

文章编号: 1671-6612 (2019) 02-211-09

PM2.5 的研究进展

任金苗¹ 张仙平¹ 段焕林¹ 陈爱东¹ 王迎辉¹ 李辉²

(1. 河南工程学院土木工程学院 郑州 451191;

2. 科宇智能环境技术服务有限公司 郑州 450000)

【摘要】 随着我国工业化和城镇化的迅速发展, 能源消耗量大, 随之带来了严重的环境污染问题。城市气候要素改变, 导致空气严重恶化, PM2.5 的污染更为严重, 雾霾天气频发, 对大气环境及人体健康造成严重不良影响。主要从 PM2.5 的检测方法、化学成分分析、来源解析、防治方法与治理措施等方面进行综述, 并针对研究现状, 分析了目前 PM2.5 研究存在的主要问题, 指出了未来的研究方向。

【关键词】 PM2.5 监测; 源解析; 成分分析; 治理措施

中图分类号 X-1/X513 文献标识码 A

Review of PM2.5 in China

Ren Jinmiao¹ Zhang Xianping¹ Duan Huanlin¹ Chen Aidong¹ Wang Yinghui¹ Li Hui²

(1.College of Civil Engineering, Henan University of Engineering, Zhengzhou, 451191;

2.Keyu Intelligent Environment Technology Service Co., Ltd, Zhengzhou,450000)

【Abstract】 With the rapid development of industrialization and urbanization in China, the energy consumption is large, and it brings serious environmental pollution problems. The change of urban climate factors leads to severe air deterioration, more serious pollution of PM2.5, frequent fog and haze, and serious adverse effects upon the atmosphere and human health. In this paper, the detection methods of PM2.5, chemical composition analysis, source analysis, prevention and control methods and management measures were mainly reviewed, and the main problems existing in PM2.5 research at present were analyzed, and then the future research directions were pointed out.

【Keywords】 PM2.5 monitoring; source resolution; component analysis; controlling measures

0 引言

雾霾天气的恶化给人们的生产生活带来了诸多负面影响, PM2.5 带来的环境问题日益凸显, 人们对空气颗粒物的关注越来越多, 在这样的背景下, 学者们对 PM2.5 的相关研究日益深入。PM2.5 是指空气中动力直径 $\leq 2.5\mu\text{m}$ 的颗粒物, 能够进入人体的肺部, 也可称之为可吸入肺颗粒物, 严重影响人体及其他生物体的健康; PM2.5 的粒径比 PM10 小, 相对表面积

却比它大, 更容易吸附结合空气中有毒有害的重金属元素、酸性氧化物和细菌病毒等。

PM2.5 的形成过程和形成机理相当复杂, 且我国关于 PM2.5 的研究工作起步较晚, 因此监测资料尚不够完善, 目前多呈现区域性和局部性的特点, 且大多为探索性研究, 与欧美等发达国家的差距较大。近年来, PM2.5 的监测手段持续取得进展, 观测 PM2.5 污染特征的手段和方法也越来越多, 研究 PM2.5 的

基金项目: 河南工程学院建筑环境与能源应用工程专业综合改革试点项目 (No. 508608)

作者简介: 任金苗 (1996.06-), 女, 在读本科生, E-mail: 1429033490@qq.com

通讯作者: 张仙平 (1973.05-), 女, 博士研究生, 教授, E-mail: zh2000ao@sohu.com

收稿日期: 2018-05-10

检测方法、化学成分和来源解析等方面内容,为更好地探究 PM_{2.5} 的产生机理和采取防范其产生的措施及其沉降和消解的治理措施提供了理论依据,对促进和改善大气环境污染的现状具有深远意义。

1 PM_{2.5} 监测方法研究进展

获取精准的监测数据对 PM_{2.5} 的相关研究非常重要,所以研究中采用的监测设备和方法的精准性就显得尤为重要。我国最初的环境监测网络为手工监测,起始于 20 世纪 80 年代,直到 2000 年开始被自动检测逐步取代^[1]。PM_{2.5} 监测首先需进行微粒分级,陈梅芹等^[2]对微粒分级技术做了研究,基于微粒分级,目前国内外 PM_{2.5} 监测采用的方法主要有重量法、微量振荡天平法 (TEOM)、β 射线法 (BAM)。胥全敏等^[3]通过长期对环境空气质量自动监测站运行和维护进行研究分析,发现在用 β 射线法原理监测 PM_{2.5} 质量浓度时,影响 PM_{2.5} 监测精度准确性的主要因素有采样流量、采样管道、纸带走纸精确度和相对湿度等。PM_{2.5} 在线监测仪器都是长期全天运行,很容易污损、老化等,从而影响监测数据的精准度,出现误差甚至“倒挂”现象。因此,有必要定期通过权威机构对 PM_{2.5} 和其他颗粒物监测仪器的采样流量进行校准和测量。而针对测量中发生的倒挂现象,潘本锋等^[4]研究了 PM_{2.5} 与 PM₁₀ 监测中经常出现的“倒挂”现象,通过对常见监测方法 β 射线法(采样管恒温加热)和振荡天平法组合下“倒挂”现象和其他监测方法组合下“倒挂”现象的分析以及不同季节、不同颗粒物浓度下的“倒挂”现象分析,发现测量误差、监测仪器和 PM₁₀ 与 PM_{2.5} 监测方法不同都会导致“倒挂”,并且发现不同样品中的温度和湿度的不同监测方法的修正原理的修正程度,和不同的挥发性化合物的补偿度都会形成监测结果的差异。所以研究者建议在监测时尽量选择同样原理的设备,根据具体情况选择监测方法的组合从而避免“倒挂”现象的发生。

随着近年来卫星、遥感技术的飞速发展,通过气溶胶光学厚度等原理间接反演的遥感监测也渐渐成为 PM_{2.5} 监测中比较先进的监测方法,研究者们针对此方法做了大量的研究工作。李倩^[5]对北京大气 PM_{2.5} 的遥感监测业务化进行了研究探讨,通过对反演结果的地面验证、对比月均差异、区域分布和对个例的分析应用,发现气溶胶干消光系数

