

百方知库  
Eco-Environmental  
Knowledge Web

# 环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV  
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.4  
第40卷 第4期

目次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 ..... 于兴娜, 时政, 马佳, 李梅, 龚克坚(1521)

西安市PM<sub>2.5</sub>中碳质气溶胶污染特征 ..... 牟臻, 陈庆彩, 王羽琴, 沈振兴, 华晓羽, 张梓萌, 孙浩堯, 王玛敏, 张立欣(1529)

太原市冬季PM<sub>2.5</sub>化学组分特征与来源解析 ..... 刘素, 马彤, 杨艳, 高健, 彭林, 曹力媛, 逢妮妮, 张浩杰(1537)

郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析 ..... 闫广轩, 张靖雯, 雷豪杰, 黄海燕, 唐明双, 曹治国, 李云蓓, 樊静, 王跃思, 李怀刚(1545)

珠海市郊区大气PM<sub>2.5</sub>中元素特征及重金属健康风险评价 ..... 杨毅红, 贾燕, 卞国建, 于晓巍, 钟昌琴, 全鼎余(1553)

一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 ..... 金同俊, 祁建华, 郝梓延, 林学辉(1562)

基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟 ..... 高爽, 伯鑫, 马岩, 雷团团, 王刚, 李时蓓, 陆朝阳, 毛娜, 郝明亮, 黄向峰(1575)

京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 ..... 孙爽, 李令军, 赵文吉, 齐梦溪, 田欣, 李珊珊(1585)

2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算 ..... 赵文慧, 李令军, 鹿海峰, 姜磊, 张立坤, 王新辉, 邱昀(1594)

基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 ..... 齐冰, 车慧正, 徐婷婷, 杜荣光, 胡德云, 梁卓然, 马千里, 姚杰(1604)

四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势 ..... 周子航, 邓也, 谭钦文, 吴柯颖, 宋丹林, 黄凤霞, 周小玲(1613)

餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 ..... 高雅琴, 王红丽, 许睿哲, 景盛翱, 刘跃辉, 彭亚荣(1627)

广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O<sub>3</sub>分析 ..... 邹宇, 邓雪娇, 李菲, 殷长泰(1634)

北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 ..... 胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超(1645)

南昌市扬尘PM<sub>2.5</sub>中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 ..... 于瑞莲, 郑权, 刘贤荣, 王珊珊, 赵莉斯, 胡恭任(1656)

道路扬尘排放因子建立方法与应用 ..... 樊守彬, 杨涛, 王凯, 李雪峰(1664)

现实工况下挖掘机电尾气排放特征分析 ..... 马帅, 张凯山, 王帆, 庞凯莉, 朱怡静, 李臻, 毛红梅, 胡宝梅, 杨锦锦, 王斌(1670)

雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 ..... 杨唐, 韩云平, 李琳, 刘俊新(1680)

霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 ..... 赵秀娟, 李梓铭, 徐敬(1688)

支持向量机回归在臭氧预报中的应用 ..... 苏筱倩, 安俊琳, 张玉欣, 梁静舒, 刘静达, 王鑫(1697)

基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 ..... 郝旭, 王贺武, 李伟峰, 欧阳明高(1705)

岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应:以重庆龙凤槽谷地下河系统为例 ..... 段世辉, 蒋勇军, 张远瞩, 曾泽, 王正雄, 吴韦, 彭学义, 刘九缠(1715)

胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 ..... 刘成, 孙翠竹, 张智, 唐燎, 邹亚丹, 徐擎擎, 李锋民(1726)

湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估 ..... 彭诗云, 彭平安, 孔德明, 陈法锦, 于赤灵, 李嘉诚, 梁宇钊, 宋建中(1734)

生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析:以盐龙湖春季为例 ..... 马睿, 李璇, 王莲, 王家新, 马卫星, 丁成, 吴向阳(1742)

溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系:基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC) ..... 李昀, 魏鸿杰, 王侃, 张招招, 于旭彪(1751)

汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 ..... 谢经朝, 赵秀兰, 何丙辉, 李章安(1760)

基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律 ..... 郑文波, 王仕琴, 刘丙霞, 雷玉平, 曹建生(1770)

澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 ..... 程豹, 望雪, 马金川, 杨正健, 刘富雷, 马骏(1779)

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 ..... 何露露, 杨平, 谭立山, 仝川, 黄佳芳(1788)

尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险 ..... 王硕, 刘建超, 郑超亚, 张吉琛, 许嘉诚, 徐莹莹, 陆光华(1797)

绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 ..... 李俊生, 尹海伟, 孔繁花, 陈佳宇, 邓金玲(1803)

超声活化过硫酸盐降解水中典型臭味 ..... 孙昕, 孙杰, 李鹏飞, 汤加刚, 杨晴, 唐晓(1811)

金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(VI) ..... 闫增元, 刁海玲, 袁立永(1819)

覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异 ..... 龚佳健, 倪兆奎, 肖尚斌, 赵海超, 席银, 王圣瑞(1826)

气氧化铜改性介孔稻壳生物炭除磷性能 ..... 许润, 石程好, 唐倩, 石稳民, 康建雄, 任拥政(1834)

改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 ..... 陈坦, 周泽宇, 孟瑞红, 刘彦廷, 王洪涛, 陆文静, 金军, 刘颖(1842)

纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 ..... 李玉娇, 杨志敏, 陈玉成, 黄磊, 唐海燕(1849)

赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 ..... 黄绍福, 叶捷, 周顺桂(1857)

微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 ..... 马航, 李之鹏, 柳峰, 徐仲, 尤宏, 王芳, 陈其伟(1865)

生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 ..... 李冬, 崔雅倩, 赵世勋, 张志诚, 张杰(1871)

生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 ..... 李冬, 王樱桥, 李帅, 张杰, 王玉刚(1878)

硫磺/硫酸铁自养反硝化系统脱氮性能 ..... 周娅, 买文宁, 梁家伟, 代吉华, 牛颖, 李伟利, 唐启(1885)

异养硝化细菌Pseudomonas putida YH的脱氮特性及降解动力学 ..... 汪旭晖, 杨垒, 任勇翔, 陈宁, 肖倩, 崔坤, 郇丹(1892)

污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 ..... 韦佳敏, 黄慧敏, 程诚, 蒋志云, 刘文如, 沈耀良(1900)

盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 ..... 王晗, 李瀚翔, 陈猷鹏, 郭劲松, 晏鹏, 方芳(1906)

内源磷PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 ..... 杨建鹏, 张健, 田晴, 朱艳彬, 李方, Wolfgang Sand(1914)

中国市政污泥中磷的含量与形态分布 ..... 王超, 刘清伟, 职音, 程柳, 王宁, 李彩丹, 毛宇翔(1922)

广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 ..... 王旭峰, 王强, 黎智广, 黄珂, 李刘冬, 赵东豪(1931)

长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N<sub>2</sub>O)浓度特征及影响因素 ..... 田琳琳, 王正, 胡磊, 任光前, 朱波(1939)

内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH<sub>4</sub>吸收规律 ..... 杨文柱, 焦燕, 杨铭德, 温慧洋(1950)

水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应 ..... 王莹莹, 肖谋良, 张昀, 袁红朝, 祝贞科, 葛体达, 吴金水, 张广才, 高晓丹(1957)

土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 ..... 徐学池, 黄媛, 何寻阳, 王桂红, 苏以荣(1965)

黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 ..... 覃乾, 朱世硕, 夏彬, 赵允格, 许明祥(1973)

农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 ..... 孔晨晨, 张世文, 聂超甲, 胡青青(1981)

生物发酵制药VOCs与臭味治理技术研究与发展 ..... 王东升, 朱新梦, 杨晓芳, 焦茹媛, 赵珊, 宋荣娜, 吕明晗, 杨敏(1990)

《环境科学》征订启事(1612) 《环境科学》征稿简则(1787) 信息(1663, 1796, 1833)

# 北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化

胡月琪, 李萌, 颜旭, 张超

(北京市环境保护监测中心, 大气颗粒物监测技术北京市重点实验室, 北京 100048)

**摘要:** 选择北京市具有代表性道路, 于2004年9月和2013年5月进行采样, 利用再悬浮设备制备道路扬尘 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 样品, 并进行化学组分分析, 建立了2004年和2013年北京市道路扬尘 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 源成分谱, 以分析和探讨北京市道路扬尘化学组分特征及其组分年际变化。结果表明, 北京市道路扬尘 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 源成分谱中的化学组分特征均为Ca、Si、有机碳(organic carbon, OC)、Al、Fe、K、Mg、 $SO_4^{2-}$ 和元素碳(element carbon, EC), 其在道路扬尘中的含量之和分别为: 2004年 $PM_{10}$ 为46.7303%、 $PM_{2.5}$ 为56.9198%和2013年 $PM_{2.5}$ 为38.7478%; 占全部被测组分的比例分别为95.9%、94.3%和94.7%。2004年道路扬尘中, 环路Si、Al的含量显著低于其他道路类型, 受到的土壤风沙尘影响最小; 建筑水泥尘特征元素Ca主干道含量最高, 高速五环进京口含量最低; EC在高速五环进京口的含量显著高于其他道路类型。而2013年 $PM_{2.5}$ 中被测组分总含量及Si、Al、Ca的含量次干道均显著低于其他道路类型。2013年与2004年相比, 北京市道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中除 $SO_4^{2-}$ 含量略上升了2.0%外, 其余组分含量下降显著, Ca、Si、OC、Al、Fe、K、EC和 $NO_3^-$ 下降幅度分别为45.1%、31.5%、17.5%、20.3%、55.6%、33.3%、30.0%和50.3%。结果表明,  $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 比值不能准确反映固定源和移动源相对贡献大小的变化。 $[OC]/[EC]$ 比值, 2004年 $PM_{10}$ 为 $9.77 \pm 3.88$ ,  $PM_{2.5}$ 为 $9.36 \pm 3.25$ , 2013年 $PM_{2.5}$ 为 $14.41 \pm 10.41$ , 北京市道路扬尘存在二次有机碳(secondary organic carbon, SOC), 且SOC是道路扬尘 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 的重要组成部分。不同城市道路扬尘及同一城市不同粒径的道路扬尘成分谱相似度不高, 应建立相应的成分谱并适时更新。

