

2013—2014年我国大气污染物的时空分布特征及 SO₂质量浓度年代际变化

李景鑫¹, 陈思宇², 王式功^{3,4}, 谢亭亭², 张震², 樊威伟²

(1. 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081; 2. 兰州大学大气科学学院, 兰州 730000;
3. 成都信息工程大学大气科学学院, 成都 610225; 4. 成都信息工程大学环境气象与健康研究院, 成都 610225)

摘要:为了解我国大气污染物在不同季节的时空分布特征,统计并分析了20世纪80年代—21世纪10年代中国环境监测总站发布的大气污染物质量浓度监测资料。结果表明:2013年11月—2014年10月PM_{2.5}和SO₂全国平均质量浓度的季节变化较明显,冬季浓度最高;同期各个季节我国北方城市PM_{2.5}和SO₂平均质量浓度明显大于南方,冬季最显著,但1984年和1994年则表现为南方城市SO₂平均质量浓度高于北方城市。1984年、1994年、2014年这3年相比较,SO₂全国平均质量浓度逐年降低。工业排放、取暖季燃煤以及不同地区的局地地理环境、经济发展状况、能源结构、空气污染防治、气象条件的差异等是区域污染特征形成的主要原因。

关键词:环境地学; 污染物质量浓度; 空间分布; 季节差异; 年代际变化

中图分类号: X511

文献标志码: A

文章编号: 2095-2783(2017)03-0336-10

Characteristics of temporal and spatial distribution of air pollutants over China during 2013—2014 and interdecadal variation of SO₂ mass concentrations

LI Jingxin¹, CHEN Siyu², WANG Shigong^{3,4}, XIE Tingting², ZHANG Zhen², FAN Weiwei²

(1. State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China; 2. College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China;
3. College of Atmospheric Sciences, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China; 4. Environmental Meteorology and Health Institute, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225, China)

Abstract: To realize the characteristics of temporal and spatial distribution of atmospheric pollutants in different seasons in China, the daily air pollution monitoring data of the national environmental monitoring station (1980s—2010s) is analyzed. The results show that: seasonal variation of the nationwide average mass concentration of PM_{2.5} and SO₂ during November 2013 to October 2014 is relatively obvious, which is the highest in winter; in different seasons of the corresponding period, average mass concentrations of PM_{2.5} and SO₂ in the northern cities of China are significantly greater than those in the south, which is the most significant in winter, but it is the opposite in 1984 and 1994. Among 1984, 1994 and 2014, the nationwide average mass concentration of SO₂ decreases year by year. The main reasons for the regional pollution characteristics are industrial emission, heating season coal and local geographical environment, economic development, energy structure, air pollution control, and weather conditions.

Keywords: environmental geoscience; pollutants mass concentration; spatial distribution; seasonal differences; interdecadal variation

近年来,我国国民经济飞速发展,工业化和城镇化进程加快。随之而来的大气污染问题日趋严重,雾霾天气发生频次明显增多^[1-2]。空气污染已影响了我国社会经济可持续发展,引起了各级政府、科技界和广大民众的广泛关注^[3]。大气污染物的时空分布特征及成因等是亟待解决的关键科学问题^[4-8],其相关研究直接面向国家需求,需要人们深入地了解和认知。

大气污染物时空分布特征分析是1项基础性研究工作^[9-12]。王玮等^[13]分析了1988—1996年包括

北京在内的中国6个城市的PM_{2.5}污染特征,发现这6个城市的PM_{2.5}污染有逐年加重的趋势。孙炳彦等^[14]对比分析了南北方城市2004—2006年的空气质量,发现南方城市空气质量优于北方城市。王勇等^[15]研究了地表气态污染物(SO₂、NO₂、CO)在少雨的秋、冬、春3季也会形成地表霾天气。然而,由于以往监测站点在省会级城市偏多,地市级城市偏少,并且定义的空气污染指数(air pollution index, API)中只含有SO₂、NO₂、PM₁₀这3项污染物的质量浓度指标^[16-17],因此不能很好地反映大气中的光化学污

收稿日期: 2016-09-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41405003); 中央高校基本科研业务费专项资金资助项目(lzujbky-2016-ct04); “十三五”国家重点研发计划项目(2016YFA0601501)