法 ($K_{\text{dry},0}$)、气溶胶光学厚度法 (AOD) 和气溶胶表面反照率法 (R_a) 三种方法都具有较高的反演精度,说明卫星数据和地面实时数据的结合可以更好地监测 PM_{2.5} 的浓度,对比其他两种方法 R_a 法更加简便易行,用 R_a 法反演则春、冬、秋的相关系数都大于 0.7,因此研究者提出建议春、冬、秋使用 R_a 法,夏季使用其他两种方法进行 PM_{2.5} 浓度的反演。利用 PM_{2.5} 粒子的消光特性,借助卫星遥感资料反演气溶胶光学厚度间接获得近地面 PM_{2.5} 质量浓度,是监测区域 PM_{2.5} 浓度和空气质量的一种行之有效的方法;郭阳洁^[6]应用 AOD 方法结合站点复合模型 (CM) 对中国陆地大气 PM_{2.5} 浓度估算进行了研究,发现用 CM 模型进行研究时,各季节的区域 CM 模型均能有效提高拟合精度,证明了该模型的较高精度水平和分区结果的合理性。马品^[7]对数值模拟技术 (CFD) 微环境中的 PM_{2.5} 遥感监测进行了研究,发现低建筑群比高建筑群 PM_{2.5} 浓度分布差异的变化随风速变化小,然而在建筑群内,随着风速增加,PM_{2.5} 浓度却减小,浓度分布差异性反而增大。陈辉等^[8]研究了 MODIS 资料监测的方法,对结果进行了 AOD 验证分析、直接相关分析和湿度订正分析,研究发现采用深蓝算法产品反演的 AOD 效果比较理想,能更广泛地反演气溶胶光学厚度,可以作为京津冀等地冬季近地表细颗粒物浓度的有效参考数据。

综上,PM_{2.5} 监测最常用的方法有微量振荡天平法、称重法和 β 射线法,也是为国内外研究者们所认同的监测方法,但存在监测程序繁琐、无法实时检测、监测精度较低等不足之处,现有文献多有提到监测中提高监测精准度以减少误差的方法或措施。近年来不断发展的遥感反演的估算监测技术文献较多,该方法应用了先进的技术和原理,减少了对气象数据的依赖和间接测量方法中的误差,但尚存在多地区综合性分析研究欠缺和建模量小的缺点,有待后续研究者不断检验和完善。

2 PM_{2.5} 化学成分分析研究进展

PM_{2.5} 的化学成分比较复杂,其复杂性也取决于其污染来源的复杂性,分析 PM_{2.5} 的化学成分特征对研究 PM_{2.5} 对大气能见度的影响和 PM_{2.5} 的来源起着至关重要的作用,也是其消解沉降等研究的理论前提。郑玫等^[9]对上海市的典型工业污染

源进行了PM_{2.5}的源谱测定,样品采集分析后对上海4种工业源的源谱特征进行了研究,并与国内外的一些其他工业源对比,发现电炉厂和烧结厂的源谱差距比较大,燃煤电厂和混合燃料电厂的PM_{2.5}主要化学组分相似,Ca元素占8.0(±4.7)%,但在混合燃料电厂Ca、Al和Fe排放贡献较大,在电炉厂Zn和Fe的贡献率分别达到10.4(±1.2)%、38.2(±0.6)%,而在燃煤电厂中SO₄²⁻的贡献率达到23.3(±3.7)%,工业工艺的不同是造成其不同源化学成分差异的主要原因。徐亚等^[10]对北京夏季PM_{2.5}和PM₁₀做了研究,发现PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度与采样点的风速、能见度呈负相关,而与其相对湿度正相关。研究者运用了质子荧光分析(PIXE)的分析方法,发现NO₃⁻、SO₄²⁻、NH₄⁺三种可溶性离子质量浓度总和占PM₁₀质量浓度的25.4%,占PM_{2.5}质量浓度的43.5%。陈静^[11]用MARGE离子在线分析仪ADI(高分辨率)研究了石家庄PM_{2.5}的成分谱,发现8种气溶胶水溶性离子的质量浓度与石家庄市PM_{2.5}浓度变化情况相同,SO₄²⁻质量浓度在水溶性离子中所占比例最大,二次离子SO₄²⁻、NH₄⁺、NO₃⁻是石家庄PM_{2.5}的主要组分,占水溶性离子总和的88.4%。马召辉等^[12]对北京的典型性排放源PM_{2.5}做了成分研究,得到了北京主要排放源的PM_{2.5}成分谱,并与国内外其他城市PM_{2.5}的排放源成分谱进行了比较,发现水泥窑污染源PM_{2.5}中OC(7.12%)、Ca(4.81%)和Si(4.41%)这些成分含量较多,在生物质燃烧源所产生的PM_{2.5}中,OC(21.7%)、Ca(6.15%)和Si(6.75%)成分含量较多。玉散·吐拉甫^[13]对极干旱地区沙尘与非沙尘天气PM_{2.5}中金属元素进行了研究分析,发现金属元素在非沙尘期间主要来源为汽车排放、生物质燃烧、化石燃料和扬沙,4种排放源的贡献率分别为23.63%、20.34%、18.39%和37.63%,在沙尘期间4种排放源的贡献率分别为17.66%、10.58%、9.97%和61.78%。

PM_{2.5}中含有大量含碳的烃类化合物,对大气能见度起着重要的影响作用。王群^[14]对郑州市大气中PM_{2.5}中烃类有机物进行了研究,运用了主峰碳、植物蜡含量和碳优指数等特征含量参数对PM_{2.5}大气颗粒物中正构烷烃分布特征进行了分析,研究发现,郑州市大气中PM_{2.5}的浓度有明