**关键词:** 道路扬尘; 化学组分特征; 源成分谱;  $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ ; 年际变化

中图分类号: X513 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)04-1645-11 DOI: 10.13227/j.hjkk.201808224

## Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing

HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, ZHANG Chao

(Beijing Key Laboratory of Airborne Particulate Matter Monitoring Technology, Beijing Municipal Environmental Protection Monitoring Center, Beijing 100048, China)

**Abstract:** Samples of road dust were collected from selected representative roads in Beijing in September 2004 and May 2013, and then re-suspended on filters using a NK-ZXF sampler to prepare road dust  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  samples. The concentrations of the chemical components in the road dust  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  were analyzed, and source profiles of the road dust in Beijing in 2004 and 2013 were established. The characteristics and interannual variation of the chemical components in the road dust in Beijing were analyzed and discussed. The results showed that the chemical components in the road dust  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  in Beijing were Ca, Si, organic carbon (OC), Al, Fe, K, Mg,  $SO_4^{2-}$ , and elemental carbon (EC). The total content of these chemical components in the  $PM_{10}$  in 2004,  $PM_{2.5}$  in 2004, and  $PM_{2.5}$  in 2013 were 46.7303%, 56.9198%, and 38.7478%, respectively, and the total content of these chemical components accounted for 95.9%, 94.3% and 94.7% of the total content of all components tested, respectively. In 2004, the contents of Si and Al in the road dust of ring road were significantly lower than those of other road types, and the influence of soil dust on the ring road was the smallest. The content of Ca, a characteristic element of construction dust, was the highest in main road, and was the lowest in the expressway entrance to Beijing. The content of EC in the road dust from the expressway entrance to Beijing was significantly higher than that in other road types. However, in 2013, the total content of all components tested and the contents of Si, Al, and Ca in the road dust  $PM_{2.5}$  of secondary main roads were significantly lower than those for other road types. Due to the implementation of dust, motor vehicles, and combustion source control measures in Beijing and the relocation of the Shougang corporation, only the content of  $SO_4^{2-}$  in the road dust  $PM_{2.5}$  in Beijing increased slightly by 2.0% in 2013 compared with in 2004; the contents of the other components decreased significantly. The contents of Ca, Si, OC, Al, Fe, K, EC, and  $NO_3^-$  decreased by 45.1%, 31.5%, 17.5%, 20.3%, 55.6%, 33.3%, 30.0%, and 50.3%, respectively. The results showed that the ratio of  $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$  did not accurately reflect the changes in the relative contributions of fixed sources and moving sources. The  $[OC]/[EC]$  ratios of  $PM_{10}$  in 2004,  $PM_{2.5}$  in 2004, and  $PM_{2.5}$  in 2013 were  $9.77 \pm 3.88$ ,  $9.36 \pm 3.25$ , and  $14.41 \pm 10.41$ , respectively. Secondary organic carbon (SOC) pollution was present in road dust in Beijing, and the SOC was an important component in the road dust  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ . The source profiles of different urban road dust samples and the source profiles of road dust of different sizes in the same city were not very similar, so the corresponding source profiles should be established and updated in a timely manner.

**Key words:** road dust; characteristics of chemical components; source profiles;  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$ ; interannual variation

收稿日期: 2018-08-28; 修订日期: 2018-10-08

基金项目: 北京市科技专项(H030630540190); 北京市科技计划项目(Z121100000312035); 北京市科技重大专项(D171100001517003)

作者简介: 胡月琪(1971~), 男, 高级工程师, 主要研究方向为环境与污染源监测, E-mail: huyueqi@bjmemc.com.cn

近年来京津冀区域性复合型污染日趋严重,颗粒物尤其是细颗粒物  $PM_{2.5}$  已成为城市环境空气质量的首要污染物<sup>[1~3]</sup>。有研究表明,细颗粒物因其较小的粒径和在空气中较长的停留时间以及易随呼吸而进入人的血液循环,给人类身体健康带来巨大的危害和致病风险<sup>[4~6]</sup>;颗粒物也因其重要组成部分水溶性离子的亲水性和吸湿性而易增加大气散射、降低大气能见度及影响降水酸度等而对气候造成显著影响<sup>[7~11]</sup>。

城市大气颗粒物来源复杂,既有人为排放源也有自然排放源,综合有关研究<sup>[12~16]</sup>,城市颗粒物污染来源的人为排放源中,固定源有:工业/供暖燃煤锅炉与电厂燃煤锅炉排放的煤烟尘、生物质燃烧/垃圾焚烧与水泥炉窑等工业源排放的粉尘、钢铁生产过程中排放的钢铁冶炼尘、家用散煤燃烧与餐饮油烟等生活面源排放尘;而移动源则是指:燃烧化石燃料的机动车、火车、轮船等排放的尾气尘;自然排放源是指由自然风力或人力作用把裸露的地面、农田、干枯河滩、山体土或施工工地上堆存的土壤等扬起并扩散到空气中的尘,包括土壤风沙尘(裸露的农田土、山体土、河滩土)、建筑水泥尘、道路扬尘、城市扬尘等。

为有效控制颗粒物污染,实现城市环境空气质量达标,需加强对这些污染源进行研究,以准确识别并定量主要污染源的贡献,制定有针对性的控制措施。近年来颗粒物来源解析已成为大气污染防治工作的重点,是为科学、有效开展大气污染防治决策提供科学依据的重要方法,而建立有效完善的源成分谱是开展源解析工作的前提条件<sup>[17~19]</sup>。因此获取北京市本地颗粒物排放源( $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ )成分谱,获得对受体有贡献源类的化学特征,是利用受体模型进行颗粒物来源解析研究的前提和基础,也为相关管理部门大气污染防治决策提供必要的技术支撑。

国务院2018年7月发布的《打赢蓝天保卫战三年行动计划》中,突出的4个重点行业和领域中明确提出了扬尘治理。相关研究也表明,无组织排放源是大气颗粒物的重要来源之一,其中道路扬尘的贡献不容忽视<sup>[19~21]</sup>。北京市道路的面积通常占城市总面积的10%以上,道路扬尘容易在机动车、行人及风力的作用下反复扬起,反复沉降,因此道路扬尘对北京市大气颗粒物的贡献不小。北京市2018年5月发布的新一轮 $PM_{2.5}$ 来源解析结果表明:本地扬尘排放源贡献占16%,而其中道路扬尘贡献高达43%。

道路扬尘通常被认为是一种复合源类,既可视

为对大气颗粒物贡献的排放源类,也可视为其他相关颗粒物排放源类的受体,其化学组成特征能够反映城市环境受到人为源影响的程度<sup>[22,23]</sup>。国内外不少城市已经利用不同的采样方法和相关分析技术,开展了道路扬尘成分谱及其来源的研究,并建立了较为完善的道路尘 $PM_{10}$ 或 $PM_{2.5}$ 成分谱<sup>[15~17,19,23~26]</sup>。但是,目前大多数道路扬尘成分谱的研究基本只针对 $PM_{10}$ 或 $PM_{2.5}$ 粒径,而不同粒径道路扬尘化学组分差异及不同时期成分谱年际变化的分析研究较少。

本研究在北京市高速公路进京口、环路、城市主干道、城市次干道等选择具有代表性路段,分别于2004年9月和2013年5月采集道路尘,通过再悬浮设备制备了 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 样品,并进行了化学组分、碳质组分以及离子分析,获取了不同时期道路尘的 $PM_{10}$ 和 $PM_{2.5}$ 源成分谱。在此基础上分析了同一时期不同粒径道路扬尘成分谱的差异,比较了不同时期道路扬尘化学组分特征的变化,探讨了大气污染防治措施对道路扬尘成分谱的影响,评估了道路扬尘的无机离子与碳组分变化特征,对不同城市道路扬尘成分谱的相似性与相关性进行了分析,以为北京市道路扬尘污染防治提供科学依据,同时为北京市大气颗粒物精细化来源解析提供技术支持和基础数据。

## 1 材料与方法

### 1.1 采样点位的布设

根据北京市核心区道路特点,按道路类型选择具有代表性路段进行布点采样。通过现场踏勘,挑选了北京市不同区域不同类别的道路,包括高速公路进京口、环路、主要干道、次要干道及支路或小路的十字路口,共布设采样点18个。采样点周围避免烟尘、工业粉尘、建筑工地及其他人为污染源的干扰。表1为北京市道路扬尘采样点位信息,图1所示为北京市道路扬尘采样点位分布示意。

### 1.2 样品的采集与处理

在每个采样点上采集马路边、隔离带、交通岗亭、交通指挥台、广告栏等处长期积累的道路扬尘,以及立交桥下的停车场地面或长期停放的车辆表面积聚的大量道路扬尘,用毛刷刷入牛皮纸袋中。采样时应避开雨季进行。每个采样点采集3~5处混合,样品质量约1 kg。样品运回实验室后自然风干,并保持样品的自然状态。

经自然风干的样品先用20目(850  $\mu\text{m}$ )尼龙筛筛分,将道路扬尘样品中的杂质除去,再对筛下物过100目(150  $\mu\text{m}$ )的尼龙筛。将筛分后所得的粒