第一作者: 李景鑫(1984—),女,助理研究员,主要研究方向为空气污染与气候变化

通信作者: 陈思宇,讲师,主要研究方向为空气污染、沙尘气溶胶的数值模拟, chensiyu@lzu.edu.cn

染程度(如O₃)及细颗粒物PM_{2.5}质量浓度。PM_{2.5}表示粒径小于/等于2.5 μm悬浮在空气中的大气颗粒物。这些颗粒物是大量微小尘粒、烟粒、盐粒的集合体。颗粒物粒径越小,其沉降速度也越小。因此,PM_{2.5}不易沉降,可使空气混浊,水平能见距离显著下降,造成雾霾等天气现象^[18]。PM_{2.5}的质量浓度及其维持时间是判断雾霾天气的重要指标。2012年上半年出台的新的空气质量指数(air quality index, AQI)在API的基础上增加了PM_{2.5}、O₃、CO这3种污染物指标,相较于API具有标准更严、污染物指标更多等优点,其评价结果也更为客观^[19]。将细颗粒物(PM_{2.5})列入常规观测项目,并在全国范围展开监测,增大了监测数据的空间密度,使得监测数据更具代表性,更有利于研究我国PM_{2.5}质量浓度的时空分布特征。在1984—2014年这30 a间,虽然对气态污染物SO₂进行了长期的监测,但对其年代际变化的比较研究尚未开展。基于此,本文利用中国环境监测总站发布的大气污染物质量浓度监测资料^[20],分析了我国颗粒污染物(PM_{2.5})和气态污染物(SO₂、NO₂)的时空分布特征,并给出了SO₂质量浓度的年代际比较。研究目的在于探究2014年我国细颗粒污染物及主要气态污染物的季节变化、区域差异以及南北方城市SO₂质量浓度的年代际变化特征,为研究大气污染物来源及合理减排提供科学依据。

1 数据简介

研究使用了2013年11月—2014年10月中国环境监测总站发布的大气污染物质量浓度监测资料、1984年和1994年全国89个重点城市SO₂质量浓度年均值^[20]、以及东亚模式比较计划第3期(MICS—Asia III)和联合国半球大气污染传输计划(Hemispheric Transport of Air Pollution, HTAP)开发的2010年亚洲人为源排放清单^[21]。

国家环境监测总站监测项目包括细颗粒物(PM_{2.5})、可吸入颗粒物(PM₁₀)、二氧化硫(SO₂)、二氧化氮(NO₂)、臭氧(O₃)、一氧化碳(CO)6种空气污染组分。由优至劣把空气质量等级划分为优、良、轻度污染、中度污染、重度污染以及严重污染6个等

级,每个等级分别对应为绿色、黄色、橙色、红色、紫色以及黑紫色。

经过数据质量控制,本文选取细颗粒物PM_{2.5}以及气态污染物SO₂和NO₂,计算空间及时间平均值。由于20世纪80年代、90年代监测的总悬浮颗粒物(total suspended particulates, TSP)和氮氧化物(NO_x)与现今监测的PM_{2.5}和NO₂不能一一对应,因此无法给出年代际变化特征,只比较了SO₂的年代际变化。

需要指出的是,由于地域经济发展不均衡等原因,目前我国大气污染物的监测站点分布并不均匀,总体呈现自西向东监测站点密度逐渐增大的特点。本文使用中国环境监测总站发布的大气污染物质量浓度监测资料^[20],计算了每个城市污染物质量浓度的平均值,用其表示该城市的污染状况。

2 污染物时空分布特征及成因

2.1 PM_{2.5}的时空分布特征

省会城市和直辖市作为国家一级行政区的中心,其政治、经济、文化和交通等状况代表了1个省的经济发达程度。省会城市和直辖市的空气污染状况相对具有一定的代表性。通过各省会城市和直辖市PM_{2.5}质量浓度年均值排名、总污染天数排名、严重污染天数排名等可以得到PM_{2.5}污染情况及污染天数特征。

