

中国主要城市春季 PM_{2.5} 分布特征及其来源分析

韩瑞霞,刘伟豪,王森* (西北大学城市与环境学院,陕西西安 710127)

摘要 通过分析全国 12 个城市 2014 年春季(3~5 月)PM_{2.5}监测数据,得出不同地区春季 PM_{2.5}分布特征,及不同地区 PM_{2.5}主要来源;比较六大经济协作区、不同功能城市及几个典型城市间 PM_{2.5}分布的差异,并分析其原因,为制定改善空气质量的有效措施提供合理依据。
关键词 春季;PM_{2.5};分布特征;来源
中图分类号 S181.3 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2014)22-07608-06

PM_{2.5} Distribution Characteristics in Spring and Sources Analysis in Main Cities in China
HAN Rui-xia, WANG Sen et al (School of Urban and Environment, Northwest University, Xi'an, Shaanxi 710127)
Abstract Through analyzing PM_{2.5} in the spring of 2014 in 12 cities of China, the distribution characteristics of PM_{2.5} in different districts were obtained, as well as the main sources of PM_{2.5}. The differences of PM_{2.5} distribution in six economic coordinated areas, different functional cities and a few typical cities were compared, the reasons were analyzed, which will provide reasonable basis for making effective measures to improve air quality.
Key words Spring; PM_{2.5}; Distribution characteristics; Sources

随着经济的快速发展以及城市化进程的加速,环境污染问题日益严重,而大气污染已成为目前全球范围内主要的环境污染问题。造成大气污染的物质分为气溶胶和气态污染物两类,其中气溶胶粒子的大小、组成等都决定了其污染特征以及对环境和人体的危害程度。大部分有害元素及化合物都富集于细颗粒物(PM_{2.5})上,由于细颗粒物空气动力学当量直径小、比表面积大,因此在大气中的停留时间较长,并可通过呼吸道进入人体,甚至沉积在肺部,穿过肺泡进入血液^[1],对人体健康产生严重危害。同时,PM_{2.5}也是造成能见度降低的最主要因素^[2]。自 20 世纪 70 年代以来,科学家发现大气中的颗粒物能够影响太阳辐射和大气能见度,对全球气候效应有着重要影响,成为广泛关注的一个重要领域^[3-4]。美国加州地区是进行细颗粒物研究最多的地方,研究结果表明:PM_{2.5}质量浓度不仅取决于物理化学和地形条件等复杂因素,还与区域污染源排放的污染物及气象因素有关,且 PM_{2.5}呈现季节性变化规律,通常春秋高于夏季^[5]。欧美及澳大利亚等国家已经出台了关于 PM_{2.5}的空气质量监测标准,并在颗粒物的源解析和空气质量模型等方面取得了大量研究成果^[6]。

中国关于 PM_{2.5}的研究工作起步较晚,监测资料缺乏,与欧美等发达国家差距较大,所开展的研究都是局部的,主要集中在北京、广州、西安等大城市,缺乏系统性和连续性。近些年的工作主要是分析 PM_{2.5}与气象条件的关系。刘辉等的研究表明除污染源排放外,气象条件是影响大气 PM_{2.5}及其水溶性离子浓度的最重要因素之一^[7]。樊文雁等观测分析了雾、霾、晴 3 种典型天气状况下,大气细粒子质量浓度垂直分布特点,得出雾天的细粒子主要来源于局地,连续晴天时细粒子明显被清除,而霾天细粒子污染则表现为时空分布非常均匀的城市群区域污染特征,且污染物不断积累^[8]。由于气候及气象条件的影响,冬春季节 PM_{2.5}质量浓度高于夏季,

尤其在北方地区,其采暖期为冬季到春季初,此期间 PM_{2.5}污染尤为突出。而春季同时包含了采暖期和非采暖期,其 PM_{2.5}分布特征尤其具有代表性,因此笔者在全国尺度上进行春季空气 PM_{2.5}的分布特征及其来源分析,对比了旅游、工业等不同功能城市及典型城市的空气 PM_{2.5}分布差异,并解析其来源,为具有不同污染特征的地区制定合理有效措施和控制大气污染提供科学的理论依据。

1 试验方法
通过 <http://www.tianqihoubao.com/aqi/>、<http://www.cnpm25.cn>、<http://www.tianqihoubao.com/lishi/index.html> 和 <http://aqicn.org/city/all/>等网站,收集 12 个所选取研究城市 3~5 月的 PM_{2.5}、AQI 和 PM₁₀监测数据,以及天气状况,采用 Excel、Origin 等软件进行数据处理及相关分析。

我国按照 AQI(空气质量指数)划分空气质量等级标准(表 1),同时采用该标准进行结果分析。

表 1 AQI(空气质量指数)划分空气质量等级标准

AQI//μg/m ³	空气质量等级	AQI//μg/m ³	空气质量等级
0~50	优	151~200	中度污染
51~100	良	201~300	重度污染
101~150	轻度污染	301~500	严重污染

2 结果与分析
2.1 我国 PM_{2.5}分布特征及其影响因素 以我国春季空气 PM_{2.5}为研究对象,结合 PM_{2.5}监测数据,分析我国各地区空气 PM_{2.5}分布特征及其影响因素。
2.1.1 东北地区。以沈阳和哈尔滨为例,研究春季东北地区空气 PM_{2.5}的分布特征。沈阳位于中国东北地区南部,属温带季风气候,春季多风;哈尔滨是黑龙江省省会,位于东北北部,是中国最北端的大城市,属中温带大陆性季风气候,春秋属于过渡季节,时间较短。