显随季节变化的特征,春季和夏季平均浓度分别为272±78、392±203、177±59和89±24μg/m³,表现出夏季<春季<秋季<冬季的特征;PM_{2.5}主要来源于化石燃料如煤炭燃烧和汽车尾气排放。周盼等^[15]研究了石家庄道路降尘PM_{2.5}和PM₁₀中的碳质组分,用热光碳分析仪测得总碳(TC)在PM_{2.5}的成分中占19.2%,其含量在PM₁₀中达13.9%,表明碳质组分更大几率被细粒径的颗粒物所吸附。刘珊等^[16]对太原市PM_{2.5}中碳组分进行了研究,结果表明,太原的碳污染源中土壤属于污染较轻的,冬小麦有机碳(OC)和元素碳(EC)呈现出很强的相关性,在夏季它与OC的相关性比较低。张伟等^[17]对天津市道路降尘中PM_{2.5}和PM₁₀中的碳组分进行了研究,对道路降尘PM_{2.5}和PM₁₀中进行了对比,如图1所示,发现不同道路类型OC/EC不同,可能由不同道路驾驶机动车类型不同所决定,但OC/EC在PM_{2.5}和PM₁₀中的大小关系基本一致;OC质量浓度为10.27%(主路)至13.94%(快速路),EC质量浓度为1.24%(支路)至1.77%(环路),PM₁₀中OC质量浓度为12.56%(快车道),EC质量浓度为1.01%(二级公路)至1.59%(快速轨道)。可见PM_{2.5}中含碳的成分与车流量大或路面保洁状况有关,主要来源于有机生物质燃烧、机动车尾气、道路扬尘以及燃煤源等混合源。

PM_{2.5}中的金属元素若随颗粒物吸入人体则对人体健康危害极大,虎彩娇等^[18]通过富集因子法和潜在生态危害指数法对黄石市大气PM_{2.5}做了相关研究,发现黄石市大气中PM_{2.5}和PM₁₀与工业源和生物质燃烧等人为排放源有很大关系,其主要元素为K、Cd、Pb、Zn、As、Ca、Ni、Cu、Cr和Mn,其中元素K更容易在细颗粒物中富集,Ca和Fe更易富集在粗颗粒物中,Zn和Pb在微量元素中年均浓度最高;黄石市大气细颗粒物PM_{2.5}的金属污染比粗颗粒物PM₁₀更为严重,其中尤其Cd存在很强的潜在生态风险。研究者们发现PM_{2.5}中的水溶性离子跟当地污染气体中的酸性气体有很大关系,从2015年1月到12月,丁梦萌^[19]研究了北京市PM_{2.5}的前体气体和水溶性离子NH₄⁺、NO₃⁻和SO₄²⁻对PM_{2.5}形成的影响,发现铵态氮对PM_{2.5}的贡献率基本维持不变,SO₄²⁻是造成光污染的罪魁祸首,NO₃⁻是重污染累积效应的元凶。

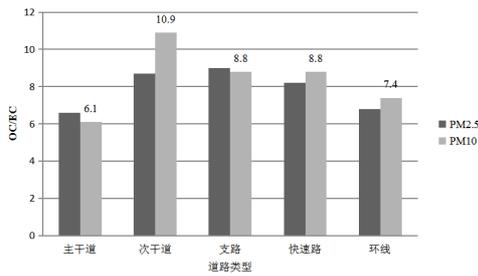


图1 天津市道路降尘PM2.5和PM10中OC/EC对比(2015年)

Fig.1 The OC/EC comparison of PM2.5 and PM10 of road dust in Tianjin (2015)

如前所述, PM2.5 的化学成分极其复杂, 目前相关研究主要集中在含碳的烃类物质、水溶性元素和金属元素, 研究者通过理论分析、实验研究等方法对 PM2.5 的化学成分进行研究, 但由于一定地域各有其污染特点以及污染来源的不同导致不同条件下 PM2.5 化学成分存在差异, 各种化学组分的含量也会随之变化。目前需要更大范围的采集、更长期的监测以开展更为全面深入的研究。

3 PM2.5 来源解析研究进展

大气污染颗粒物尤其是 PM2.5 这样的可入肺颗粒物早已成为国家和研究者们重点关注的问题, 国内外的研究者对城市颗粒物做过很多工作, 虽然我国 PM2.5 相关研究工作起步较晚, 但国内的学者们已经对多地的 PM2.5 污染特征进行了研究, 探究其污染的源头。王振波等^[20]以全国为研究范围针对 PM2.5 浓度的时空变化规律进行了分析研究, 以全国 190 个城市的 945 个监测点为研究对象, 用以微量震荡天平法结合滤膜动态测量系统 (FDMS) 为原理的 Thermo Fisher 1405F 仪器监测 PM2.5 的浓度, 采用空间插值方法结合基于 Moran's I 方法对 PM2.5 浓度空间集聚进行研究, 还在主要城市做了 PM2.5 浓度空间自相关验证。研究发现, 整年的日平均 PM2.5 浓度呈现 U 型趋势, 夏秋高, 春冬低。这些城市的细颗粒物 PM2.5 浓度在时间上呈现出分季节、逐月和日度的变化规律。空间上存在 PM2.5 浓度的季节空间、月度空间和周期性循环的规律。东南沿海空气质量水平稳定, 且比起其他地区更呈现稳定趋势。华北平原、长江三角洲等地却不容乐观, 是 PM2.5 的全年主要聚集地, 而北方城市则更是高浓度 PM2.5 聚集的核心地。

王新^[21]对兰州城区大气 PM2.5 污染采用富集

因子法和组分分析法进行了源解析研究, 发现兰州城区大气 PM2.5 浓度随时空发生明显变化。采暖期内明显高于非采暖期, 兰州市大气的 PM2.5 主要污染源有工业排放源、交通排放/生物质燃料混合源和土壤源特性燃煤烟尘等, 其中固定污染源对兰州市 PM2.5 中水溶性离子的贡献率大于机动车尾气等流动源。李晓^[22]对郑州市大气 PM2.5 中烃类有机物物做了研究, 比较了重污染事件中空气温度 (气温) 和相对湿度与 PM2.5 的相关性, 分别如图 2、图 3 所示, 从图中可以看出 PM2.5 浓度与气温相关性不大, 与相对湿度却有着较强的相关性; 从整体上看, 郑州市大气 PM2.5 中的正构烷烃受机动车尾气和化石燃料燃烧等人为源影响较大。卢慧剑^[23]对典型沿海城市 PM2.5 污染特征及其来源进行了解析研究, 应用了基于化学质量平衡模型 (CMB) 的一次源解析, 利用相似性组的诊断方法, 将 CMB 模型与排放源清单数据结合进行分析, 把原来的一次源与二次源的贡献率依次分配至各个行业, 发现该市 PM2.5 具有酸性的特点, 与大气中酸性物质有关, 夏季的酸性污染较冬季严重, 市区是酸性污染比较严重的区域。李璇等^[24]对北京 PM2.5 的污染做了研究, 采用源排放处理模式 (SMOK) 等方法, 基于嵌套网格以北京为中心区域向周围辐射进行研究, 建立大气污染的模拟系统, 并对目标来源区域进行了划分, 发现 PM2.5 主要来源为北京本地, 贡献率达 34%, 天津贡献率为 4%, 河北的贡献率为 26%, 模拟边界外和京津冀周边贡献率分别为 24%和 12%; 北京 PM2.5 中铵盐等成分主要来自本地的排放, 硝酸盐、硫酸盐等主要来自周边省市。