1)省会城市和直辖市PM_{2.5}质量浓度年均值排名情况。图1为2013年11月—2014年10月各省会城市和直辖市PM_{2.5}质量浓度年均值排名。由图1可见,把2014年各省会城市和直辖市PM_{2.5}质量浓度年均值按照日均质量浓度污染指标排列分为3个等级。第1等级的城市只有1个,即石家庄;第2等级的城市有22个;第3等级的城市有8个。石家庄在PM_{2.5}年均质量浓度的排名中位居第1,年均值约为134.5 μg/m³。其它各城市则均在100 μg/m³以下。其中,济南排名第2,天津排名第6,北京排名第8,这3个城市的均值约为88.5 μg/m³,可见京津冀等地区污染较重。除这4个城市外,排名第3—11位的城市主要分布在我国中部和南方山区,其质量浓度年均值为78~92 μg/m³。排名位于最后8位的

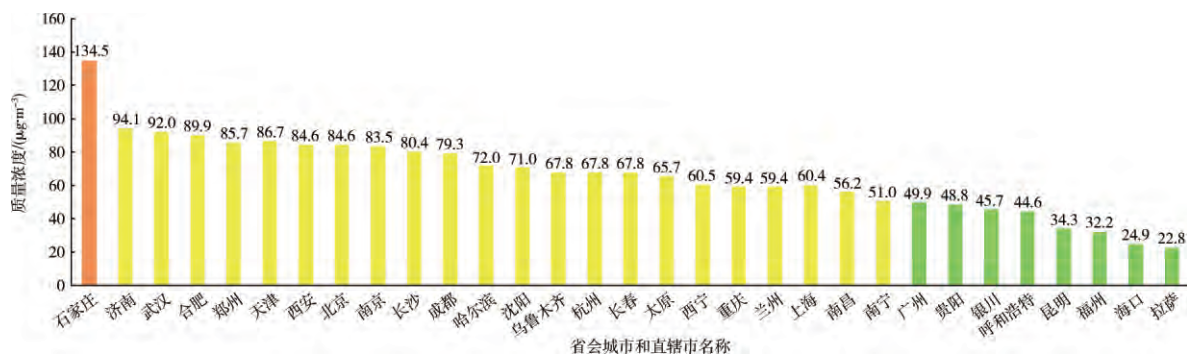


图1 2013年11月—2014年10月中国各省会城市和直辖市PM_{2.5}质量浓度年均值的排名

城市污染程度属于第3等级,主要分布在西部内陆及东南沿海地区,其质量浓度年均值均在 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以下,其中位于西部的拉萨质量浓度最低,年均值约为 $22.8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

2)省会城市和直辖市总污染天数排名情况。在2013年11月—2014年10月期间排名第1的省会城市仍是石家庄,其总污染天数为275 d。排名第2的是济南,污染天数为254 d。其余城市空气污染总天数均小于200 d。排名前10位的城市中有7个城市集中在北方内陆,依次为石家庄、济南、天津、郑州、乌鲁木齐、西安、北京。

3)省会城市和直辖市严重污染天数排名情况。各省省会城市和直辖市中严重污染天数石家庄最多,高达74 d,远远高于排名第2的西安(西安为27 d)。北京和武汉严重污染天数相当,约为26 d,分别排名第3和第4。

此外,在2013年11月—2014年10月期间空气质量较好的城市为拉萨、昆明、海口、福州,轻度污染天数均少于20 d,严重污染和重度污染等级天数为0 d。对比图1可以发现,PM_{2.5}质量浓度年均值较高的城市空气污染天数也较多,PM_{2.5}质量浓度排名前10位的城市基本位于空气污染天数排名的前10位。以上特征说明PM_{2.5}质量浓度年均值较高的城市与其全年严重污染天数较多有关。

除污染天数外,其余天数空气质量等级为AQI指数的1级和2级,分别对应空气质量状况为优和良。石家庄空气达到优良状况的天数全年仅为90 d,不到全年总天数的1/4,西安与北京相当,空气达到优良状况的天数约占全年的47%,天津空气达到优良状况的天数为168 d,约占全年的46%。而拉萨、