图 1(a)、(b)分别为沈阳和哈尔滨 3~5 月空气 PM_{2.5}和 AQI 的变化趋势,可以看出两市的 PM_{2.5}和 AQI 随时间的变化规律基本相似。沈阳 3、4、5 月 PM_{2.5}质量浓度的均值分别

作者简介 韩瑞霞(1993-),女,山西晋中人,本科生,专业:环境科学。
* 通讯作者。
收稿日期 2014-06-30

是 79、64、47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (浓度范围分别为: 25 ~ 179、23 ~ 121、44 ~ 142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 呈现逐渐下降的趋势; 哈尔滨 PM_{2.5} 在 3、4、5 月的均值分别是 55、48、27 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (浓度范围分别为: 21 ~ 146、20 ~ 102、12 ~ 51 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 同样呈现逐渐下降的趋势, 5 月显著低于 3 月和 4 月 ($P < 0.05$)。

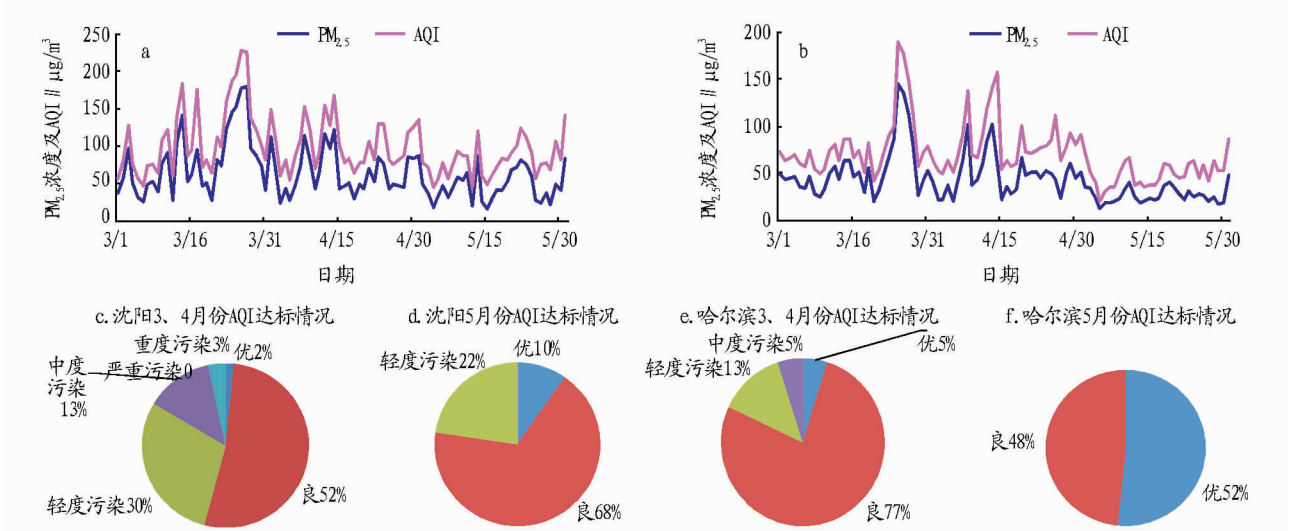


图 1 沈阳(a)和哈尔滨(b)3~5月 PM_{2.5}趋势变化及 AQI 达标情况(c~f)

另外,两市的 PM_{2.5}浓度均在 3 月 25 日左右及 4 月 13 日左右出现峰值,结合当时的天气情况分析其原因,主要由于当时大范围的西风、西南风带来浮尘引起 PM_{2.5}浓度的明显升高。3、4、5 月沈阳和哈尔滨的 AQI 值范围分别为: 47 ~ 227、54 ~ 169、44 ~ 142 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 42 ~ 190、49 ~ 158、20 ~ 91 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,依据我国 AQI 划分空气质量等级标准(表 1)分析 3、4、5 月沈阳和哈尔滨的空气质量(图 1(c)~(f))由图 1(c)~(f)可以看出沈阳和哈尔滨 5 月份的空气质量均明显优于 3、4 月份,沈阳 5 月份 AQI 达到良的天数占到了 68%,未出现中度污染及以上天气;哈尔滨 5 月份 AQI 均达到了优良,其中,优的天数占到了 52%。

哈尔滨空气质量总体优于沈阳,主要原因是沈阳地处辽宁省中部城市群中心,周围分布着煤炭基地、钢铁基地、煤铁基地、石油基地、电力基地等,均为重污染工业;而哈尔滨是中

国重要的商品粮生产基地,林业资源丰富,对空气有很好的净化效果,且春季易发生大风,有效地阻止了污染物的滞留。

2.1.2 华北地区。以北京和石家庄为例,研究春季华北地区空气 PM_{2.5}的分布特征。北京是中国的政治、经济中心,2012 年末常住人口密度为每平方公里 1 261 人^[9],巨大的人口压力和逐步提高的生活水平是造成空气质量恶化的主要原因之一。石家庄位于河北省中南部,西临太行山脉,东、南、北部均为华北平原;且石家庄属温带大陆性季风气候,春季干旱多风。

