sludge Operation and Nutrient Removal Mechanism from Domestic Sewage in an Anaerobic/Aerobic Alternating Continuous Flow System	LI Dong, YANG Jing-wei, LI Yue, <i>et al.</i> (2385)
In-situ Phosphorus Removal Activity and Impact of the Organic Matter Concentration on Denitrifying Phosphorus Removal in Sludge Aggregates	LÜ Yong-tao, JIANG Xiao-tong, TU Yan, <i>et al.</i> (2396)
In-situ Sludge Reduction Technology Based on Ozonation	XUE Bing, LIU Bin-han, WEI Ting-ting, <i>et al.</i> (2402)
Effects of Activated Carbon on the Fate of Antibiotic Resistance Genes During Anaerobic Digestion of the Organic Fraction of Municipal Solid Waste	MA Jia-ying, WANG Pan-liang, WANG Bing-han, <i>et al.</i> (2413)
Release Mechanisms of Carbon Source and Dissolved Organic Matter of Six Agricultural Wastes in the Initial Stage	LING Yu, YAN Guo-kai, WANG Hai-yan, <i>et al.</i> (2422)
Spatial Differentiation of Soil Organic Carbon Density and Influencing Factors in Typical Croplands of China	LI Cheng, WANG Rang-hui, LI Zhao-zhe, <i>et al.</i> (2432)
Characteristics of Paddy Soil Organic Carbon Mineralization and Influencing Factors Under Different Water Conditions and Microbial Biomass Levels	LIU Qi, LI Yu-hong, LI Zhe, <i>et al.</i> (2440)
Analysis of Nitrogen Transformation Characteristics and Influencing Factors of Forestland Soil in the Qinghai-Tibet Plateau; A Case Study of the Qilian Mountains and Southeast Tibet	HE Fang, ZHANG Li-mei, SHEN Cong-cong, <i>et al.</i> (2449)
Using the Matter-Element Extension Model to Assess Heavy Metal Pollution in Topsoil in Parks in the Main District Park of Lanzhou City	HU Meng-jun, LI Chun-yan, LI Na-na, <i>et al.</i> (2457)
Effects of Long-Term Application of Chemical Fertilizers and Organic Fertilizers on Heavy Metals and Their Availability in Reddish Paddy Soil	XIA Wen-jian, ZHANG Li-fang, LIU Zeng-bing, <i>et al.</i> (2469)
Characteristics and Origins of Heavy Metals in Soil and Crops in Mountain Area of Southern Sichuan	HAN Wei, WANG Cheng-wen, PENG Min, <i>et al.</i> (2480)
Spatial Distribution Characteristics, Source Apportionment, and Risk Assessment of Topsoil PAHs in the Core Area of the Ningdong Energy and Chemical Industry Base	YANG Fan, LUO Hong-xue, ZHONG Yan-xia, <i>et al.</i> (2490)
Functional Stability and Applicability of Heavy Metal Passivators in Reducing Cd Uptake by Lettuce	PANG Fa-hu, WU Xue-jiao, KONG Xue-fei, <i>et al.</i> (2502)
Effects of Water Management on Cadmium Accumulation by Rice (<i>Oryza sativa</i> L.) Growing in Typical Paddy Soil	ZHANG Yu-ting, TIAN Ying-bing, HUANG Dao-you, <i>et al.</i> (2512)
Adsorption Properties of Oiltea Camellia Shell-Modified Biochar and Effects of Coupled Waterlogging on Soil Cd Morphology	CAI Tong, DU Hui-hui, LIU Xiao-li, <i>et al.</i> (2522)
Effects of Land Use Changes on Soil Fungal Community Structure and Function in the Riparian Wetland Along the Downstream of the Songhua River	XU Fei, ZHANG Tuo, HUAI Bao-dong, <i>et al.</i> (2531)
Distribution of Antibiotic Resistance Genes and Microbial Communities in a Fishery Reclamation Mining Subsidence Area	CHENG Sen, LU Ping, FENG Qi-yan (2541)
Effects of Three Commonly Used Herbicides on Bacterial Antibiotic Resistance	LI Xi, LIAO Han-peng, CUI Peng, <i>et al.</i> (2550)
Discussion of Microbial Control Standards of Water Reclamation and Formulation Methods	CHEN Zhuo, CUI Qi, CAO Ke-fan, <i>et al.</i> (2558)