表 1 道路扬尘采样点信息

Table 1 Information for the road dust sampling points

编号	采样地点	道路类型	经纬度
DL01	上清桥(八达岭高速与五环交界处)	高速五环进京口	E:116°20.960'; N:40°01.280'
DL02	杜家坎收费站(京石高速路入口)	高速五环进京口	E:116°12.359'; N:39°50.488'
DL03	大羊坊桥(京沪高速与五环交界处)	高速五环进京口	E:116°30.132'; N:39°48.975'
DL04	五元桥(机场高速与五环交界处)	高速五环进京口	E:116°29.608'; N:39°59.932'
DL05	西直门桥(西北二环路)	环路	E:116°20.732'; N:39°56.343'
DL06	菜户营桥(西南二环路)	环路	E:116°20.850'; N:39°52.015'
DL07	苏州桥(西北三环路)	环路	E:116°18.172'; N:39°57.517'
DL08	方庄桥(东南三环路)	环路	E:116°25.958'; N:39°51.513'
DL09	四季青桥(西四环路)	环路	E:116°16.146'; N:39°56.749'
DL10	四惠桥(东四环路)	环路	E:116°29.240'; N:39°54.395'
DL11	长安街东单路口	主干道	E:116°24.695'; N:39°54.355'
DL12	平安大街平安里路口	主干道	E:116°21.992'; N:39°55.877'
DL13	宣武门路口	主干道	E:116°22.048'; N:39°53.909'
DL14	北土城路北土城环岛	主干道	E:116°23.216'; N:39°58.557'
DL15	护国寺街	次干道	E:116°22.375'; N:39°56.037'
DL16	百万庄大街中里	次干道	E:116°19.973'; N:39°55.578'
DL17	中关村南路至科学院南路	次干道	E:116°19.165'; N:39°58.782'
DL18	永定门外民主北街	次干道	E:116°23.787'; N:39°52.001'

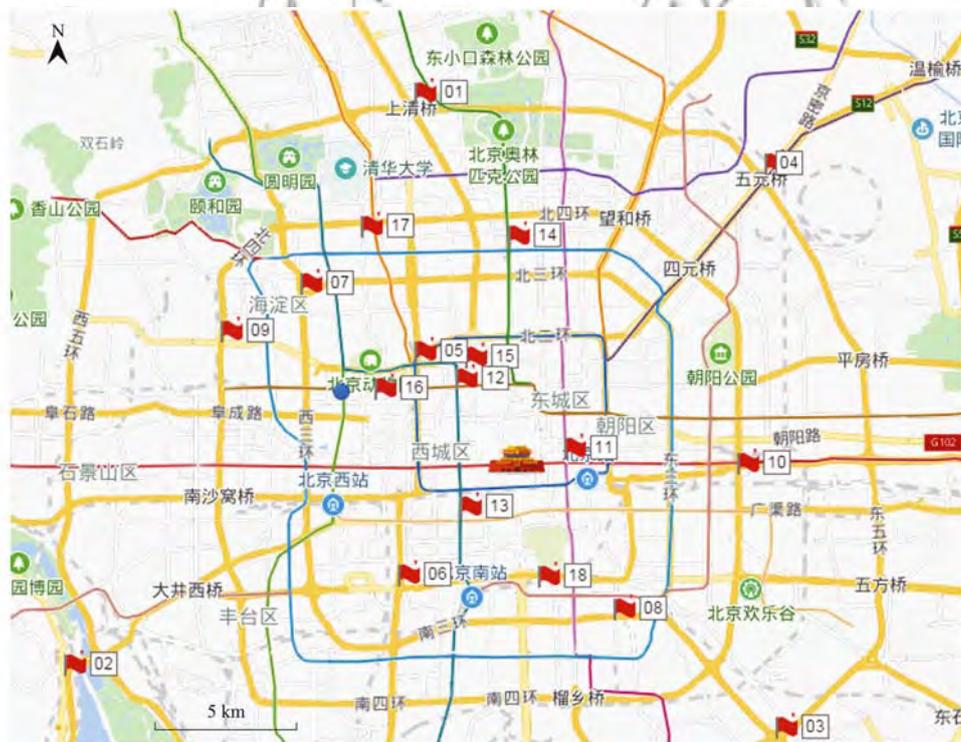


图 1 北京市道路扬尘采样点分布示意

Fig. 1 Map showing the distribution of road dust sampling points in Beijing

径 $\leq 150 \mu\text{m}$ 的道路扬尘样品,经由再悬浮采样系统将颗粒物再悬浮,使其通过 $\text{PM}_{10}$ 或 $\text{PM}_{2.5}$ 切割器进行分级采样,将样品采集到已恒重的滤膜上.根据采样前、后滤膜的增重即为道路扬尘 $\text{PM}_{10}$ 或 $\text{PM}_{2.5}$ 样品的重量.本研究采用南开大学研制的NK-ZXF型再悬浮8通道分级采样系统进行采样,2004年获得道路扬尘 $\text{PM}_{10}$ 和 $\text{PM}_{2.5}$ 样品各4个,其中各

包含Teflon滤膜样品和石英滤膜样品各2个;2013年获得8个 $\text{PM}_{2.5}$ 样品,Teflon滤膜样品和石英滤膜样品各4个.

采样所用滤膜均为47 mm的进口Whatman滤膜.采样前,用于无机分析的空白Teflon滤膜在烘箱中 $60^\circ\text{C}$ 烘2 h;用于有机分析的空白石英滤膜在马弗炉中 $550^\circ\text{C}$ 烘5.5 h,以去除滤膜中杂质和挥发

分对称重和分析结果的影响. 采样前后滤膜置于温度为 $(25 \pm 1)^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $(50 \pm 5)\%$ 的恒温恒湿环境中平衡 24 h, 用瑞士梅特勒公司的 XP205 型十万分之一分析天平称量至恒重.

### 1.3 样品组分分析

水溶性离子组分用美国 Dionex 公司的 Dionex-ICS-2000 和 Dionex-ICS-3000 分别分析水溶性阳离子和阴离子, 包括  $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{NO}_3^-$  等 5 种. Na、Mg、Al、Si、K、Ca、Sc、Ti、V、Cr、Mn、Fe、Co、Ni、Cu、Zn、Cd、Ba、Pb 等 19 种金属元素采用电感耦合等离子体发射光谱法 (ICP-OES), 使用美国热电公司的 Intrepid II -XDL 等离子体发射光谱仪进行分析. 非金属元素砷、硒采用氢化物发生-原子荧光光度法, 使用北京吉天公司的 AFS-9130 型原子荧光光度计进行分析. 有机碳和元素碳采用美国 Sunset Labs 公司生产的 Model 4L 热光学反射法 (thermal/optical re-reflectance, TOR) 仪器进行分析.

### 1.4 分歧系数的计算

分歧系数 (CD) 可以用来从数学上分析所考察两个对象 (样品) 的内在差异性, 本研究用于研究两个城市道路扬尘与同一城市不同粒径成分谱的相似程度. 分歧系数的计算公式如下:

$$\text{CD}_{j,k} = \sqrt{\frac{1}{n} \times \sum_{i=1}^n \left( \frac{C_{i,j} - C_{i,k}}{C_{i,j} + C_{i,k}} \right)^2} \quad (1)$$

式中,  $\text{CD}_{j,k}$  为样品  $j$  和  $k$  之间的分歧系数.  $C_{i,j}$ 、 $C_{i,k}$  分别为样品  $j$  和  $k$  中化学组分  $i$  的平均浓度 (质量分数, %);  $n$  为参与计算的样品中化学组分的数量.

如果两类源成分谱的组成比较相似, 则 CD 值趋近于 0; 如果组成相差很大, 则 CD 值趋近于 1. 本研究参考文献 [19, 27] 的相关结论, 如果分歧系数在 0 ~ 0.2, 说明两个成分谱必定相似; 0.2 ~ 0.5 为可能相似; 0.5 ~ 1.0 为必定不相似.

## 2 结果与讨论

### 2.1 道路扬尘 $\text{PM}_{10}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 化学成分谱特征分析

表 2 所示为北京市道路扬尘 2004 年  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  和 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的成分谱. 从中可看出, 2004 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  中, 质量分数大于 10% 的化学组分从大到小依次为:  $\text{Si} > \text{Ca}$ ; 在 1% ~ 10% 之间的化学组分从大到小依次为:  $\text{OC} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{Mg} > \text{K} > \text{SO}_4^{2-} > \text{EC}$ ; 小于 1% 的化学组分从大到小依次为: Na、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、Ti、Zn、Mn、Ba、Pb、Co、Cu、 $\text{K}^+$ 、Cr、V、Ni、As、Sc、Cd、Se. 而北京市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中, 质量分数大于 10% 的化学组分从大到

小依次为:  $\text{Ca} > \text{Si} > \text{OC}$ ; 在 1% ~ 10% 之间的化学组分从大到小依次为:  $\text{Fe} > \text{Al} > \text{SO}_4^{2-} > \text{K} > \text{Mg} > \text{EC}$ ; 小于 1% 的化学组分从大到小依次为:  $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、Ti、Na、 $\text{K}^+$ 、Zn、Mn、Ba、Cu、V、Pb、Cr、Co、Se、Ni、Cd、As、Sc. 可见, 2004 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组分均是以地壳元素 (Ca、Si、Fe、Al、K、Mg)、OC、EC 及  $\text{SO}_4^{2-}$  为主, 只是相关组分的含量排序略有变化.

从表 2 中还看出, 2013 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中, 未出现质量分数大于 10% 的化学组分; 在 1% ~ 10% 之间的化学组分从大到小依次为:  $\text{Si} > \text{OC} > \text{Ca} > \text{Al} > \text{Fe} > \text{SO}_4^{2-} > \text{Mg} > \text{K}$ ; 小于 1% 的化学组分从大到小依次为: EC、 $\text{Cl}^-$ 、Na、 $\text{NO}_3^-$ 、Ti、 $\text{K}^+$ 、Mn、Ba、Zn、Cu、Cr、Pb、V、 $\text{NH}_4^+$ 、Ni、As、Sc、Cd、Se. 可见, 2013 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组分也以地壳元素 (Ca、Si、Fe、Al、K、Mg)、OC 及  $\text{SO}_4^{2-}$  为主. 与 2004 年道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  的主要化学组分相比, EC 的含量略有下降, 略低于 1%, 不在主要组分之列, 且除  $\text{SO}_4^{2-}$  含量略有上升外, 其他主要化学组分的含量均有显著的下降.