图 2(a)、(b)分别为北京和石家庄 3~5 月 PM_{2.5}及 AQI 的变化趋势。北京 3、4、5 月 PM_{2.5}质量浓度的均值分别是 91、88、61 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (10 ~ 272、21 ~ 234、17 ~ 138 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),5 月明显低于 3 月和 4 月;石家庄 PM_{2.5}在 3、4、5 月的均值分别是 138、107、76 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (27 ~ 291、47 ~ 183、24 ~ 177 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),呈现

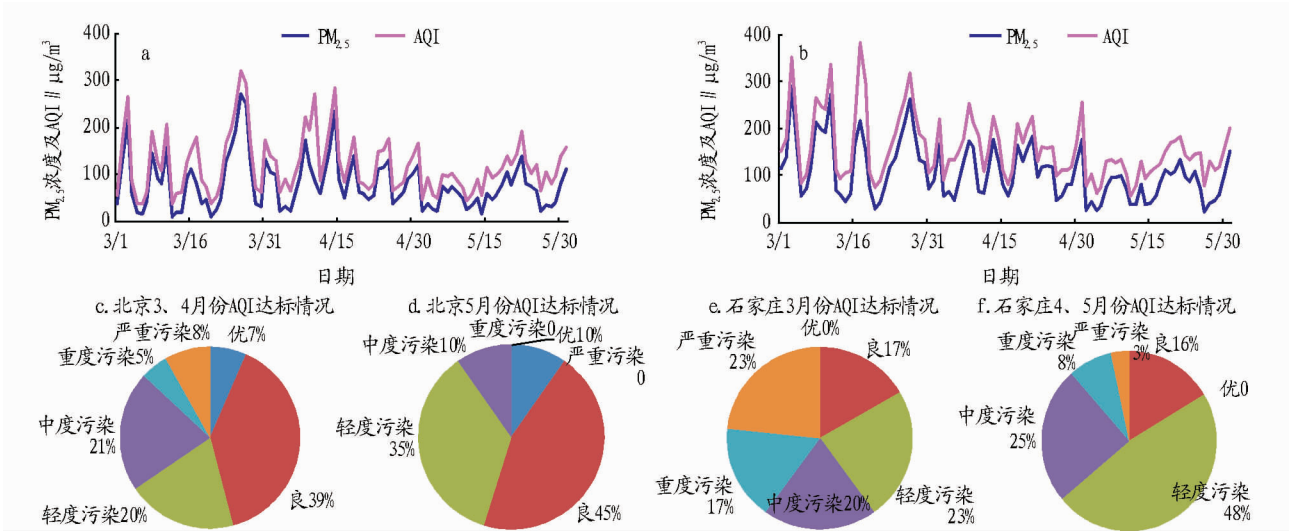


图 2 北京(a)和石家庄(b)3~5月 PM_{2.5}趋势变化及 AQI 达标情况(c~f)

逐渐下降的趋势,5月明显低于3月。3、4、5月北京和石家庄的AQI值范围分别为:36~322、63~284、45~191 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和73~384、82~253、56~256 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,通过对北京和石家庄空气质量等级进行分析(图2(c)~(f)),发现北京3、4月份空气质量较差,出现了重度污染及严重污染天气;5月空气质量大为好转,优良天数占到了55%,且未出现重度污染及以上天气。石家庄3月份的空气质量状况明显较差,4、5月份空气质量有所改善,无质量等级为优的天气出现,但严重污染比例大幅下降,轻度污染天数增多。北京整体空气质量状况优于石家庄。

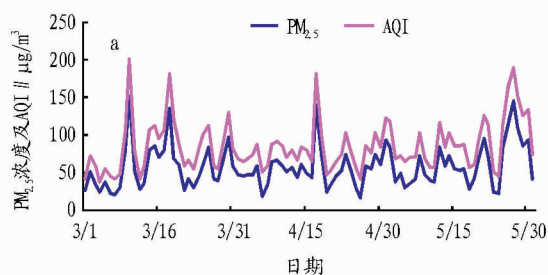
相关研究表明^[10],北京 $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度最高值出现在4月的沙尘天气期间,而由于受沙尘天气所影响,其春季的 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度居四季之首,当沙尘天气里风速低于某一阈值(10 km/h)时, $\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度与风速呈负相关,反之则呈正相关。此外,北京市 $\text{PM}_{2.5}$ 污染源主要有五类,分别是煤燃烧、土壤尘、交通运输、钢铁工业以及海洋气溶胶^[11];同时受季风影响,沙尘暴也在很大程度上影响了其空气质量。3月份空气质量差主要原因是处于采暖期,燃烧煤炭排放大量污染物;4月份空气质量不佳,除了以上固有污染物外,主要是由于天气所影响,大部分轻度及以上污染天气均出现在多云、阴天等天气,雨后晴天空气质量急剧好转,达到优良标准。