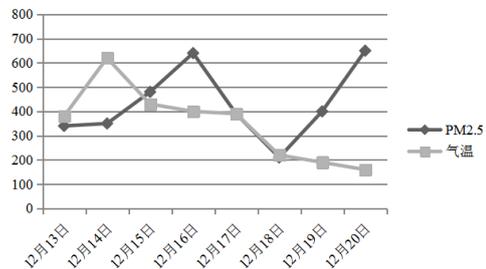


图2 郑州市重污染期间PM2.5浓度与温度的关系(2013年)

Fig.2 The variation of PM2.5 concentration and temperature during heavy pollution period in Zhengzhou (2013)

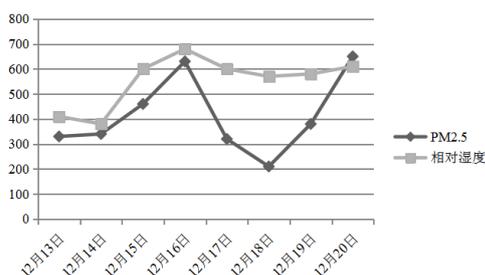


图3 郑州市重污染期间PM2.5浓度与相对湿度的关系 (2013年)

Fig.3 The variation of PM2.5 concentration and relative humidity during heavy pollution period in Zhengzhou (2013)

相比于以上污染特征和污染来源有一定相似度的大城市,学者们做过的研究较多,也有学者对较容易忽视却有其区域性自身条件的城市进行了PM2.5的污染特征和来源解析研究。舒燧^[25]对四川盆地的相对洁净地区的代表雅安城区的PM2.5进行了来源解析研究,作者选择了对城区空气质量影响较大的餐饮源进行研究,分析了其污染状况、化学组成、季节变化规律及来源,研究发现烹饪过程中的食用油、高脂肪原材料、烹饪方式和烹饪温度都能导致餐饮PM2.5的排放差异。通过气团后向轨迹模型、富集因子法、主成分分析法等进行源解析发现雅安地区PM2.5同时受人为源和地壳源的影响,来自西南方向印度的远距离输送污染也是雅安城区PM2.5偏高的主要原因。姜立乾^[26]对南京市大学宿舍内的水溶性离子进行了污染特征的分析 and 来源解析的研究,运用了单因子方差分析、两个独立样本t检验和相关性分析的数据处理方法,研究发现冬季室内外PM2.5的相关性强于夏季,验证了室内PM2.5更多来源于室外的论断;入伏后室内外PM2.5污染程度都比梅雨季大,说明频繁降雨对大气起到了净化作用;冬季室内外PM2.5污染比夏季严重,一种原因是冬季的气象特征不利于PM2.5的扩散,更多则是因为冬季采暖等使PM2.5来源增多。昌晶亮等^[27]发现城市群PM2.5污染存在春节效应,凌晨2:00时PM2.5浓度比非春节期间高47.6%,从很大程度上说明了烟花爆竹对PM2.5浓度上升的贡献。

陈刚等^[28]对合肥的PM2.5污染进行了研究,用正定矩阵因子分解模型(PMF)解析得到如图4所示的结论,解析出的5个因子的贡献率分别为高

等植物排放源22%,秸秆燃烧源10%,燃煤源31%,汽油燃烧源17%和柴油燃烧源20%;利用激光雷达监测结果和向后轨迹信息的区域传输影响方法进行分析,研究发现PM2.5中含碳组分、水溶性离子和金属元素分别占总浓度的24.07%、59.14%和16.79%。郑晓伍等^[29]对石河子市PM2.5中有机碳和元素碳进行了源解析等研究,通过对霾和沙尘天气下OC/EC相关性的分析比较,发现碳质气溶胶受不同地区气象条件、产业与能源结构等因素的影响很大。石河子市OC/EC浓度与其它亚洲地区接近,OC/EC浓度受霾和沙尘天气加重的影响。二次有机碳与元素碳之比(SOC/OC)在非霾非沙尘天气下约为64%,霾和沙尘天气下达到67%,霾和沙尘天气具有较为复杂的污染源,表明石河子市碳质气溶胶主要属于二次有机气溶胶污染。余文洋^[30]对武汉市的典型地区PM2.5中含氧有机物的分布特征进行了分析和来源解析,发现不同生物质燃烧、土壤颗粒物再悬浮、植物释放以及肉类烹饪是三个采样点中含氧有机物的4个重要来源。工业区的来源解析有7种源,其中3个主要来源是生物质燃烧(22.971%)、植物再悬浮(14.187%)和土壤再悬浮(13.385%)。交通区有6个来源,其中3个主要来源是土壤悬浮(26.888%)、生物质燃烧(20.421%)和高等植物释放(14.131%)。植物区只有4种来源,分别是土壤再悬浮(30.339%)、生物质燃烧(19.796%)、植物释放(16.425%)及肉类烹饪(9.887%)。温维^[31]对唐山大气PM2.5污染进行了研究,发现PM2.5存在浓度空间变化,并且颗粒物的长距离传输造成外来源与本地源的叠加污染,外来源也是PM2.5污染的重要产生源之一。