昆明、海口等空气质量较好的城市,空气达到优良状况的天数约占全年的85%。

由于石家庄在PM_{2.5}质量浓度年均值和污染天数的排名中均位于第1,说明石家庄是2014年我国省会城市中污染最严重的城市。因此,重点将石家庄的污染状况与历年进行了比较。在2005年—2012年间^[22],石家庄NO₂年均质量浓度的趋势表现为先降低、后升高,在2010年后稳定在40~41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;SO₂年均质量浓度逐年升高,表现为不显著上升趋势,到2012年达到最大值57 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;PM₁₀年均质量浓度表现为显著下降趋势,在2006年达到最高值137 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 之后逐年降低,2010年后稳定在97~99 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。与往年的污染情况对比可见,在2013年11月—2014年10月期间,石家庄NO₂年均质量浓度为55 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、SO₂年均质量浓度为72.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 、PM₁₀年均质量浓度为235 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。这说明与2005—2012年相比,在2013年11月—2014年10月期间石家庄各污染物年均质量浓度均有较大的增幅。但这并不代表2014年京津冀地区较往年严重。如北京SO₂、NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}年均质量浓度在2013年11月—2014年10月期间分别为21.0、53.7、113.5、82.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,与2013年^[23]相比,SO₂低于2013年的年均值(28.5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$),主要体现在2014年冬季1月份(50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)比2013年冬季1月份月均质量浓度(100.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$)明显降低,其余各月质量浓度值较为接近。北京其他污染物,如NO₂、PM₁₀、PM_{2.5}2013年年均质量浓度分别为56.6、125.0、99.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均高于在2013年11月—2014年10月期间的质量浓度值。

图2为全国PM_{2.5}质量浓度不同季节的空间分

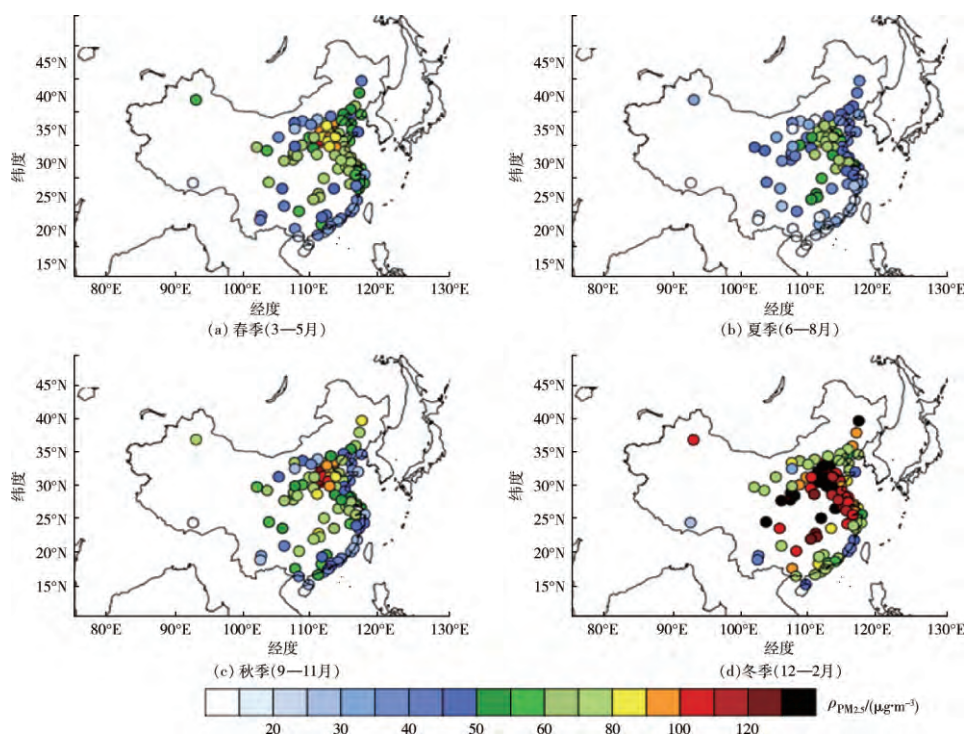


图2 2013年11月—2014年10月我国不同季节PM_{2.5}质量浓度的空间分布特征

布特征。由图 2 可见,我国 PM_{2.5} 质量浓度 2014 年全年平均值为 55 μg/m³,夏季平均质量浓度最低,为 36 μg/m³;春季和秋季 PM_{2.5} 质量浓度水平比较接近,平均值分别为 67 μg/m³ 和 62 μg/m³;冬季 PM_{2.5} 质量浓度均值最高,为 102.8 μg/m³。其中,污染最为严重的是京津冀地区,其 PM_{2.5} 质量浓度平均值在冬季达 106 μg/m³,约为《环境空气质量标准》年均值 2 级标准限值($\rho_{PM_{2.5}} \leq 35 \mu g/m^3$)的 3 倍。