石家庄特殊的地形使西北风无法到达,东南风作用时由于太行山脉的阻挡又转而向东,污染物始终停留在石家庄上空,是造成其空气质量差的基本原因。3月份的空气质量状

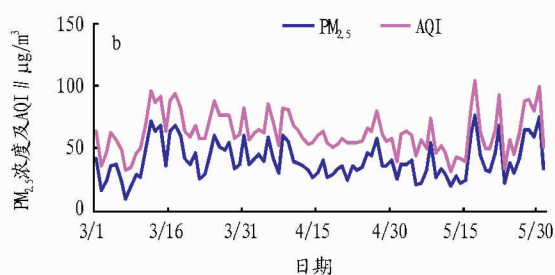
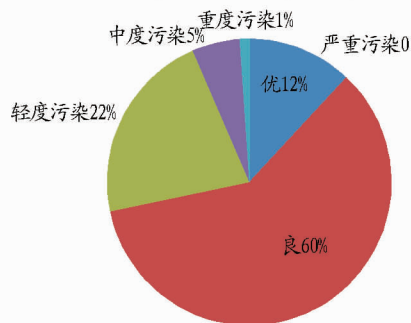
况明显较差,说明采暖期燃煤对空气质量的影响巨大,采暖期结束后空气质量明显改善。石家庄的首要污染物是可吸入颗粒物(PM_{10}),主要来源于化石燃料燃烧、工业生产及交通运输,各种工业生产过程中产生的空气污染由于排放点比较集中,浓度较高,所以对工矿区或局部的空气污染较为严重,这也是石家庄空气质量状况整体劣于北京的一个重要原因。城市绿化速度远不及建设速度也使得污染物长难以被净化。

2.1.3 华东地区。以上海和厦门为例,研究春季华东地区空气 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布特征。上海处于中国南北海岸中心点,长江和黄浦江入海汇合处,是长江三角洲冲击平原的一部分;属北亚热带季风性气候,温和湿润,春秋较短。厦门位于台湾海峡西岸的中部,地形以滨海平原、台地和丘陵为主,属温带亚热带气候,东北风为其主导风向。

图3(a)、(b)分别为上海、厦门3~5月 $\text{PM}_{2.5}$ 及AQI的变化趋势。上海 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度3、4、5月的均值分别是56、52、63 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (20~151、16~140、22~144 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),无明显差异;厦门 $\text{PM}_{2.5}$ 在3、4、5月的均值分别是43、39、40 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (9~72、24~60、20~77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),无明显差异,平均水平基本保持不变。3、4、5月上海和厦门的AQI值范围分别为:40~201、46~182、45~189 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 和32~96、51~86、31~104 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,通过对上海和厦门空气质量等级进行分析(图3(c)、(d)),发现厦门市的空气质量明显优于上海,厦门市的空气质量极佳,仅有一天为轻度污染,其余天数均达到优良等级。



c. 上海3、4、5月份AQI达标情况



d. 厦门3、4、5月份AQI达标情况

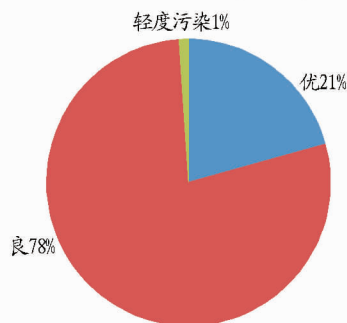


图3 上海(a)和厦门(b)3~5月 $\text{PM}_{2.5}$ 趋势变化及AQI达标情况(c~d)

近年来上海市大气污染的主要来源为工业生产和日常生活的污染物排放,包括燃煤锅炉、机动车尾气、炒菜油烟等,以及周边城市重化工业污染物的排放。上海市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度整体略偏高,主要由于上海春季的大气稳定度较高,雨量较少,且燃煤等工业排放较为集中;其 $\text{PM}_{2.5}$ 主要成分为烟尘集合体、矿物颗粒、燃煤飞灰、生物质颗粒及不明物质,

具有较强的生物活性,而这种生物活性则主要来源于其中较多的烟尘集合体及较高的重金属元素含量^[12]。而对于厦门,旅游业是其支柱产业,为保证其环境质量,禁止高能耗、高污染企业进入,因此厦门空气质量指数很低。

2.1.4 中南地区。以郑州和广州为例,研究春季中南地区

空气 PM_{2.5} 的分布特征。郑州西依嵩山,北临黄河,东南为黄淮平原,横跨中国二、三级地貌台阶,属北温带大陆性季风气候,春季干旱少雨;广州位于中国最南部,属丘陵地带,地势东北高、西南低,临南海;属南亚热带季风气候,雨量充沛。

图 4(a)、(b) 分别为郑州、广州 3~5 月 PM_{2.5} 及 AQI 的变化趋势。郑州 PM_{2.5} 质量浓度 3、4、5 月的均值分别是 90、78、67 μg/m³ (46~176、44~135、36~115 μg/m³), 整体呈下降趋势; 广州 PM_{2.5} 在 3、4、5 月的均值分别是 55、47、32

μg/m³ (19~127、33~79、15~64 μg/m³), 呈现逐渐下降的趋势。3、4、5 月郑州和广州的 AQI 值范围分别为: 70~224、71~179、63~170 μg/m³ 和 29~167、49~106、32~88 μg/m³, 通过对郑州和广州空气质量等级进行分析(图 4(c)、(d)), 发现郑州无质量为优的天气, 中度及重度污染的天数占到了 16%; 而广州总体空气质量良好, 3 个月中 2 次中度污染、4 次轻度污染天气均出现在 3 月份连续几个阴天之后。广州整体空气质量状况明显优于郑州。