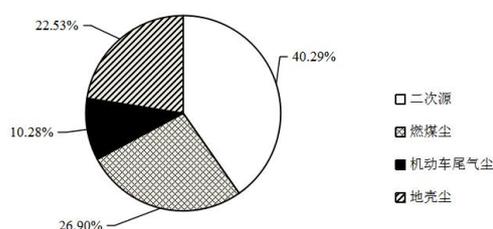


图4 合肥市PM2.5的PMF模型解析结果(2014年)

Fig.4 PMF resultsshowing sources contribution to PM2.5 in Hefei (2014)

表1列出了PM2.5源解析的研究概况,可以看出PM2.5的源解析呈现区域性和季节性的特点,

整改防治时应根据地区污染特点采取适宜的措施；总体来说，各类燃烧源在 PM_{2.5} 来源中贡献率最大。PM_{2.5} 的产生形成机理复杂，研究过程中也需要大量的相关数据基础，导致其源解析的研究工作也相当繁琐，但 PM_{2.5} 的源解析研究对 PM_{2.5} 的防治工作的开展至关重要。目前相关文献多集中在京津冀和长江三角洲、珠江三角洲等地区的大城市，不同区域的城市结构和工业化程度等因素会造成 PM_{2.5} 源解析结果不同，不同研究者采用的分析方法也不同。PM_{2.5} 的源解析方法不断取得进步，这对 PM_{2.5} 源解析的研究起到了极大的促进作用。

4 PM_{2.5} 的防治方法与治理措研究进展

大气污染问题日趋严重，给人们的生产和生活活动造成了很大的困扰，PM_{2.5} 的防控和治理工作迫在眉睫。薛文博等^[32]对 PM_{2.5} 大气环境容量进行了研究，利用全国大气污染物排放清单和第 3 代空气质量模型 WRF-CAMx 结合应运而生的迭代法，对全国 31 个省、市的二氧化硫、氮氧化物、PM_{2.5} 和 NH₃ 的允许排放量进行了模拟计算，得到 333 个地级城市 PM_{2.5} 年均浓度分布频率，如图 5 所示。从图中可以看出，所研究的 333 个城市年均 PM_{2.5} 浓度有两个峰值，达标城市年均 PM_{2.5} 浓度约 30 μg/m³，超标城市年均 PM_{2.5} 浓度约 100 μg/m³；超标率约 70%，环境污染问题严重，因此 PM_{2.5} 防治区域合理划分，区域大气综合管理显得尤为重要。朱梅等^[33]对我国《环境空气质量标准》中室内 PM_{2.5} 的浓度标准进行了研究讨论，分析了我国 PM_{2.5} 的发展进程和现状，为 PM_{2.5} 浓度在室内的控制提出了方向和目标。王成云等^[34]对保定市常见城市绿化树种对 PM_{2.5} 滞纳能力进行了研究，发现阔叶树单位叶面积 PM_{2.5} 截留率、叶面积指数、和单位绿地面积 PM_{2.5} 滞纳量均低于针叶树，针叶树滞纳能力更高。因此因地制宜地选择高滞纳能力的树种将 PM_{2.5} 的治理中起到至关重要的作用。成国庆等^[35]对石家庄 PM_{2.5} 的污染现状进行了研究分析并提出了防控对策，结合石家庄的气象条件、地理条件、机动车保有量及其工业结构等因素综合分析提出了加强公路及运输和建筑工地围挡以减少这些地方产生扬尘的扩散、提高燃油品质、开发高效低排放能源等措施。

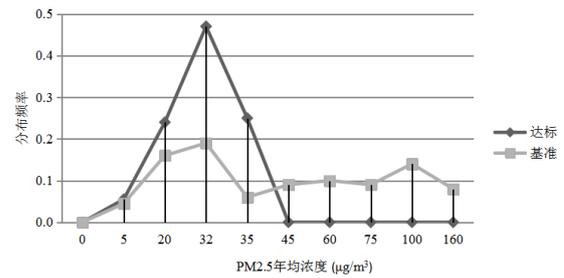


图 5 全国 333 个地级市 PM_{2.5} 年均浓度分布规律 (2010 年)

Fig.5 Distribution of annual average concentration of PM_{2.5} in 333 prefectural-level cities, China (2010)

邢奕等^[36]对多孔介质对空气细颗粒物的过滤作用进行了研究，将活性炭和不锈钢珠对细颗粒物的过滤结果进行比较，发现活性炭对细颗粒物的过滤效率是不锈钢珠的 1.85 倍，而且它的过滤效率的增加会随活性炭粒径的减小和表观过滤风速的减小而变动。段振亚等^[37]用数值模拟的手段研究了防风网对露天煤堆 PM_{2.5} 的减排作用，发现防风网有很强的 PM_{2.5} 减排效果，减排率高达 99.33%，可见防风网不仅对大颗粒粉尘抑制作用，对 PM_{2.5} 的减排也有很明显的效果。马欢^[38]对低阻高效的滤料净化 PM_{2.5} 模型进行了研究，通过理论分析和实验研究的方法提出了选取 8 袋 450mm 袋长作为过滤器结构形式，M5 过滤器（袋式过滤器）滤料 +150g/m² 驻极体滤料作为过滤材料的对建筑环境净化 PM_{2.5} 具有高效低阻和较大容尘量的空气过滤器设计，此过滤器对 PM_{2.5} 计重净化效率达 97.70%。孙鹏^[39]对 PM_{2.5} 中金属元素进行了研究，做了消解实验及其对比实验，对 HNO₃、HCL、HF、HClO₄ 和 H₂O₂ 五种常用消解酸以六种方式重新组合，发现 HNO₃+HF+HClO₄ 是这些消解方法中的最好组合方法。科学的进步，使得更多的实用改善措施不断涌现。陈超等^[40]针对基于大气 PM_{2.5} 污染的建筑外窗通风换气进行了研究，利用质量平衡方程结合对 PM_{2.5} 浓度水平和气象参数的动态测量数据，发现室内外 PM_{2.5} 质量浓度比 (I/O) 主要受室外风速和室外空气相对湿度变化的影响，并测出了三种不同风力条件下 I/O 的值，为室内人群健康及建筑的通风净化系统的优化设计提供了重要的参考。对于一次回风空调系统的 PM_{2.5} 浓度，吕晓慧等^[41]基于浓度守恒原理进行了研究，提出了控制策略，当过滤器分别装在新风、回风、送风段时，若室外 PM_{2.5} 浓度高于室内，则应减小