此外,在 2013 年 11 月—2014 年 10 月期间,我国 PM_{2.5} 质量浓度的空间分布存在明显的区域性差异。全年 PM_{2.5} 高值区主要集中在京津冀地区以及华中、关中、东北、四川盆地、长江三角洲等地区,其中京津冀地区最为严重。石家庄在各季节的 PM_{2.5} 质量浓度值均高于其他城市,冬季平均质量浓度最高,达到 230 μg/m³,远高于其他城市的质量浓度值(约 100 μg/m³);春、夏、秋季高于其他城市的质量浓度值约为 20 μg/m³。在各个季节,PM_{2.5} 质量浓度低值区主要分布在东南沿海地区、西南地区 and 青藏高原等地。其中海口质量浓度最低,春、夏、秋季平均值低于 10 μg/m³,冬季平均值低于 48 μg/m³。综上所述,以 33.5°N 为界,将全国 114 个重点城市划分为 59 个南方城市和 55 个北方城市,分别计算南、北方城市 PM_{2.5} 质量浓度的季节平均值与年平均值(见表 1)。由表 1 可见,北方城市在各个季节平均质量浓度均大于南方城市,冬季差值最大,为 28.8 μg/m³,夏季差值最小,为 14.9 μg/m³。由此可见,中国北方城市 PM_{2.5} 在各个季节造成的空气污染程度大于南方城市。

2.2 SO₂ 和 NO₂ 的时空分布特征

气态污染物的成分主要为硫氧化物(以 SO₂

表 1 在 2013 年 11 月—2014 年 10 月期间,南方、北方城市 PM_{2.5} 质量浓度均值季节特征对比 μg/m³

季节	北方城市	南方城市	差值	全国城市
冬季	116.7	87.9	28.8	102.30
春季	67.3	50.8	16.5	59.05
夏季	52.0	37.1	14.9	44.55
秋季	69.6	51.3	18.3	60.45
年均	76.0	56.8	19.2	66.40

为主)、氮氧化物(以 NO₂ 为主)、碳氧化物(以 CO 为主)以及碳氢化合物^[24]。虽然气态污染物的含量远远低于颗粒物,但微量气态污染物即会对人体健康造成非常严重的危害^[25]。图 3 和图 4 分别给出了在 2013 年 11 月—2014 年 10 月期间,我国 SO₂ 和 NO₂ 质量浓度均值的季节变化特征。

由图 3 可以发现,SO₂ 质量浓度的季节分布特征与 PM_{2.5} 相似,即各地区质量浓度均在冬季达到最高值,春、秋季次之,夏季最低。其中,以宜宾、贵阳、重庆为代表的西南高硫煤地区的城市(冬季均值为 72 μg/m³,夏季均值为 42 μg/m³)和北方能源消耗量大的山西、山东、河北、辽宁、内蒙古及河南、陕西部分地区的城市质量浓度平均值(冬季均值为 76 μg/m³,夏季均值为 48 μg/m³)冬、夏差异最为显著。另一方面,在各个季节,SO₂ 质量浓度的地理分布与 PM_{2.5} 也一致,即北方城市 SO₂ 平均质量浓度高于南方城市。在冬季,一半以上的北方城市和三分之一的南方城市 SO₂ 质量浓度均值超过国家 2 级标准(60 μg/m³)。北方城市冬季均值为 72 μg/m³,南方城市冬季均值为 60 μg/m³。