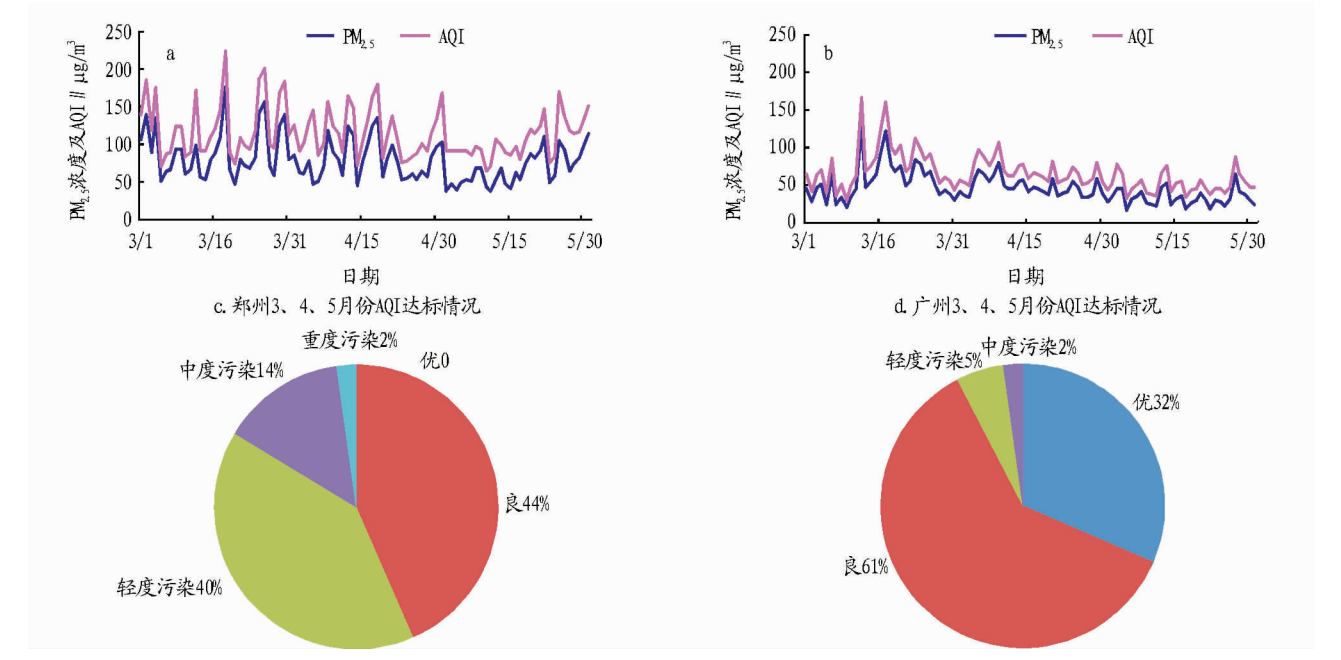


图 4 郑州(a)和广州(b)3~5 月 PM_{2.5} 趋势变化及 AQI 达标情况(c-d)

郑州空气质量较差,主要原因是其为中国重要的交通枢纽,且汽车产业、先进装备制造业和电子信息产业为其三大支撑产业,因此排放大量污染物,明显影响空气质量。广州是我国最发达的城市之一,工业规模和机动车出行需求不断扩大,使其面临空气质量和生态环境恶化的巨大压力;春季大气层结相对稳定,不利于污染物的扩散,也是出现霾的重要原因。两者虽同处中南地区,但由于广州地处海岸,充足的降水和较清洁的产业结构使其空气质量状况明显优于郑州。

2.1.5 西南地区。以重庆和拉萨为例,研究春季西南地区空气 PM_{2.5} 的分布特征。

图 5(a)、(b) 分别为重庆、拉萨 3~5 月 PM_{2.5} 及 AQI 的变化趋势。重庆 PM_{2.5} 质量浓度 3、4、5 月的均值分别是 55、43、47 μg/m³ (25~109、18~67、22~105 μg/m³), 无明显变化趋势; 拉萨 PM_{2.5} 在 3、4、5 月的均值分别是 21、29、25 μg/m³ (12~54、16~40、15~36 μg/m³)。重庆空气 PM_{2.5} 略高于拉萨。3、4、5 月重庆和拉萨的 AQI 值范围分别为: 40~114、30~91、34~138 μg/m³ 和 39~82、57~86、44~101 μg/m³, 通过对重庆和拉萨空气质量等级进行分析,发现重庆春季轻度污染天气仅 5 d,其余天气均为优良,酸雨污染也明显减轻。拉萨仅有一天为轻度污染,等级为优的天数比例占到了 13%,其余均为良。拉萨整体空气质量状况优于重庆。

重庆位于四川盆地东部,长江上游地区,多山多雾。重庆人口较多,是老重工业基地,烟气排放量大;所处区域含有丰富的煤炭资源,但其中硫含量偏高,属高硫煤种,燃烧过程中产生大量二氧化硫,这也是造成该地区酸雨污染严重的主要原因。近年来,重庆注重保护植被,控制重污染工业企业,取得明显成效。而拉萨地处西藏东南部,青藏高原的中部,是世界上海拔最高的城市之一,属高原温带半干旱季风气候;由于其工业化程度低,燃煤量极少,多大风天气,污染物不易聚集,因此春季空气质量状况明显优于重庆。