新风量更有利于控制室内PM2.5浓度,室外PM2.5浓度低于室内应增大新风量更有利于控制室内PM2.5浓度。徐秀等^[42]对室内PM2.5浓度控制进行了模拟分析,结合质量平衡方程原理,建立PM2.5的浓度模型;并针对各种因素对室内PM2.5浓度的影响进行了探究,对安装在各个位置的过滤器及其在不同新风比条件下研究对比,发现过滤器安装在送风段对室内PM2.5的过滤效果最好。杨洋等^[43]运用对比论证对空调超声波喷水室对

PM2.5的净化作用进行了研究,研究发现该方法能够显著提高热湿交换律并达到除尘的效果。

PM2.5的防治工作具有多元化的特点,可以从多个角度入手,研究者也多从植被防护、围挡措施防护、PM2.5有毒有害化学成分的消解,新型净化材料以及室内PM2.5的净化等各个方面入手进行研究,但现有文献对PM2.5的相关防护治理具体可行措施的综合性研究尚有空白。

表1 PM2.5源解析研究概况

Table1 Main studies conducted on PM2.5 source resolution

研究人员	地点	研究方法	PM2.5来源及贡献率
王振波,等 ^[20] 2015	全国	空间插值方法和 Moran's I 的 PM2.5 浓度空间集聚分析法	东南沿海空气质量水平稳定,华北平原、长江三角洲是PM2.5的全年主要聚集地,北方城市是高浓度PM2.5聚集的核心地。
王新 ^[21] 2016	兰州	PMF模型	3种污染源:交通排放/生物质燃烧混合源、土壤源、工业排放源。
李晓 ^[22] 2015	郑州	定性分析、定量分析	高等植物排放22%、秸秆燃烧10%、燃煤31%、汽油燃烧17%、柴油燃烧20%。
卢慧剑 ^[23] 2016	沿海城市	CMB模型的一次源解析、相似性组诊断	贡献率:工业排放19.7%、机动车22.9%、海盐16.0%、其他20%。
李璇,等 ^[24] 2015	北京	源排放处理模式 SMOK	贡献率:本地34%、天津4%、河北26%、模拟边界24%、京津冀周边12%。
舒熳 ^[25] 2015	雅安	气团后向轨迹模型、富集因子法、主成分分析法	73%重金属来自当地煤燃烧和不规范的经商活动、道路扬尘、木炭燃烧和不锈钢厨具;二次有机碳对城区总有机碳的最低贡献为58%。
姜立乾 ^[26] 2017	南京	单因子方差分析、两个独立样本t检验和相关性分析	贡献率(室外PM2.5):混合污染源42.5%、土壤扬尘21.1%、机动车尾气排放18.2%、化石燃料燃烧18.1%。
昌晶亮,等 ^[27] 2016	长沙、株洲、湘潭	PMF模型、向后轨迹信息的区域传输影响	春节期间PM2.5浓度比非春节期间高47.6%,春节后PM2.5浓度比春节期间低41.5%。
陈刚,等 ^[28] 2016	合肥	正定矩阵因子分解模型	高等植物排放22%、秸秆燃烧10%、燃煤31%、汽油燃烧17%、柴油燃烧20%。
郑晓伍,等 ^[29] 2018	石河子	OC/EC相关性分析比较	SOC/OC在非霾非沙尘天气下为64%,霾和沙尘天气下为67%。
余文洋 ^[30] 2015	武汉	排放源清单法、扩散模型法和受体模型法	工业区:7种来源,其中3个主要来源是生物质燃烧(22.971%)、植物再悬浮(14.187%)、土壤再悬浮(13.385%);交通区:6种来源,其中3个主要来源是土壤悬浮(26.888%)、生物质燃烧(20.421)、高等植物释放(14.131%);植物区:4种来源,土壤再悬浮(30.339%)、生物质燃烧(19.796%)、植物释放(16.425%)、肉类烹饪(9.887%)。
温维 ^[31] 2014	唐山	富集因子法、正交矩阵因子分解法、HYSPLIT模型后向轨迹模拟运算	贡献率:金属冶金工业22.6%、建筑、燃煤及其他无组织尘43.97%、机动车及道路扬尘19.63%、水泥建材8.40%、玻璃陶瓷行业5.30%。

5 结论及展望

虽然目前我国对PM2.5的研究逐渐深入,但由于PM2.5相关研究的复杂性和多样性,仍缺乏较为系统和完善的研究。本文通过对PM2.5的监

测方法、成分分析、来源解析和防治方法与治理措施的相关综述,得出以下主要结论:

(1) PM2.5的监测方法各有其优缺点,存在各自的局限性和适用范围,应针对不同的监测目标

选择合适的监测仪器。监测方法虽比以前有了很大进步,但仍需继续开展大量基础性研究工作。尤其遥感监测技术仍需从研究数据、研究方法和研究结果分析等方面进行探索和完善,后续研究可结合下垫面、污染源等因素,综合分析其与PM_{2.5}浓度和PM_{2.5}特征之间的定量关系,进一步完善动态模拟,深入研究去雾算法。

(2) PM_{2.5}成分分析多侧重于含碳烃类化合物的研究,金属元素和水溶性离子的研究相对较少;随着PM_{2.5}研究技术的进步,逐渐采用了先进的成分分析仪器和方法,其中各种元素的占比随地域和产生源的不同而不同,研究其成分可为其消解等提供强有力的理论支持。目前,尚没有学者运用同位素追踪法进行研究,这将是成分分析和来源研究的一个方向。在金属成分的研究中,其标准值限和其在气溶胶表面的非均匀反应等方面需继续跟进与加强。

(3) PM_{2.5}的来源解析呈现出极强的地域性差异,已发表文献多以地区为主体进行研究,集中在京津冀和长江三角洲、珠江三角洲等区域的大城市。今后针对全国乃至全球的对比性研究、区域性的对比分析等方向的研究仍需加强和完善。在PM_{2.5}的贡献率中,未知源仍占有相当比重,需对研究方法和数据模型进一步改进以更好地对PM_{2.5}来源进行解析。