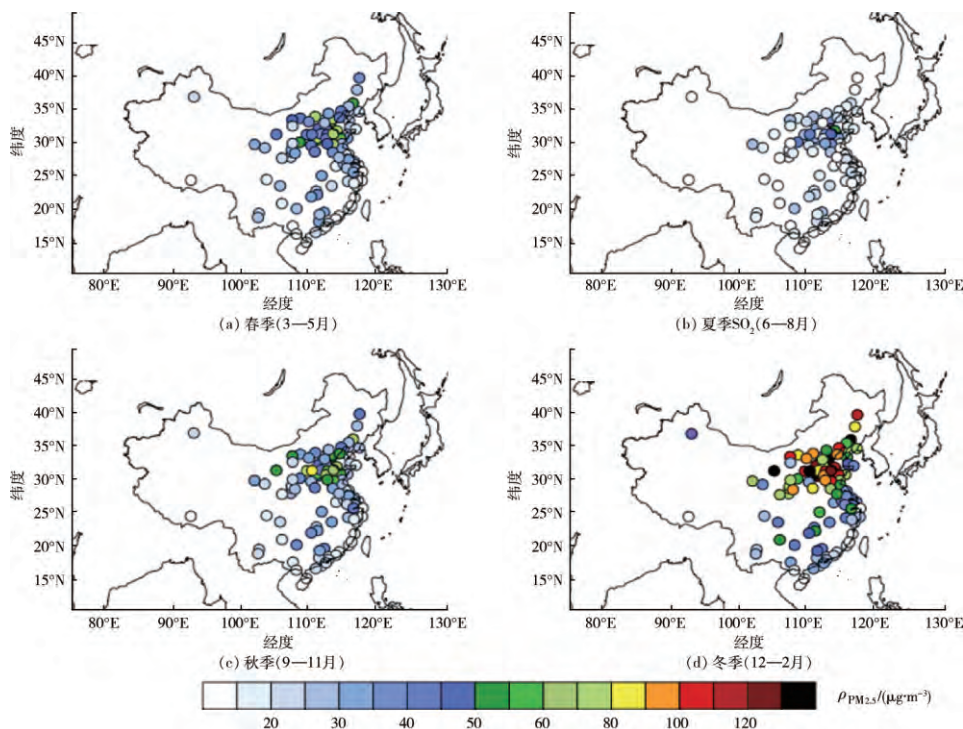


图 3 2013 年 11 月—2014 年 10 月我国 2014 年不同季节 SO₂ 质量浓度的空间分布特征

由图 4 可见,在 2013 年 11 月—2014 年 10 月期间,全国城市 NO_2 平均质量浓度季节性差异不明显,春、夏、秋、冬这 4 个季节平均值分别为 35、28、39、43 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。省会城市 NO_2 平均质量浓度的逐月变化不

显著,仅在冬季质量浓度稍有升高。与 $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 质量浓度在冬季的增幅相比, NO_2 质量浓度冬季增幅较小;在同一季节, NO_2 质量浓度的空间分布差异也较小。