本研究表明, 2004 年和 2013 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  中的主要组分均为 Ca、Si、OC、Al、Fe、K、Mg、 $\text{SO}_4^{2-}$  和 EC. 在这些主要组分中, Ca、Si、Al、Mg 在道路扬尘中的质量分数占全部被测化学组分的 55% 以上, 而 Si、Al 是土壤风沙尘的标识元素 [1, 16, 17], 也是煤烟尘的重要组分 [15, 16], Ca 和 Mg 主要来源于建筑水泥尘 [1, 16, 17, 19, 20], 可见, 北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  均表现出显著的土壤风沙尘和建筑水泥尘的组成特征, 可能受到显著的土壤风沙尘和建筑水泥尘的影响.

另外, 在其他主要组分中, Fe 是钢铁冶炼尘的标识元素 [17, 19], OC、EC 是机动车尾气尘的标识组分 [2, 17], EC 还来源于生物质或化石燃料不完全燃烧 [19], K、OC 是生物质燃烧和垃圾焚烧颗粒物排放的主要组分 [15],  $\text{SO}_4^{2-}$  主要来源于燃煤、生物质燃烧和二次转化 [19, 24]. 可见, 北京市道路扬尘同时可能也受到钢铁冶炼尘、煤烟尘、机动车尾气尘、生物质燃烧和垃圾焚烧等的影响.

### 2.2 道路扬尘 $\text{PM}_{10}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分含量比较

图 2 为北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  的化学组分分类含量比较. 为便于分析, 将成分谱中化学组分分为地壳元素、微量元素、离子、OC 和 EC. 地壳元素包括 Si、K、Ca、Na、Mg、Fe、Al、Ti、Mn, 除地壳元素以外的其他元素统称为微量元素, 离子包括  $\text{K}^+$ 、 $\text{NH}_4^+$ 、 $\text{NO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、 $\text{Cl}^-$ .

表 2 北京市道路扬尘化学成分谱<sup>1)</sup>/%

Table 2 Source profiles of road dust in Beijing/%

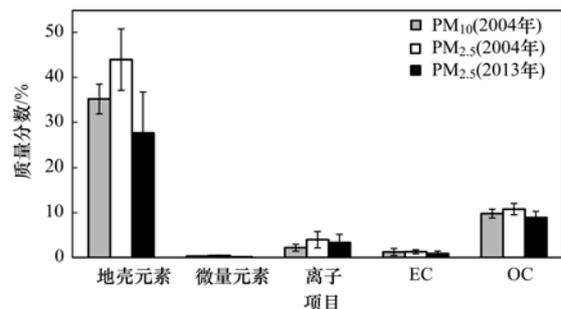
组分	PM <sub>10</sub> (2004 年)		PM <sub>2.5</sub> (2004 年)		PM <sub>2.5</sub> (2013 年)	
	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差	平均值	标准偏差
Na	0.644 0	0.148 7	0.452 8	0.147 2	0.486 0	0.219 7
Mg	2.096 0	0.176 1	1.730 2	0.507 5	1.608 5	0.612 1
Al	5.544 1	0.739 8	5.081 8	1.283 9	4.049 3	1.320 6
Si	10.853 4	1.834 4	13.546 4	3.170 3	9.274 9	3.104 5
K	1.681 3	0.287 9	2.012 0	0.274 0	1.341 9	0.482 6
Ca	10.003 7	1.563 8	14.175 1	2.367 8	7.781 8	2.913 7
Sc	0.000 9	0.000 3	0.000 8	0.001 1	0.000 8	0.000 3
Ti	0.220 7	0.036 0	0.569 5	0.094 8	0.226 7	0.073 6
V	0.009 2	0.002 1	0.030 4	0.004 2	0.009 2	0.002 7
Cr	0.013 2	0.005 2	0.023 5	0.005 5	0.013 3	0.003 9
Mn	0.081 5	0.011 2	0.154 8	0.022 2	0.086 0	0.069 9
Fe	4.065 3	0.400 3	6.219 1	0.478 8	2.763 1	0.993 7
Co	0.016 0	0.006 0	0.019 8	0.006 1	—	—
Ni	0.008 5	0.003 7	0.011 4	0.001 9	0.004 2	0.001 7
Cu	0.015 1	0.005 2	0.033 8	0.006 4	0.016 3	0.007 3
Zn	0.100 3	0.030 4	0.162 6	0.048 6	0.048 8	0.020 9
As	0.001 3	0.000 1	0.001 8	0.000 5	0.001 7	0.001 2
Se	0.000 0	0.000 1	0.018 4	0.009 8	0.000 0	0.000 1
Cd	0.000 4	0.000 5	0.004 7	0.005 0	0.000 4	0.000 2
Ba	0.077 2	0.010 8	0.076 3	0.020 3	0.058 6	0.021 8
Pb	0.050 8	0.058 5	0.028 5	0.068 2	0.011 5	0.005 3
K <sup>+</sup>	0.013 8	0.049 4	0.334 6	0.153 6	0.162 6	0.112 6
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	0.459 3	0.492 8	0.898 0	0.943 9	0.005 0	0.009 3
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.271 3	0.228 2	0.640 1	0.476 4	0.318 4	0.179 7
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	1.444 0	0.622 7	2.105 3	1.127 0	2.147 5	1.485 8
Cl <sup>-</sup>	—	—	—	—	0.714 4	0.322 7
EC	1.243 7	0.765 8	1.274 4	0.445 5	0.891 7	0.531 9
OC	9.798 8	0.972 6	10.775 5	1.268 3	8.889 7	1.254 6

1) “—”表示未检出或未分析

从图 2 可看出, 2004 年北京市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中各类组分含量均高于 PM<sub>10</sub> 中的含量, 其中地壳元素含量最丰富, 2004 年道路扬尘 PM<sub>10</sub> 中质量分数达 35.190 0%, 低于 PM<sub>2.5</sub> 中的 43.941 7% 近 9 个百分点; 其次是 OC, 在 PM<sub>10</sub> 中的质量分数为 9.798 8%, 而 PM<sub>2.5</sub> 中含量为 10.775 5%; 离子在 PM<sub>10</sub> 中的含量为 2.188 5%, 低于 PM<sub>2.5</sub> 中的 3.978 0%; 微量元素和 EC 在 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 中含量均相当, 分别为 0.292 9% 与 0.412 0% 和 1.243 7% 与 1.274 4%。

结合表 2 看出, 总体上, 2004 年北京市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中被测组分的总含量为 60.047 0%, 显著高于 PM<sub>10</sub> 中的 48.700 1%, 含量相差近 12%, 且在 28 种被测化学组分中, 除地壳元素 Na、Mg、Al 和微量元素 Ba、Pb、Sc 在 PM<sub>10</sub> 中的含量比在 PM<sub>2.5</sub> 的含量略高或基本持平外, 其他各组分的含量均表现为: PM<sub>2.5</sub> > PM<sub>10</sub>。本研究表明, 可能由于颗粒物粒径越小, 比表面积越大, 颗粒物吸附相关化学组分

的能力越强, 导致道路扬尘中大部分化学组分在 PM<sub>2.5</sub> 中含量高于在 PM<sub>10</sub> 中的含量。这与石家庄道路扬尘成分谱研究结论基本一致<sup>[24]</sup>。晋城市城市扬尘成分谱除 EC 外, 其他各类组分含量 PM<sub>10</sub> 均低于 PM<sub>2.5</sub><sup>[2]</sup>, 也基本遵循本研究结论。

图 2 北京道路扬尘 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 化学组分分类含量Fig. 2 Chemical composition percentages in the PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> of road dust in Beijing

### 2.3 道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 化学组分年际变化分析

从图 2 可看出, 北京市道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中, 各类

组分含量 2013 年比 2004 年均有明显下降, 其中被测化学组分总含量下降为 40.7497%, 下降了 32.1%; 地壳元素质量分数下降为 27.6182%, 降幅达 37.1%; 微量元素质量分数下降为 0.1648%, 降幅为 59.8%; 离子含量下降为 3.3479%, 降幅为 15.8%; EC 和 OC 含量分别下降为 0.8917% 和 8.8897%, 各自下降了 28.3% 和 9.3%。从表 2 看出, 在  $PM_{2.5}$  中, 被测化学组分除 Na、 $SO_4^{2-}$  的质量分数 2013 年较 2004 年略有上升外, 其他化学组分的含量均呈下降趋势。

### 2.3.1 扬尘控制措施对 $PM_{2.5}$ 化学组分的影响

本研究表明, 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中, 建筑水泥尘标识元素 Ca 的含量由 2004 年的 14.1751% 下降至 7.7818%, 下降了将近一半, 达 45.1%; Mg 的含量略有下降, 下降幅度为 7.0%; 土壤风沙尘标识元素 Si 的含量由 2004 年的 13.5464% 下降至 9.2749%, 下降幅度为 31.5%; Al 的含量由 2004 年的 5.0818% 下降至 4.0493%, 下降幅度为 20.3%。可见, 建筑水泥尘和土壤风沙尘对 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  的影响显著下降, 这可能与近年来北京市实施的严格控制措施有关。

自 1998 年以来, 北京市连续实施了十六阶段控制大气污染措施, 强化了对建设工程施工现场的监督和管理, 施工场界要求建立围挡, 安装视频监控系统; 施工现场主要道路进行硬化处理, 加强施工现场与进出口道路的洒水清扫、冲洗; 工地土方集中存放并采取覆盖或者固化措施; 水泥等建筑材料存放于库房并严密遮盖; 运输建筑渣土的车辆密闭化, 有效减少道路遗撒; 办公区和生活区等裸露地面进行绿化和美化; 扩大城市道路清扫面积, 加大清扫力度; 推进砂石场、废弃矿山等区域的生态修复; 对裸露山体、河滩进行绿化整治, 加强沙化土地治理和湿地建设等, 以有效控制扬尘污染。从而显著降低了土壤风沙尘和建筑水泥尘对北京市大气环境质量的影响。