2.1.6 西北地区。以西安和兰州为例,研究春季西北地区空气 PM_{2.5} 的分布特征。西安是西北地区第一大城市,位于渭河流域中部关中盆地,北临渭河和黄土高原,南邻秦岭,属暖温带半湿润大陆性季风气候;兰州市依黄河而建,东西黄河穿城而过,南北群山环抱,地势西、南部高,东北低,具有带状盆地城市的特征。

图 6(a)、(b) 分别为西安、兰州 3~5 月 PM_{2.5} 及 AQI 的变化趋势。西安 PM_{2.5} 质量浓度 3、4、5 月的均值分别是 85、63、54 μg/m³ (26~199、34~89、25~112 μg/m³); 兰州 PM_{2.5} 在 3、4、5 月的均值分别是 51、60、58 μg/m³ (27~79、22~254、30~271 μg/m³)。3、4、5 月西安和兰州的 AQI 值范围分别为: 74~270、55~183、60~236 μg/m³ 和 65~146、43~347、56

~337 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,通过对西安和兰州空气质量等级进行分析,发现3月份污染较4、5月份严重,与3月处于采暖期有关。

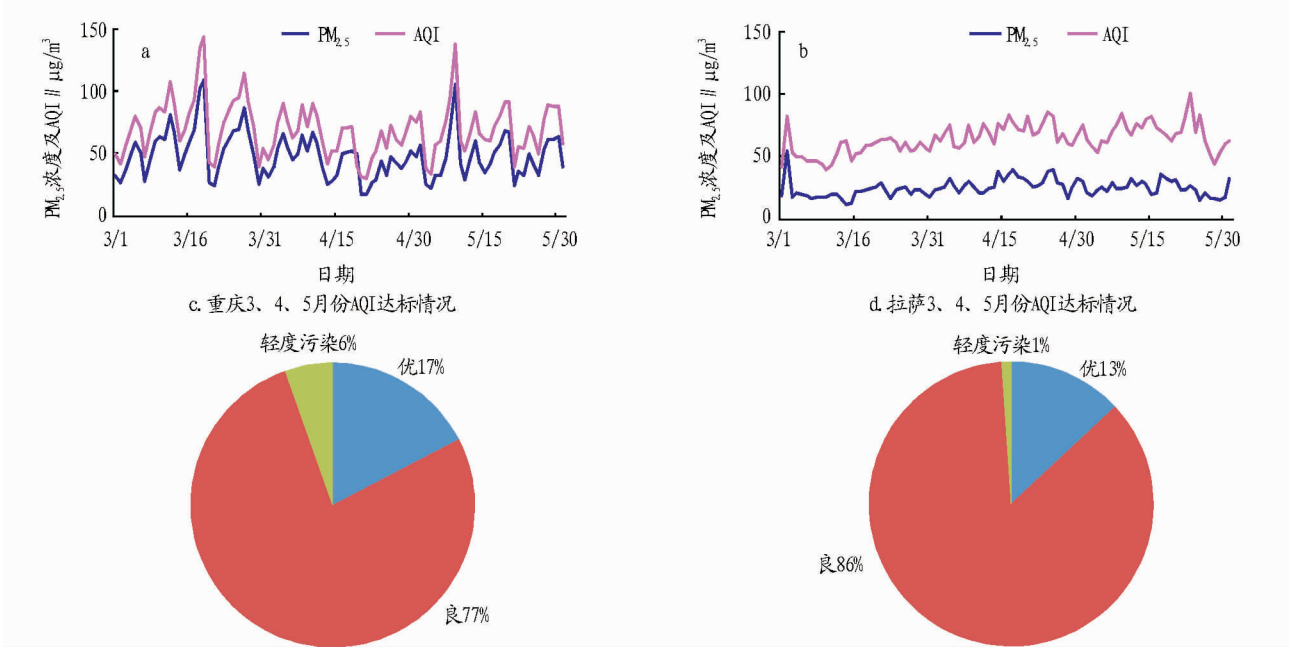


图5 重庆(a)和拉萨(b)3~5月 $\text{PM}_{2.5}$ 趋势变化及AQI达标情况(c-d)