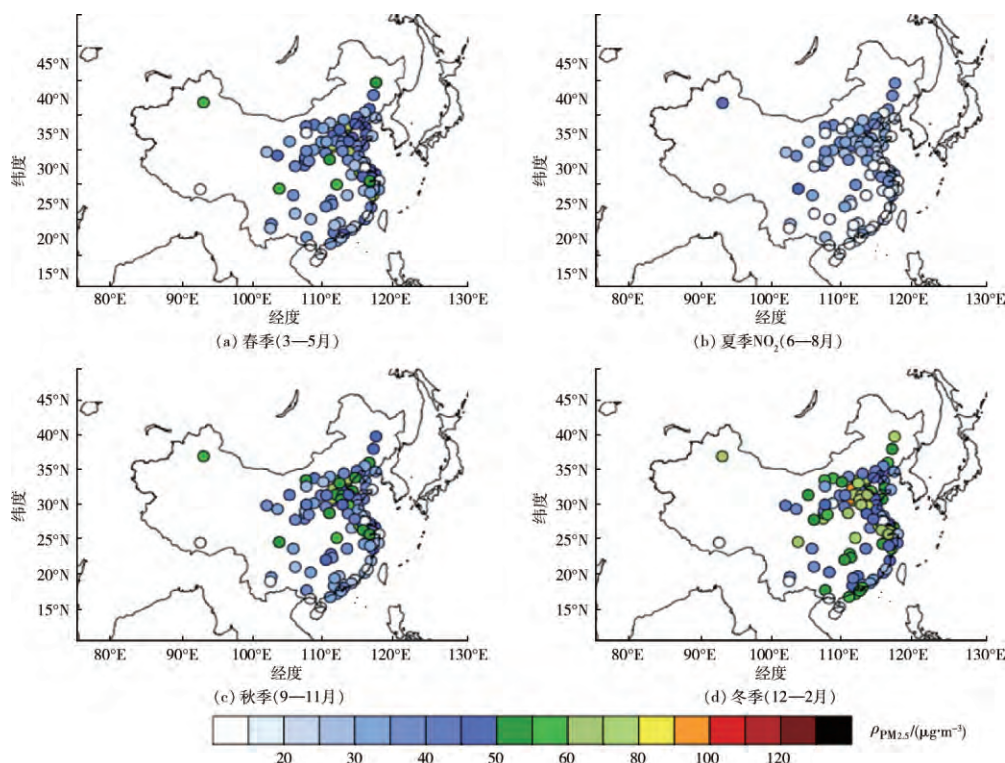


图 4 2013 年 11 月—2014 年 10 月我国不同季节 NO_2 质量浓度的空间分布特征

2.3 SO_2 质量浓度年代际变化

由于 20 世纪 80 年代和 90 年代监测的总悬浮颗粒物(TSP)和氮氧化物(NO_x)与现今监测的细颗粒物 $\text{PM}_{2.5}$ 以及 NO_2 不能一一对应,无法比较,仅对 SO_2 的质量浓度进行了持续的监测,因此统计出 SO_2 质量浓度的年代际变化特征见表 2、表 3。由表 2 可见,1984 年全国共 40 个城市有 SO_2 监测,其质量浓度年均值为 107.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;其中,北方 25 个城市 SO_2 质量浓度年均值为 100.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,南方 15 个城市 SO_2 质量浓度年均值为 117.3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,南方城市平均质量浓度高于北方城市 16.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 。1994 年全国 SO_2 监测增加到 75 个城市,其年均质量浓度值为 99.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,比 1984 年降低了 6.9%,其中,北方 38

个城市年均值为 96.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,南方 37 个城市年均值为 102.4 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,分别比 1984 年降低了 3.84% 和 12.7%,可见南方城市降幅明显大于北方。到 2014 年,全国 SO_2 监测增加至 97 个城市,其年均质量浓度值为 37.9 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,比 1994 年又降低了 61.9%;其中,北方 50 个城市年均值为 52.7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,南方 47 个城市年均值为 23.1 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,与 1994 年相比,北方城市平均质量浓度降低了 45.6%,而南方城市平均质量浓度降低 77.4%,由于南方城市 SO_2 平均质量浓度的大幅度降低,使得上世纪 SO_2 质量浓度南高北低的局面转变为目标北方城市平均质量浓度明显比南方城市高出 1 倍多的状况。

表 2 北方、南方城市 SO_2 质量浓度年均值特征对比

年份	北方城市		南方城市		南、北方城市差值	全国城市	
	SO_2 平均质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	年代际变化率/%	SO_2 平均质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	年代际变化率/%	SO_2 平均质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	SO_2 平均质量浓度/ $(\mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	年代际变化率/%
1984 年	100.7	—	117.3	—	16.6	107.0	—
1994 年	96.9	3.84	102.4	12.7	5.5	99.6	6.9
2013 年 11 月— 2014 年 10 月	52.7	45.60	23.1	77.4	-29.6	37.9	61.9

其中 29 个城市从 1984—2014 年有持续监测数据,北方城市为 16 个,南方城市为 13 个。统计得出

这 29 个城市的 SO_2 质量浓度年均值特征,如表 3 所示。1994 年与 1984 年相比,北方有 44% 城市的 SO_2

质量浓度升高,其余城市质量浓度降低,而南方只有31%的城市SO₂质量浓度升高。从SO₂质量浓度平均值来看,北方城市1994年的平均质量浓度高于1984年,而南方城市则下降了6%。到2014年,南方城市质量浓度值均低于1994年与1984年,且平均质量浓度与1994年相比,降低了81%。而北方城市中,淄博1994年SO₂质量浓度均值约是1984年的8.6倍,到2014年继续增长至128 μg/m³;徐州和银

川1994年SO₂质量浓度均值较1984年比有所降低,但在2013年11月—2014年10月期间又开始升高。其中银川2014年SO₂的质量浓度均值甚至超过了1984年。其余北方城市2014年的SO₂污染均得到了改善,质量浓度值低于1984年和1994年水平。从平均值来看,2014年SO₂的质量浓度均值与1994年相比,减小了51%。