可能道路扬尘主要受土壤风沙尘影响, 土壤风沙尘 Si 含量显著高于 Ca 含量, 而建筑水泥尘标志元素 Ca 含量显著高于 Si 含量<sup>[1, 15~17, 23]</sup>, 且建筑水泥尘以水泥来源为主, 其颗粒物粒径较细, 故而北京市 2004 年道路扬尘  $PM_{10}$  中  $Si > Ca$ , 而  $PM_{2.5}$  中  $Ca > Si$ ; 但 2013 年道路扬尘受建筑水泥尘影响显著下降, 故其  $PM_{2.5}$  中  $Si > Ca$ 。

### 2.3.2 首钢搬迁对 $PM_{2.5}$ 化学组分的影响

本研究表明, 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中, 钢铁冶炼尘标识元素 Fe 的质量分数由 2004 年的

6.2191% 下降至 2.7631%, 低于北京市 A 层土壤背景元素含量平均值 2.9700%<sup>[28]</sup>, 下降幅度高达 55.6%; Zn 主要来源于钢铁冶炼尘<sup>[19, 26]</sup>, 其质量分数由 2004 年的 0.1626% 下降至 0.0488%, 下降幅度达 70.0%。可见, 钢铁冶炼尘对 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  的影响迅速减少, 这与首钢公司炼钢主业退出北京直接相关。

2005 年 6 月, 首钢历史上第一座大型高炉停产; 2006 年 5 月, 首钢二号焦炉停产; 2008 年首钢压产 400 万 t, 4 号高炉和第三炼钢厂停产; 2010 年年底, 石景山区钢铁主流城全部停产, 首钢在北京的炼钢生产彻底关停。因此, 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中, 钢铁冶炼的影响基本消除。

### 2.3.3 机动车控制措施对 $PM_{2.5}$ 化学组分的影响

由表 2 可知, 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中, 机动车尾气尘的标识组分 OC 和 EC 的质量分数分别由 2004 年的 10.7755% 下降至 8.8897% (下降幅度为 17.5%) 和 1.2744% 下降至 0.8917% (下降幅度为 30.0%)。其他可能来源于机动车尾气尘、轮胎磨损、润滑油损耗、刹车磨损及汽车零部件碰撞损耗等交通排放的重金属 Cu、Zn、Pb、Cr、Cd 等<sup>[19, 26, 29, 30]</sup>, 其在 2013 年道路扬尘  $PM_{2.5}$  中的含量均下降明显, 分别较 2004 年下降了 51.8%、70.0%、59.6%、43.4% 和 91.5%, 且这些重金属元素的质量分数之和由 2004 年的 0.2531% 下降至 0.0903%, 下降了 64.3%。

这与北京市机动车保有量的逐年增长趋势相反, 北京市机动车保有量由 1998 年的 135.8 万辆增加到 2010 年的 484 万辆, 再到 2017 年的 564 万辆, 增长趋势明显。但北京市分别于 2002 年、2005 年、2008 年、2013 年, 率先于全国执行国 II、国 III、国 IV、国 V 新车排放标准和配套的油品标准, 2000 年全面禁止生产、销售和使用含铅汽油; 采取机动车增量调控和加速老旧车淘汰, 截至 2010 年年底, 淘汰 15.6 万辆黄标车, 并于当年对小客车实行限购, 至 2015 年年底, 累计淘汰老旧机动车 183.2 万辆; 实施限行禁行, 约束机动车使用强度; 推广新能源汽车, 减少燃油车辆新增量; 坚持公交优先, 大力发展轨道交通, 提高绿色通勤交通供给能力等。这些政策措施的实施, 显著降低了道路扬尘中与机动车尾气排放和与交通排放相关组分的污染水平。

### 2.3.4 燃烧源控制措施对 $PM_{2.5}$ 化学组分的影响

本研究还表明, 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中, 水溶性离子  $SO_4^{2-}$  的质量分数由 2004 年的 2.1053% 略上升为 2.1475%, 升幅为 2.0%; 而

$\text{NO}_3^-$  的质量分数由 2004 年的 0.640 1% 下降为 0.318 4%, 降幅达 50.3%; 无机元素 K 的质量分数由 2004 年的 2.012 0% 下降为 1.341 9%, 下降幅度达 33.3%.

图 3 所示为北京市近年来大气环境  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  年平均浓度. 从中可知, 1990~1998 年, 北京市区大气环境  $\text{SO}_2$  平均浓度为  $116.8 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 到 2001~2005 年, 北京市区大气环境  $\text{SO}_2$  平均浓度为  $59.4 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 而 2011~2015 年, 北京市区大气环境  $\text{SO}_2$  平均浓度为  $23.6 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 研究发现  $\text{SO}_2$  年平均浓度由 1998 年的  $120 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  快速下降至 2000 年的  $71 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 可能与北京市当年大力推广低硫煤、推进清洁能源改造、推行优质固硫型煤替代平房区与农村地区燃煤散烧有关, 从而显著降低了  $\text{SO}_2$  的排放. 之后再缓慢下降至 2004 年的  $55 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  及 2013 年的  $26.5 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 2003~2007 年基本稳定在  $47\sim 61 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 可能由于北京主要废气脱硫措施于 2005 年基本完成以及 2006 年四大火电厂完成脱硫改造后,  $\text{SO}_2$  年平均浓度 2007~2008 年再次显著下降至 2008~2013 年的  $26.5\sim 36 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ . 大气环境  $\text{SO}_2$  浓度从 2004 年至 2013 年虽然仍有一定下降, 但可能由于京津冀大气环境区域传输与平衡以及区域大气降水作用, 使 2004~2013 年道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{SO}_4^{2-}$  的含量保持于一定水平.

从图 3 还看出, 大气环境  $\text{NO}_2$  年平均浓度 1998~2007 年基本稳定在  $66\sim 77 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之间, 平均  $71.0 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ ; 可能由于 2006~2008 年北京市四大火电厂完成烟气脱硝改造, 以及其他燃煤设施烟气  $\text{NO}_x$  排放标准加严后低氮燃烧与脱硝改造完成, 大气环境  $\text{NO}_2$  年平均浓度在 2007~2008 年有显著下降, 2008~2013 年基本稳定在  $49\sim 57 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$  之

间, 平均  $53.7 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ , 因此 2013 年道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中  $\text{NO}_3^-$  的含量较 2004 年有显著降低.

而无机元素 K 的含量下降可能与北京市禁止农村焚烧秸秆、禁止燃烧散煤和木材, 推广使用清洁能源和优质固硫型煤, 禁止使用劈柴、果木烤鸭等措施的实施有关, 显著减少了生物质的燃烧排放.

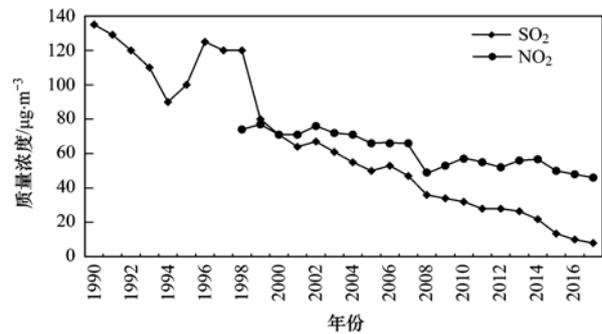


图 3 北京大气环境  $\text{SO}_2$  和  $\text{NO}_2$  年平均浓度

Fig. 3 Annual mean concentrations of  $\text{SO}_2$  and  $\text{NO}_2$  in the atmospheric environment in Beijing

总之, 与北京市近年来采取的各项大气污染防治措施取得的效果直接相关, 2013 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{2.5}$  中化学组分含量较 2004 年下降显著. 相关颗粒物来源解析研究应当依据本地大气污染防治措施情况, 适时地更新道路扬尘成分谱, 以准确解析颗粒物来源及评估相关污染防治措施的效果.

#### 2.4 不同道路类型 $\text{PM}_{10}$ 与 $\text{PM}_{2.5}$ 化学组分差异分析

图 4 所示为北京市不同道路类型  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  化学组分分类比较. 从中可看出, 在不同道路类型中各组分总含量存在一定差异, 2004 年道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  总体表现为: 主干道 > 次干道 > 高速五环进京口 > 环路,  $\text{PM}_{2.5}$  表现为: 主干道 > 次干道 > 环路 >

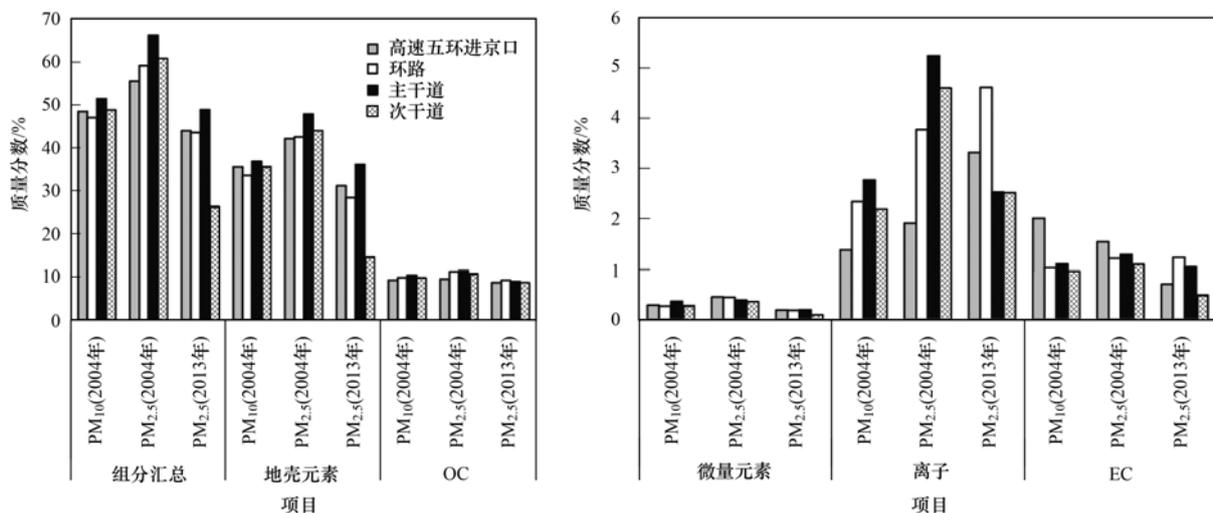


图 4 不同道路类型  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  化学组分分类比较

Fig. 4 Comparison of chemical compositions percentages in  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  from different road types

高速五环进京口,且不同道路类型含量差异较小;而2013年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 表现为:主干道>高速五环进京口>环路>次干道,且次干道含量显著低于其他道路类型.地壳元素含量在道路扬尘中的表现与组分总量的表现基本一致.