(4) 近年来,由于国家和社会对环境问题的日益重视,PM_{2.5}防治方法与治理措施的研究工作得到支持,PM_{2.5}的防治研究也取得了极大的成果,但仍缺乏比较可行、系统且完善的防治措施和方法;国内除尘设备的研发和改进仍存在较多欠缺,有待后续研究者继续努力。

参考文献:

- [1] 潘本锋,汪巍,王瑞斌,等.我国PM_{2.5}监测网络布局与监测方法体系构建策略分析[J].环境与可持续发展,2013,38(3):9-13.
- [2] 陈梅芹,吴景雄.PM_{2.5}监测的微粒分级技术及测定方法的介绍[J].工业安全与环保,2013,39(10):7-9.
- [3] 胥全敏,钟志京,李群岭,等.β射线法监测PM_{2.5}的主要影响因素和控制方法分析[J].四川环境,2016,35(1):79-82.
- [4] 潘本锋,郑皓皓,李莉娜,等.空气自动监测中PM_{2.5}与PM₁₀“倒挂”现象特征及原因[J].中国环境监测,2014,30(5):90-95.
- [5] 李倩,李令军,张大伟,等.北京大气PM_{2.5}遥感监测业务化方法探讨[J].环境科学研究,2016,29(10):1417-1425.
- [6] 郭阳洁.基于气溶胶遥感的中国陆地大气PM_{2.5}浓度估算[D].武汉:武汉大学,2014.
- [7] 马品.基于遥感和CFD的微环境中PM_{2.5}浓度分布的监测与模拟研究[D].上海:华东师范大学,2017.
- [8] 陈辉,厉青,王中挺,等.利用MODIS资料监测京津冀地区近地面PM_{2.5}方法研究[J].气象与环境学报,2014,30(5):27-37.
- [9] 郑玫,张延君,闫才青,等.上海PM_{2.5}工业源谱的建立[J].中国环境科学,2013,33(8):1354-1359.
- [10] 徐亚,仇猛淋,郑晨龙,等.北京市夏季大气气溶胶PM_{2.5}和PM₁₀成分特征[J].北京师范大学学报(自然科学版),2015,51(4):362-367.
- [11] 陈静,杨鹏,韩军彩,等.基于高分辨率MARGA数据分析石家庄PM_{2.5}成分谱特征[J].中国环境科学,2015,35(9):2594-2604.
- [12] 马召辉,梁云平,张健,等.北京市典型排放源PM_{2.5}成分谱研究[J].环境科学学报,2015,35(12):4043-4052.
- [13] 玉散·吐拉甫,迪丽努尔·塔力甫,王新明,等.极干旱地区沙尘与非沙尘天气PM_{2.5}及所含金属元素的浓度特征分析[J].生态环境学报,2017,26(9):1529-1538.
- [14] 王群.郑州市大气PM_{2.5}中正构烷烃污染特征及来源解析[J].郑州大学学报(理学版),2017,49(3):104-110.
- [15] 周盼,秦伟,郭硕,等.石家庄冬季道路积尘PM_{2.5}与PM₁₀碳组分污染特征分析[J].环境化学,2018,37(1):123-129.
- [16] 刘珊,彭林,温彦平,等.太原市PM_{2.5}中有机碳和元素碳的污染特征[J].环境科学,2015,36(2):396-401.
- [17] 张伟,姬亚芹,李树立,等.天津市春季道路降尘PM_{2.5}和PM₁₀中碳组分特征[J].环境科学研究,2018,31(2):239-244.
- [18] 虎彩娇,成海容,李锦伦,等.黄石市大气PM₁₀和PM_{2.5}中元素特征及重金属生态风险评价[J].环境化学,2018,37(1):138-145.
- [19] 丁萌萌,周健楠,刘保献,等.2015年北京城区大气PM_{2.5}中NH₄⁺、NO₃⁻、SO₄²⁻及前体气体的污染特征[J].环境科学,2017,38(4):1307-1316.
- [20] 王振波,方创琳,许光,等.2014年中国城市PM_{2.5}浓度

- 的时空变化规律[J].地理学报,2015,70(11):1720-1734.
- [21] 王新.兰州城区大气PM2.5污染特征及来源解析[J].环境科学,2016,37(5):1619-1628.
- [22] 李晓.郑州市环境大气PM2.5中烃类有机物污染特征及来源解析[D].郑州:郑州大学,2015.
- [23] 卢慧剑.典型沿海城市PM2.5污染特征及其来源解析研究[D].杭州:浙江大学,2016.
- [24] 李璇,聂滕,齐珺,等.2013年1月北京市PM2.5区域来源解析[J].环境科学,2015,36(4):1148-1153.
- [25] 舒熈.雅安城区PM2.5的污染特征和来源解析[D].成都:四川农业大学,2015.
- [26] 姜立乾.大学宿舍室内PM2.5水溶性离子污染特征及来源解析[D].南京:南京理工大学,2017.
- [27] 昌晶亮,余洪,罗伟伟,等.长株潭城市群PM2.5污染的春节假日效应[J].生态与农村环境学报,2016,32(5):724-728.
- [28] 陈刚,刘佳媛,皇甫延琦,等.合肥城区PM10及PM2.5季节污染特征及来源解析[J].中国环境科学,2016,36(7):1938-1946.
- [29] 郑晓伍,陈家灯,刘子龙,等.石河子市PM2.5中有机碳和元素碳的变化特征与来源解析[J].环境化学,2018,37(1):115-122.
- [30] 余文洋.武汉市典型地区PM2.5中含氧有机物的分布特征及来源解析[D].武汉:武汉理工大学,2015.
- [31] 温维.唐山夏季大气PM2.5污染特征及来源解析[J].北京工业大学学报,2014,40(5):751-758.
- [32] 薛文博,付飞,王金南,等.基于全国城市PM2.5达标约束的大气环境容量模拟[J].中国环境科学,2014,34(10):2490-2496.
- [33] 朱梅,文远高.室内PM2.5浓度标准的探讨[J].制冷与空调,2014,28(6):726-730.
- [34] 王成云,李帅英,谷建才,等.保定市常见城市绿化树种对PM2.5滞纳能力的研究[J].河北林果研究,2016,31(3):275-279.
- [35] 成国庆,周保华,段二红,等.石家庄市PM2.5的污染现状及防控对策[J].中国环境管理干部学院学报,2014,24(5):39-41,58.
- [36] 邢奕,赵晓明,刘应书,等.多孔介质过滤细颗粒[J].环境工程学报,2016,10(11):6571-6576.
- [37] 段振亚,刘永阵,周驰,等.防风网对露天煤堆PM2.5的减排效果评估方法[J].煤炭学报,2016,41(S2):576-582.
- [38] 马欢.建筑环境低阻高效滤料净化PM2.5特性模型及应用研究[D].上海:东华大学,2016.
- [39] 孙鹏,范丽慧,张保生,等.PM2.5中金属元素消解方法的优化[J].分析科学学报,2015,31(6):815-819.
- [40] 陈超,万亚丽,陈紫光,等.基于大气PM2.5污染的建筑外窗缝隙通风换气次数动态变化特性[J].北京工业大学学报,2017,43(2):285-293.
- [41] 吕晓慧,张冷,刘忠兵,等.一次回风空调系统PM2.5污染控制策略[J].环境工程学报,2016,10(12):7141-7146.
- [42] 徐秀,张冷,刘忠兵,等.室内PM2.5浓度控制模拟分析[J].环境工程学报,2017,11(3):1755-1760.
- [43] 杨洋,黄翔颜,苏芊,张伟峰.空调超声波喷水室净化PM2.5的研究[J].制冷与空调,2007,(1):28-32.