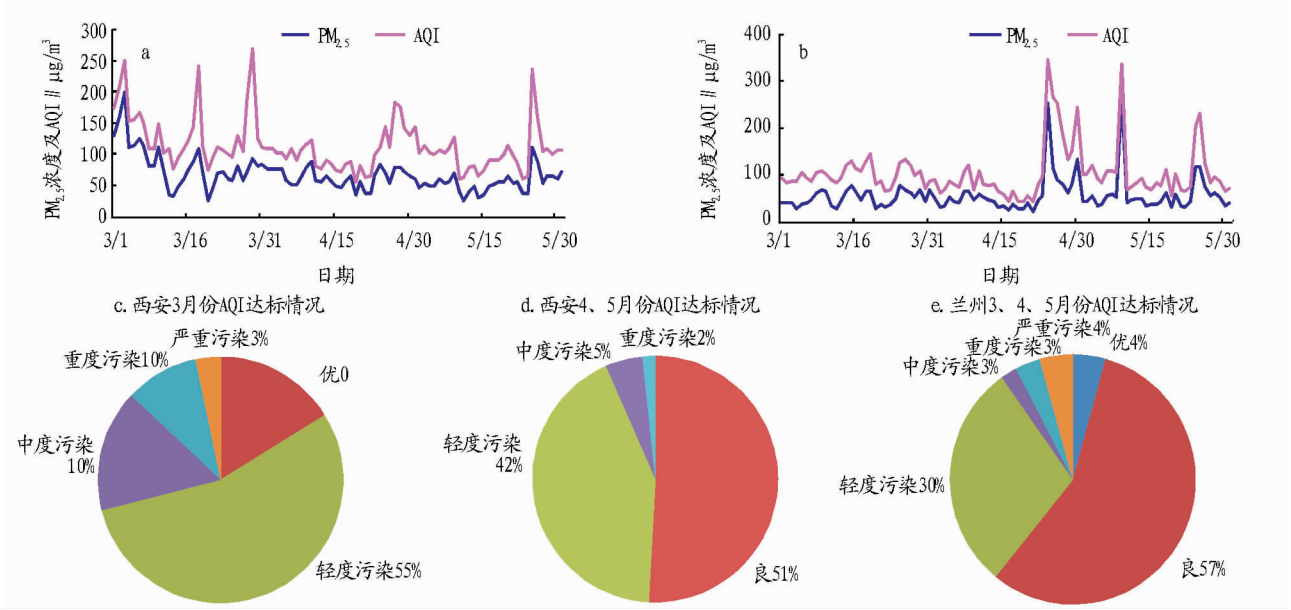


图6 西安(a)和兰州(b)3~5月 $\text{PM}_{2.5}$ 趋势变化及AQI达标情况(c-e)

西安市是煤烟型城市,3月份污染较4、5月份严重,与3月处于采暖期直接相关;春季风沙较大,受来自北部黄土高原和荒漠草原扬尘和尘暴天气的影响,能见度降低;城市工业企业排放废气、机动车尾气也是其空气污染严重的主要原因。兰州大气污染呈工业、煤烟、扬尘及机动车尾气混合型污染特征;春季以沙尘浮尘等输入性污染为主,盆地地形使污染物在阴天不易扩散,是造成空气质量差的重要原因。4月下旬、5月上旬出现几次污染严重的浮尘天气,气象条件均为北风3~4级,因此可判断为沙尘从隔壁荒漠区吹入,造成空气质量急剧降低,并在之后几日影响了西安等地的空气质量,因此进行防风固沙是改善兰州空气质量的最有效地方法

之一。综上,西北地区春季受风沙影响较大,且主要产业为煤烟型重工业,因此整体空气质量较差,护林防沙、产业结构改革是其改善空气质量的必行之路。

2.1.7 全国 $\text{PM}_{2.5}$ 的分布状况。图7为全国各地区春季 $\text{PM}_{2.5}$ 均值分布情况,从图中可以看出沿海城市 $\text{PM}_{2.5}$ 质量浓度总体低于内陆,华北地区尤其偏高;南方地区春季 $\text{PM}_{2.5}$ 无明显变化趋势,而北方地区普遍呈下降趋势,主要是北方地区受采暖区影响。

2.2 特殊城市 $\text{PM}_{2.5}$ 分布特征及其影响因素

2.2.1 沿海城市、内陆城市和西北城市对比。总体来说,春季空气质量状况沿海(广州、厦门) > 西北(兰州、西安) > 内陆

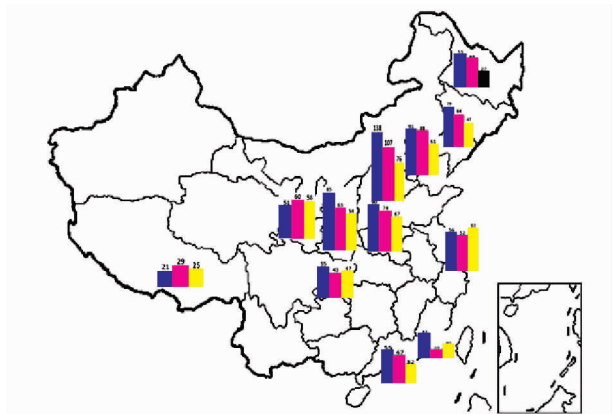


图7 全国3~5月PM_{2.5}均值分布

(北京、郑州)。广州的两次轻度污染天气均出现在连续两日的阴且无风天气之后,除此之外空气质量整体良好,沿海的有利条件明显显现;西北地区沙尘是影响其空气质量的一个重要的地域性因素,兰州空气质量整体良好,只有4月下旬、5月上旬出现3次浮尘天气,主要是由于北风较大,将荒漠化的土地沙尘吹入兰州境内;北京、郑州较之广州、兰州,空气状况整体较差,轻度污染和中度污染天气占将近一半,一定程度上代表了内陆城市的能源结构导致的空气质量状况差。

2.2.2 旅游城市、工业城市和交通枢纽城市对比。选取厦门、沈阳、郑州分别作为旅游、工业、交通枢纽的代表城市。厦门作为旅游城市,采取一系列措施对重污染工企业、机动车等严格控制,因此空气质量极佳;沈阳作为东北老重工业基地,周围分布着钢铁基地、煤炭基地、石油基地,因此空气质量较差,4月中旬后空气质量好转,主要由于采暖期结束,污染源减少;郑州是中国重要的铁路、航空、高铁、高速公路、电力主枢纽,是中原经济区的中心城市,有研究表明,SO₄²⁻、NO₃⁻和NH₄⁺是颗粒物中浓度最高的3种水溶性离子,占PM_{2.5}总质量的43%左右,春季污染源的来源较多,多环芳烃的来源则主要是燃煤和机动车混合污染^[13]。