图5所示为北京市不同道路类型 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 化学组分比较.从中可见,2004年道路扬尘 $PM_{10}$ 中,土壤风沙尘特征元素Si在各不同道路类型中含量较高,但相差不大,表现为:高速五环进京口>主干道>次干道>环路,主干道与次干道含量接近,而Al的含量表现为:次干道>高速五环进京口>主干道>环路;在 $PM_{2.5}$ 中Si的含量表现为:主干道>高速五环进京口>次干道>环路,Al的含量表现为:主干道>次干道>高速五环进京口>环路.建筑水泥尘标志元素Ca在 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 中含量均表现为:主干道>次干道>环路>高速五环进京口.

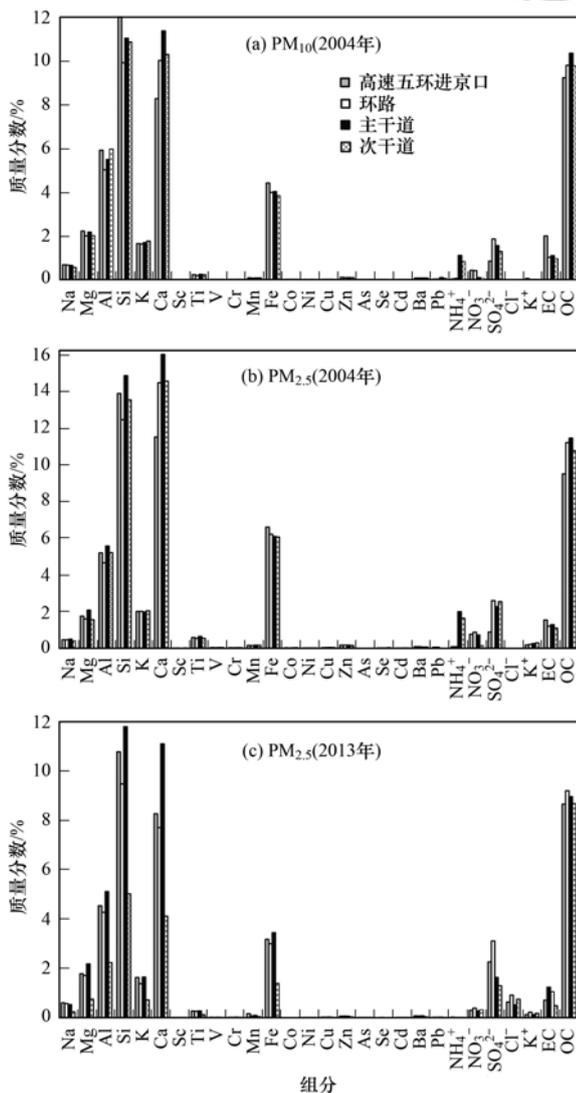


图5 不同道路类型 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 化学组分比较

Fig. 5 Comparison of chemical components percentages in  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  from different road types

结合图4看出,机动车特征组分OC在 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 中含量均表现为:主干道>环路>次干道>高速五环进京口,而EC在 $PM_{10}$ 与 $PM_{2.5}$ 中含量均表现为:高速五环进京口>主干道>环路>次干道.

2004年环路Si、Al的含量显著低于其他道路类型,其受到的土壤风沙尘影响最小;高速五环进京口Ca的含量显著低于其他道路类型,其受到的建筑水泥尘的影响最小.这可能由于高速五环进京口均位于城区外围,而建筑工地大都位于五环内,因此高速五环进京口易受到土壤风沙尘的影响,但受到的建筑水泥尘的影响最小.可能与道路车流量及其车速密切相关,环路车流量较大,车速较快,道路扬尘易受到行驶车辆气流的扰动而被迁移,故而环路受土壤风沙尘影响最小,且受建筑水泥尘的影响小于主干道和次干道.主干道连接高速与环路机动车,车流量大且车速较低,故主干道受建筑水泥尘、土壤风沙尘和汽车尾气尘的影响都较大.但高速可能受到货车运输通行、柴油不充分燃烧的影响,机动车尾气尘特征元素EC表现为高速进京口最高.

从图5中还可看出,2013年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中,Si、Al、Ca含量均表现为:主干道>高速五环进京口>环路>次干道,且次干道含量显著低于其他道路类型,相差近一倍,可见位于城区的次干道受到土壤风沙尘与建筑水泥尘的影响显著降低.可能与提高清扫频次和质量、减少车辆遗撒、城区裸地绿化及主城区建筑工地减少等因素有关.机动车尾气尘特征组分OC、EC含量均表现为:环路>主干道>高速五环进京口>次干道,这可能与城区机动车限行、过境货车绕行六环以及提高油品标准直接相关,虽然机动车总量增加,而OC、EC在道路扬尘中的含量却小幅下降.

## 2.5 道路扬尘无机离子变化特征

$SO_4^{2-}$ 和 $NO_3^-$ 为二次气溶胶粒子的重要组成部分,由前体物 $SO_2$ 、 $NO_x$ 转化形成,一定程度上反映了人类活动对大气环境的影响,很多研究将 $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 比值作为判断固定排放源和移动排放源相对贡献大小的指标<sup>[19, 31]</sup>.

2004年北京市道路扬尘 $PM_{10}$ 中, $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 的比值为 $0.22 \pm 0.20$ ,而 $PM_{2.5}$ 中, $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 的比值较 $PM_{10}$ 高,为 $0.31 \pm 0.24$ ,均小于1.结合表2发现, $SO_4^{2-}$ 和 $NO_3^-$ 在 $PM_{2.5}$ 中含量均高于 $PM_{10}$ ,且 $PM_{2.5}$ 中含量分别是 $PM_{10}$ 中的1.46倍和2.36倍,可见, $NO_3^-$ 在 $PM_{2.5}$ 中更易富集.

2013年道路扬尘 $PM_{2.5}$ 中, $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$ 的比值小于1,为 $0.17 \pm 0.08$ ,比2004年的比值下降

明显. 从表 2 可见, 2004 年和 2013 年  $\text{SO}_4^{2-}$  在  $\text{PM}_{2.5}$  中的质量分数变化不明显, 但  $\text{NO}_3^-$  在  $\text{PM}_{2.5}$  中的质量分数下降了 50%. 但从图 3 可见, 在 1998 ~ 2013 年, 北京市大气环境空气中  $\text{SO}_2$  的年均浓度下降幅度明显大于  $\text{NO}_2$  年均浓度下降幅度. 这与近年来北京市采取的相关控制措施显著减少了燃煤排放; 机动车数量逐年增多, 而通过提高油品质量、淘汰老旧车型、推广新能源机动车、限行限购减少机动车排放有关. 而  $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$  的比值却不升反降, 这可能与控制燃煤排放的同时也大幅消减了  $\text{NO}_x$  的排放有关, 也可能与大气污染物区域传输与平衡及大气降水有关. 可见,  $[\text{NO}_3^-]/[\text{SO}_4^{2-}]$  比值不能准确反映固定源和移动源相对贡献大小的变化.

## 2.6 道路扬尘碳组分变化特征

本研究表明, 北京市道路扬尘  $[\text{OC}]/[\text{EC}]$  的比值, 2004 年  $\text{PM}_{10}$  中为  $9.77 \pm 3.88$ ,  $\text{PM}_{2.5}$  中为  $9.36 \pm 3.25$ ,  $\text{PM}_{10}$  与石家庄市接近 (9.356), 但  $\text{PM}_{2.5}$  高于石家庄市的比值 (6.115)<sup>[24]</sup>, 且北京市  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  中  $[\text{OC}]/[\text{EC}]$  的比值接近; 而 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  中  $[\text{OC}]/[\text{EC}]$  的比值为  $14.41 \pm 10.41$ , 该比值较 2004 年  $\text{PM}_{2.5}$  有较大上升, 高于鞍山市  $\text{PM}_{2.5}$  中的比值 ( $13.20 \pm 6.26$ ) 和盘锦市的比值 ( $3.94 \pm 0.63$ )<sup>[19]</sup>. 有研究认为  $[\text{OC}]/[\text{EC}]$  的比值大于 2 时, 即表明二次有机碳 (SOC) 污染存在<sup>[19, 24, 31]</sup>, 并以下列公式估算 SOC 值<sup>[24]</sup>:

$$[\text{SOC}] = [\text{TC}] - [\text{EC}] \times ([\text{OC}]/[\text{EC}])_{\min} \quad (2)$$

式中,  $[\text{SOC}]$ 、 $[\text{TC}]$ 、 $[\text{EC}]$ 、 $[\text{OC}]$  分别为道路扬尘中 SOC、总有机碳、EC 和 OC 的质量分数, %;  $([\text{OC}]/[\text{EC}])_{\min}$  为样本中  $[\text{OC}]/[\text{EC}]$  的最小值.

经估算, 北京市道路扬尘 2004 年  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOC 的估算值分别为 7.6426% 和 6.6092%, 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  中 SOC 估算值为 4.7587%. 可见北京市道路扬尘中存在二次有机碳污染, 且 SOC 是道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  的重要组成部分.