《制冷与空调》稿约

1 《制冷与空调》创刊于1985年,是由四川省制冷学会和西南交通大学联合主办的国内外公开发行的科技期刊,国内统一刊号CN51-1622/TB,国际标准刊号ISSN 1671-6612。主要刊登制冷与空调行业的最新科技成果、学术论文,介绍新技术、新工艺、新产品,并及时通报行业最新动态和信息。2007年入选中国科技论文统计源期刊(中国科技核心期刊),2003年入选“中文核心期刊(遴选)数据库期刊”、“中国期刊全文数据库全文收录期刊”及“中国学术期刊综合评价数据库统计刊源”。

2 本刊一般自收到稿件起三周内向拟刊用稿件作者发出录用通知,特殊情况下时间适当延长。在这一期限后作者如未收到录用通知或修改的函件,可对稿件另作处理。

3 作者不应一稿两投或多投。不同意将稿件转载、摘登或编入本刊已加入的各种数据库的作者,亦请在稿件上作书面声明,否则视为同意。

4 文稿撰写要求

4.1 稿件内容

稿件应包含(按顺序)题名(一般限20个字以内)、作者姓名、作者单位、中文摘要(300字左右)、关键词(3~8个)、中图分类号、文献标识码、文章编号(由编辑部填写)、英文部分(含题名、作者姓名的汉语拼音、作者单位、英文摘要及关键词)、正文、参考文献、基金说明、作者简介(包括:性别,出生年月,学历或职务,邮编,地址,联系电话,E-mail)。

4.2 排版要求

页边距:上2.7,下2.4,左2.1,右2.1。分栏:不要求。字体要求如下。题目:中文2号黑体,英文5号加黑(Times New Roman)。作者姓名:中文4号楷体,英文5号(Times New Roman)。工作单位:中文小4号楷体,英文小5号(Times New Roman)。摘要、关键词、参考文献内容:中文为小5号宋体和英文为小5号(Times New Roman)。中英文各关键词间均用分号连接。正文:5号宋体。

4.3 章节编号

文中各级标题采用阿拉伯数字分3级编序,且一律左顶格排版,标题编号从0开始,即引言的编号为0。一级标题为小四黑体,形如0,1,2,3,……排序;二级标题为五号宋体,形如1.1,1.2,……排序;三级标题为五号宋体,形如1.1.1,1.1.2,……排序。

4.4 图表及公式

图表名:中文小5号黑体,英文为小5号加黑(Times New Roman);文中表格一律使用三线表(不画竖线,横线仅保留顶线、底线及栏目线)。图的尺寸尽可能小,以能看清楚为准;表中字体用小5号;公式按出现顺序编号:(1)、(2)、(3)……图表名称应中英文对照。

4.5 物理量和计量单位

文稿正文(含图、表)中的物理量和计量单位应符合国家标准或国际标准。

4.6 基金说明和第一作者简介

小5号宋体,置于第1页下方。包括:基金说明、姓名、性别、出生年月、职称及所在单位。

4.7 参考文献

参考文献按在正文中出现的先后次序列表于文后,表上以“参考文献”居中排作为标识;参考文献的序号左顶格,并用数字加方括号表示,如[1],[2],……,以与正文中的指示序号格式一致。每一参考文献条目的最后均以“.”结束。各类参考文献条目的编排格式及示例如下:

a. 连续出版物 [序号] 主要责任者. 文献题名[J]. 刊名, 出版年份, 卷号(期号): 起止页码. b. 专著 [序号] 主要责任者. 文献题名[M]. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码. c. 论文集 [序号] 主要责任者. 文献题名[C]. 主编. 论文集名. 出版地: 出版者, 出版年: 起止页码. d. 学位论文 [序号] 主要责任者. 文献题名[D]. 保存地: 保存单位, 年份. e. 报告 [序号] 主要责任者. 文献题名[R]. 报告地: 报告会主办单位, 年份. f. 专利文献 [序号] 专利所有者. 专利题名[P]. 专利国别: 专利号, 发布日期. g. 国际、国家标准 [序号] 标准代号, 标准名称[S]. 出版地: 出版者, 出版年. h. 报纸文章 [序号] 主要责任者. 文献题名[N]. 报纸名, 出版日期(版次). i. 电子文献 [序号] 主要责任者. 电子文献题名[文献类型/载体类型]. 电子文献的出版或可获得地址, 发表或更新日期/引用日期(任选).