2.2.3 典型城市。选取北京、上海、广州这3个典型城市进行PM_{2.5}分布特征分析,结果如图8所示。京沪穗由于地理位置不同,PM_{2.5}浓度差异较大,3个城市春季的PM_{2.5}浓度均值分别为80,57,45 μg/m³。

京沪穗是中国经济实力最强的3个城市,因此提供了大量的工作机会,也因此人口密度剧增,进而带来更多的污染,工业企业排放废气、汽车尾气、取暖等都对PM_{2.5}有巨大贡献值。但由于这3个城市还是中国三大国际航空枢纽机场城市,故其空气质量尤为重要,政府部门采取了大量措施来减轻其污染程度,尤其是北京,近些年发布了大量条例法规来改善空气质量,并取得了一定的成效。

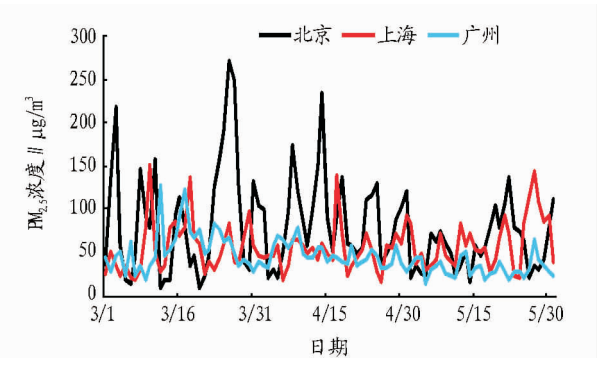


图8 京沪穗3~5月PM_{2.5}趋势变化

3 结论

- (1)各地区城市PM_{2.5}污染特征及空气质量状况具有明显的差异,而同一地区由于具有相近的地形、气候、地理位置,也表现出一定的相似性。
- (2)春季北方城市由于采暖,空气质量总体较差,采暖期结束后,除了受沙尘暴影响较大的兰州等地区,绝大部分地区5月空气质量明显好转。
- (3)沿海地区城市空气质量总体优于内陆及西北地区,其PM_{2.5}质量浓度显著低于其他城市($P < 0.05$)。
- (4)PM_{2.5}会对人体健康和生态环境产生危害和潜在风险,因此应根据各地区不同城市PM_{2.5}污染特征及来源,针对性地采取措施,最大程度上降低PM_{2.5}的质量浓度,从根本上改善大气环境质量。

参考文献

[1] 闫向阳,杜刚. 沈阳市环境空气颗粒物分布特征及重金属污染状况分析[J]. 环境保护科学,2007,33(3):20-22.

[2] 吴兑,刘啟汉,梁延刚,等. 粤港细粒子(PM_{2.5})污染导致能见度下降与灰霾天气形成的研究[J]. 环境科学学报,2012,11:2660-2669.

[3] PENNER J E,DONG X Q,CHEN Y. Observational evidence of a change in radiative forcing due to the indirect aerosol effect[J]. Nature,2004,427(6971):231-234.

[4] MENON S,HANSEN J,NAZARENKO L,et al. Climate effects of black aerosols in China and India[J]. Science,2002,297(5590):2250-2253.

[5] 杨复沫,马永亮,贺克斌. 细微大气颗粒物PM_{2.5}及其研究概况[J]. 2000(4):32-34.

[6] HORVATH H. Proceedings of the conference on visibility and fine particles[J]. Atmospheric Environment,1994,28(5):755-1082.

[7] 刘辉,贺克斌,马永亮,等. 2008年奥运前后北京城、郊PM_{2.5}及其水溶性离子变化特征[J]. 环境科学学报,2011,31(1):177-185.

[8] 樊文雁,胡波,王跃思,等. 北京雾、霾天细粒子质量浓度垂直梯度变化的观测[J]. 气候与环境研究,2009,14(6):631-638.

[9] 北京市2012年国民经济和社会发展统计公报[R]. 2012.

[10] 陈媛,岑况,NORRA S,等. 北京市区大气气溶胶PM_{2.5}污染特征及颗粒物溯源与追踪分析[J]. 现代地质,2010,24(2):345-354.

[11] 徐敬,丁国安,颜鹏,等. 北京地区PM_{2.5}的成分特征及来源分析[J]. 应用气象学报,2007,18(5):645-654.

[12] 吕森林,陈小慧,吴明红,等. 上海市PM_{2.5}的物理化学特征及其生物活性研究[J]. 环境科学,2007,28(3):472-477.

[13] 吴瑞杰. 郑州市大气颗粒物PM_{2.5}和PM₁₀的特性研究[D]. 郑州:郑州大学,2011:48-65.

(上接第7556页)

[7] 薛泉,王松,项军,等. 基于 ZigBee 的木质卡板监控系统:中国,200920205453[P]. 2009.

[8] 李迎春,朱诗斌,陈刚. 无线传感器网络体系结构严谨[J]. 山西电子技术,2009(4):71-73.

[9] 李大成,张京,龚茗茗. 无线传感器网络及其应用综述[J]. 成都电子科技大学学报,2007(3):10-14.

[10] 赵磊. 基于物联网感知层的无线传感器网络融合的研究[D]. 沈阳:辽宁大学,2013.