## 2.7 道路扬尘成分谱相似性分析

分歧系数 (CD) 用于研究两个城市道路扬尘或同一城市道路扬尘不同粒径成分谱的相似程度, 按照公式 (1) 计算道路扬尘的分歧系数. 相关系数用于比较两个城市道路扬尘或同一城市道路扬尘不同粒径成分谱的线性关系; 有研究用相关系数比较风沙尘成分谱<sup>[32]</sup>, 认为相关系数大于 0.9 的两个风沙尘成分谱可以相互代替.

图 6 为北京市道路扬尘 2004 年  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  和 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的相似性与相关性比较. 结果表明, 2004 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  的分歧系数为 0.3480, 相关系数  $R^2$  为 0.9751; 2004 年  $\text{PM}_{10}$  与 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的分歧系数为 0.3371, 相关系数  $R^2$  为 0.9863; 2004 年  $\text{PM}_{2.5}$  与 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的分歧系数为 0.4292, 相关系数  $R^2$  为 0.9529. 可见, 北京市道路扬尘 2004 年  $\text{PM}_{10}$  与  $\text{PM}_{2.5}$  和 2013 年  $\text{PM}_{2.5}$  的分歧系数均介于 0.2 ~ 0.5, 相关系数均大于 0.97, 故其源成分谱可能相似, 且线性关系良好. 因此同一城市应建立不同粒径的道路扬尘成分谱并适时更新.

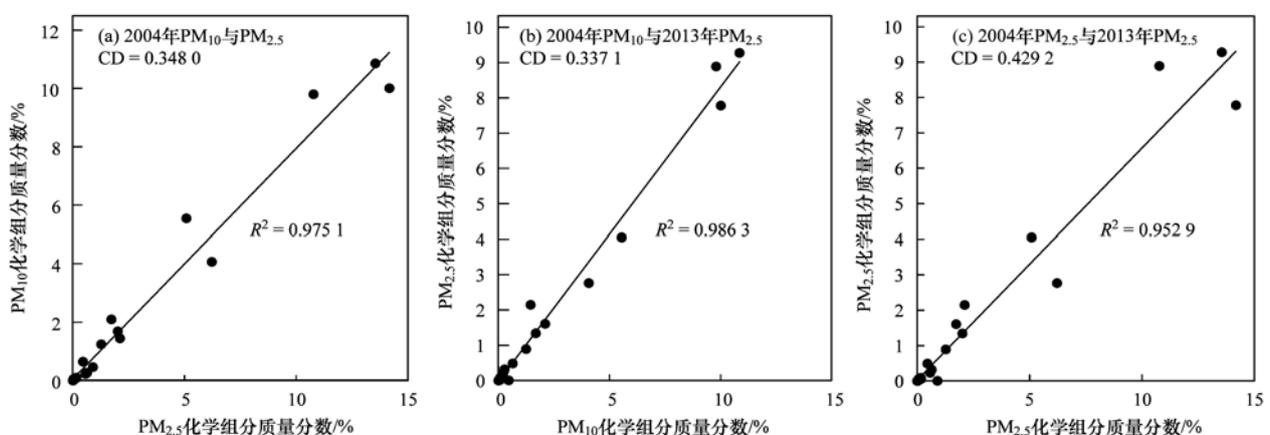


图 6 北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  成分谱相似性与相关性分析

Fig. 6 Similarity and correlation analysis between the  $\text{PM}_{10}$  and  $\text{PM}_{2.5}$  source profiles of road dust in Beijing

表 3 所示为北京市与国内其他 5 个城市 (石家庄<sup>[24]</sup>、运城<sup>[23]</sup>、晋城<sup>[2]</sup>、鞍山<sup>[19]</sup>、上海<sup>[19]</sup>) 道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  或  $\text{PM}_{2.5}$  源成分谱的分歧系数和相关系数. 从中可知, 2004 年北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  成分谱

与石家庄  $\text{PM}_{10}$  的分歧系数为 0.4557, 相关系数  $R^2$  为 0.6961, 而与运城市  $\text{PM}_{10}$  的分歧系数为 0.5457, 相关系数  $R^2$  为 0.2815, 说明北京市道路扬尘  $\text{PM}_{10}$  源成分谱与石家庄市可能相似, 与运城市必定不相

似,且与两城市  $PM_{10}$  的相关系数均低于 0.9. 本研究表明,2004 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  源成分谱与石家庄、晋城、鞍山可能相似,与上海必定不相似;2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  源成分谱与石家庄、晋城、鞍山、上海可能相似. 2004 年与 2013 年北京

市道路扬尘  $PM_{2.5}$  源成分谱除与晋城市的相关系数大于 0.9 外,与石家庄、鞍山、上海的相关系数均低于 0.9. 可见,不同城市之间道路扬尘源成分谱相似度不高,有关城市颗粒物来源解析时应建立本地化的道路扬尘源成分谱.

表 3 北京市与国内部分城市道路扬尘  $PM_{10}$ 、 $PM_{2.5}$  成分谱的分歧系数和相关系数<sup>1)</sup>

Table 3 CD and correlation coefficients of the  $PM_{10}$  and  $PM_{2.5}$  source profiles of road dust in Beijing and selected other cities

项目	石家庄 $PM_{10}$		运城市 $PM_{10}$		石家庄 $PM_{2.5}$		晋城市 $PM_{2.5}$		鞍山市 $PM_{2.5}$		上海市 $PM_{2.5}$	
	CD	$R^2$	CD	$R^2$	CD	$R^2$	CD	$R^2$	CD	$R^2$	CD	$R^2$
$PM_{10}$ (2004 年)	0.455 7	0.696 1	0.545 7	0.281 5	—	—	—	—	—	—	—	—
$PM_{2.5}$ (2004 年)	—	—	—	—	0.455 3	0.666 3	0.443 2	0.825 6	0.363 2	0.700 7	0.592 1	0.767 8
$PM_{2.5}$ (2013 年)	—	—	—	—	0.450 8	0.555 8	0.406 3	0.929 0	0.451 0	0.860 6	0.405 1	0.571 9

1) “—”表示未分析

### 3 结论

(1)北京市道路扬尘  $PM_{10}$  与  $PM_{2.5}$  源成分谱中的主要组分均为 Ca、Si、OC、Al、Fe、K、Mg、 $SO_4^{2-}$  和 EC, 其中 6 种地壳元素 Ca、Si、Al、Mg、Fe、K 在道路扬尘中的质量分数占全部被测化学组分的比例分别为:2004 年  $PM_{10}$  为 70.3%、2004 年  $PM_{2.5}$  为 70.8% 和 2013 年  $PM_{2.5}$  为 65.6%. 北京市道路扬尘主要受土壤风沙、建筑水泥、钢铁冶炼、燃煤排放、机动车尾气、生物质燃烧和垃圾焚烧等的影响,但 2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中,钢铁冶炼的影响基本消除.

(2)2004 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中被测组分的总含量为 60.0470%, 显著高于  $PM_{10}$  中的 48.7001%, 相关组分的含量总体表现为:  $PM_{2.5} > PM_{10}$ .

(3)2004 年北京市道路扬尘被测组分总量总体表现为:主干道 > 次干道 > 高速五环进京口 > 环路; 土壤风沙尘对环路的影响显著低于其他道路类型; 建筑水泥尘对主干道影响最大,对高速五环进京口影响最小; EC 在高速五环进京口的含量显著高于其他道路类型. 2013 年  $PM_{2.5}$  中次干道被测组分总量及 Si、Al、Ca 含量均表现为:主干道 > 高速五环进京口 > 环路 > 次干道,且次干道含量显著低于其他道路类型.

(4)2013 年北京市道路扬尘  $PM_{2.5}$  中,被测化学组分总含量、地壳元素、微量元素、EC 和 OC 较 2004 年下降明显,降幅分别为 32.1%、37.1%、59.8%、28.3% 和 17.5%; 化学组分 Ca、Si、Fe、Zn、 $NO_3^-$  的含量分别下降了 45.1%、31.5%、55.6%、70.0% 和 50.3%, 而  $SO_4^{2-}$  略升了 2.0%.

(5)北京市道路扬尘  $[OC]/[EC]$  比值,2004 年  $PM_{10}$  为  $9.77 \pm 3.88$ ,  $PM_{2.5}$  为  $9.36 \pm 3.25$ , 2013

年  $PM_{2.5}$  为  $14.41 \pm 10.41$ . SOC 是道路扬尘  $PM_{10}$  与  $PM_{2.5}$  的重要组成部分,但  $[NO_3^-]/[SO_4^{2-}]$  比值不能准确反映固定源和移动源相对贡献大小的变化. 不同城市道路扬尘和同一城市不同粒径道路扬尘成分谱相似度均不高.

#### 参考文献:

- [1] 彭杏,丁净,史国良,等. 呼和浩特市源成分谱特征研究[J]. 环境污染与防治, 2016, **38**(9): 57-61.  
Peng X, Ding J, Shi G L, et al. Study on the characteristics of source profiles in Hohhot [J]. Environmental Pollution and Control, 2016, **38**(9): 57-61.
- [2] 王燕,彭林,李丽娟,等. 晋城城市扬尘化学组成特征及来源解析[J]. 环境科学, 2016, **37**(1): 82-87.  
Wang Y, Peng L, Li L J, et al. Chemical compositions and sources apportionment of re-suspended dust in Jincheng [J]. Environmental Science, 2016, **37**(1): 82-87.
- [3] Cao J J, Shen Z X, Chow J C, et al. Winter and summer  $PM_{2.5}$  chemical compositions in fourteen Chinese cities [J]. Journal of the Air & Waste Management Association, 2012, **62**(10): 1214-1226.
- [4] 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.
- [5] Lelieveld J, Evans J S, Fnais M, et al. The contribution of outdoor air pollution sources to premature mortality on a global scale [J]. Nature, 2015, **525**(7569): 367-371.
- [6] Li M H, Fan L C, Mao B, et al. Short-term exposure to ambient fine particulate matter increases hospitalizations and mortality in COPD: a systematic review and meta-analysis [J]. Chest, 2016, **149**(2): 447-458.
- [7] Shen G F, Xue M, Yuan S Y, et al. Chemical compositions and reconstructed light extinction coefficients of particulate matter in a mega-city in the western Yangtze River Delta, China [J]. Atmospheric Environment, 2014, **83**: 14-20.
- [8] 冯静,董君,李大伟. 青岛市区春夏季大气能见度与颗粒物的关系[J]. 环境监测管理与技术, 2013, **25**(1): 18-21.  
Feng J, Dong J, Li D W. The relationship between atmospheric visibility and particulate matter in spring and summer in Qingdao urban area [J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2013, **25**(1): 18-21.
- [9] Watson J G. Visibility: science and regulation [J]. Journal of

- the Air & Waste Management Association, 2002, **52**(6): 628-713.
- [10] Jacob D J, Winner D A. Effect of climate change on air quality [J]. *Atmospheric Environment*, 2009, **43**(1): 51-63.
- [11] 赵静琦, 姬亚芹, 张蕾, 等. 基于样方法的天津市春季道路扬尘 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(5): 1994-1999.  
Zhao J Q, Ji Y Q, Zhang L, *et al.* Characteristics and source apportionment of water-soluble inorganic ions in road dust PM<sub>2.5</sub> during spring in Tianjin using the quadrat sampling method[J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(5): 1994-1999.
- [12] 朱先磊, 张远航, 曾立民, 等. 北京市大气细颗粒物 PM<sub>2.5</sub> 的来源研究[J]. *环境科学研究*, 2005, **18**(5): 1-5.  
Zhu X L, Zhang Y H, Zeng L M, *et al.* Source identification of ambient PM<sub>2.5</sub> in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2005, **18**(5): 1-5.
- [13] Tsai J, Owega S, Evans G, *et al.* Chemical composition and source apportionment of Toronto summertime urban fine aerosol (PM<sub>2.5</sub>) [J]. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 2004, **259**(1): 193-197.
- [14] Chow J C, Watson J G, Kuhns H, *et al.* Source profiles for industrial, mobile, and area sources in the Big Bend Regional Aerosol Visibility and Observational study [J]. *Chemosphere*, 2004, **54**(2): 185-208.
- [15] 马召辉, 梁云平, 张健, 等. 北京市典型排放源 PM<sub>2.5</sub> 成分谱研究[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(12): 4043-4052.  
Ma Z H, Liang Y P, Zhang J, *et al.* PM<sub>2.5</sub> profiles of typical sources in Beijing [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(12): 4043-4052.
- [16] 华蕾, 郭婧, 徐子优, 等. 北京市主要 PM<sub>10</sub> 排放源成分谱分析[J]. *中国环境监测*, 2006, **22**(6): 64-71.  
Hua L, Guo J, Xu Z Y, *et al.* Analysis of PM<sub>10</sub> source profiles in Beijing [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2006, **22**(6): 64-71.
- [17] 王珍, 郭军, 陈卓. 贵阳市 PM<sub>2.5</sub> 主要污染源成分谱分析[J]. *安全与环境学报*, 2016, **16**(2): 346-351.  
Wang Z, Guo J, Chen Z. Analysis of the source componential spectrum of PM<sub>2.5</sub> emission in Guiyang [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2016, **16**(2): 346-351.
- [18] Chen P L, Wang T J, Hu X, *et al.* Chemical mass balance source apportionment of size-fractionated particulate matter in Nanjing, China [J]. *Aerosol and Air Quality Research*, 2015, **15**(5): 1855-1867.
- [19] 张伟, 姬亚芹, 张军, 等. 辽宁省典型城市道路尘 PM<sub>2.5</sub> 成分谱研究[J]. *中国环境科学*, 2018, **38**(2): 412-417.  
Zhang W, Ji Y Q, Zhang J, *et al.* Study on the road dust source profile of PM<sub>2.5</sub> in Liaoning Province typical cities [J]. *China Environmental Science*, 2018, **38**(2): 412-417.
- [20] 李风华, 吴琳, 张静, 等. 典型道路路边空气颗粒物及无机元素特征分析[J]. *中国环境科学*, 2017, **37**(7): 2460-2469.
- Li F H, Wu L, Zhang J, *et al.* Characteristic analysis of inorganic elements in PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> at urban roadside environment [J]. *China Environmental Science*, 2017, **37**(7): 2460-2469.
- [21] Zhao P S, Dong F, He D, *et al.* Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM<sub>2.5</sub> in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, **13**(9): 4631-4644.
- [22] Sutherland R A, Tolosa C A. Multi-element analysis of road-deposited sediment in an urban drainage basin, Honolulu, Hawaii [J]. *Environmental Pollution*, 2000, **110**(3): 483-495.
- [23] 武媛媛, 李如梅, 彭林, 等. 运城市道路扬尘化学组成特征及来源分析[J]. *环境科学*, 2017, **38**(5): 1799-1806.  
Wu Y Y, Li R M, Peng L, *et al.* Chemical compositions and source apportionment of road dust in Yuncheng [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(5): 1799-1806.
- [24] 康苏花, 李海峰, 赵鑫, 等. 石家庄市开放源颗粒物化学组成特征分析[J]. *科学技术与工程*, 2015, **15**(13): 221-225.  
Kang S H, Li H F, Zhao X, *et al.* Analysis of characteristics and chemical composition of open source particulate matter in Shijiazhuang city [J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, **15**(13): 221-225.
- [25] Pant P, Baker S J, Shukla A, *et al.* The PM<sub>10</sub> fraction of road dust in the UK and India: characterization, source profiles and oxidative potential [J]. *Science of the Total Environment*, 2015, **530-531**: 445-452.
- [26] Han S, Youn J S, Jung Y W. Characterization of PM<sub>10</sub> and PM<sub>2.5</sub> source profiles for resuspended road dust collected using mobile sampling methodology [J]. *Atmospheric Environment*, 2011, **45**(20): 3343-3351.
- [27] 姬亚芹. 城市空气颗粒物源解析土壤风沙尘成分谱研究 [D]. 天津: 南开大学, 2006.
- [28] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 330-493.
- [29] 石栋奇, 卢新卫. 西安城区路面细颗粒灰尘重金属污染水平及来源分析[J]. *环境科学*, 2018, **39**(7): 3126-3133.  
Shi D Q, Lu X W. Contamination levels and source analysis of heavy metals in the finer particles of urban road dust from Xi'an, China [J]. *Environmental Science*, 2018, **39**(7): 3126-3133.
- [30] 段海静, 蔡晓强, 阮心玲, 等. 开封市公园地表灰尘重金属污染及健康风险[J]. *环境科学*, 2015, **36**(8): 2972-2980.  
Duan H J, Cai X Q, Ruan X L, *et al.* Assessment of heavy metal pollution and its health risk of surface dusts from parks of Kaifeng, China [J]. *Environmental Science*, 2015, **36**(8): 2972-2980.
- [31] 曹军骥. PM<sub>2.5</sub> 与环境 [M]. 北京: 科学出版社, 2014. 256-306.
- [32] 天津市环境保护局. 城市生态系统与污染综合防治 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1988. 425-436.

## CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area .....	YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, <i>et al.</i> (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in PM <sub>2.5</sub> in Xi'an .....	MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, <i>et al.</i> (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of PM <sub>2.5</sub> During Winter in Taiyuan .....	LIU Su, MA Tong, YANG Yan, <i>et al.</i> (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou .....	YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, <i>et al.</i> (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric PM <sub>2.5</sub> in a Suburb of Zhuhai City .....	YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, <i>et al.</i> (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean .....	JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, <i>et al.</i> (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on PM <sub>2.5</sub> in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism .....	GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, <i>et al.</i> (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei .....	SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, <i>et al.</i> (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 .....	ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, <i>et al.</i> (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region .....	QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, <i>et al.</i> (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province .....	ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, <i>et al.</i> (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions .....	GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, <i>et al.</i> (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station .....	ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, <i>et al.</i> (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing .....	HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, <i>et al.</i> (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the PM <sub>2.5</sub> Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City .....	YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, <i>et al.</i> (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization .....	FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, <i>et al.</i> (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators .....	MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, <i>et al.</i> (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days .....	YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, <i>et al.</i> (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days .....	ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting .....	SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, <i>et al.</i> (1697)
Analysis of PHEV CO <sub>2</sub> Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities .....	HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, <i>et al.</i> (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing .....	DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yun-zhu, <i>et al.</i> (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay .....	LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay .....	PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, <i>et al.</i> (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring .....	MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, <i>et al.</i> (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis .....	LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, <i>et al.</i> (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin .....	XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, <i>et al.</i> (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model .....	ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, <i>et al.</i> (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs .....	CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, <i>et al.</i> (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn .....	HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, <i>et al.</i> (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers .....	WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, <i>et al.</i> (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis .....	LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, <i>et al.</i> (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water .....	SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, <i>et al.</i> (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(VI) in Aqueous Solution .....	YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake .....	GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, <i>et al.</i> (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide .....	XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, <i>et al.</i> (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals .....	CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, <i>et al.</i> (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles .....	LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, <i>et al.</i> (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater .....	HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor .....	MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, <i>et al.</i> (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test .....	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System .....	LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, <i>et al.</i> (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System .....	ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, <i>et al.</i> (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas putida</i> YH and Its Kinetic Characteristics .....	WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, <i>et al.</i> (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process .....	WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, <i>et al.</i> (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions .....	WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, <i>et al.</i> (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature .....	YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, <i>et al.</i> (1914)
Contents and Forms of Phosphorus in the Municipal Sewage Sludge of China .....	WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, <i>et al.</i> (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perfluorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou .....	WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, <i>et al.</i> (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N <sub>2</sub> O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River .....	TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, <i>et al.</i> (1939)
CH <sub>4</sub> Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia .....	YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, <i>et al.</i> (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application .....	WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, <i>et al.</i> (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China .....	XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, <i>et al.</i> (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region .....	QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, <i>et al.</i> (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land .....	KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, <i>et al.</i> (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry .....	WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, <i>et al.</i> (1990)