表3 29个城市的SO₂质量浓度年均值特征对比

北方城市							μg/m ³
	1984年	1994年	2013年11月— 2014年10月	南方城市	1984年	1994年	
北京	87	110	20	上海	94	74	20
天津	202	94	53	武汉	69	38	36
沈阳	119	114	76	重庆	307	330	26
西安	109	52	34	南京	83	49	27
长春	67	74	38	成都	82	57	19
济南	180	216	71	昆明	82	72	20
太原	170	256	67	长沙	109	79	25
青岛	241	215	37	杭州	82	121	21
淄博	14	121	128	南昌	62	74	27
郑州	84	67	47	贵阳	363	451	23
石家庄	198	175	73	福州	93	67	9
唐山	84	157	77	南宁	142	74	18
包头	93	136	59	温州	52	39	16
徐州	87	17	41	平均值	125	117	22
银川	50	43	63				
秦皇岛	65	59	55				
平均值	116	119	59				

2.4 污染成因分析

2.4.1 污染源

1) 工业

图5为我国南、北方人为污染源比例图。由图5可见,我国大气污染物主要来自工业端排放,且4大污染排放源依次为工业、电力、居民和交通。SO₂工业端排放污染物占总量的比例,北方为55%,南方为62%。PM_{2.5}工业端排放污染物占总量的比例,北方为52%,南方为47%。

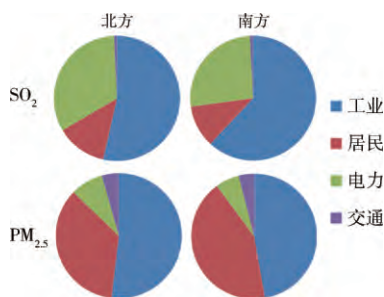


图5 我国南、北方人为污染源比例

2010年,北方城市工业锅炉燃煤排放SO₂约1 000万t、NO_x约200万t。2000—2011年,中国工业废气排放量年均增速为19.06%,由2000年的

138 145亿标准立方米增长至2011年的674 509亿标准立方米,11 a间增长了2.39倍。据统计,中国北方地区能源消耗显著增加,山东和京津冀地区污染排放量较大,其中消耗能源最多的城市是石家庄,其年耗煤量高达2 390万t,按照石家庄环保局提供的数据,2012年市区大气降尘量月平均值高达16.91 t/km²。事实上,历年来石家庄污染排放量均相对较大,而东南沿海地区主要以旅游业和进出口贸易为主,污染物排放相对较低。而SO₂质量浓度年代际比较结果显示,1984年南方城市SO₂平均质量浓度高于北方城市(正如2.3节中的表2、表3所示),说明改革开放初期南方经济发展快、能源消耗量大,造成SO₂污染比北方严重^[26]。到2014年,南方城市与北方城市相比,其SO₂平均质量浓度减小的速度更快,见表2和表3,说明南方城市治理大气污染的力度大于北方城市^[27]。

2) 居民和电力

表4和表5分别为2010年SO₂和PM_{2.5}排放清单。由表4和表5可见,北方SO₂和PM_{2.5}平均排放总量大于南方。位于SO₂工业端排放量之后的第2和第3大排放源是电力和居民排放。山东、山西和贵州电力排放SO₂大于居民排放量,均值>500×10³t;而这3个城市PM_{2.5}排放则表现为居民排

放量大于电力排放。其中,四川和京津冀地区居民排放 $\text{PM}_{2.5}$ 大于 $350 \times 10^3 \text{ t}$ 。京津冀地区人口密集,城市化建设加速,由此带来了严重的空气污染^[28-29],居民和电力排放很大程度上来自于冬季采暖期燃煤^[30]。石家庄冬季采暖消耗的化石燃料较多,化石燃料燃烧、废弃排放颗粒物成为冬季大气颗粒污染物的主要成分^[31]。秋季农田秸秆焚烧使得秋季

$\text{PM}_{2.5}$ 的质量浓度也相对较高^[32]。前文的研究结果显示,2014年,以湖北、贵州、四川为代表的西南高硫煤地区的城市及北方能源消耗量大的山东、山西、河北、河南、内蒙古、陕西及辽宁部分地区的城市, $\text{PM}_{2.5}$ 和 SO_2 质量浓度的冬夏差异最为显著,见表1、图2和图3,这与排放清单显示的结果一致。

表4 2010年 SO_2 排放清单 10^3 t

北方城市	工业	电力	居民	交通	总量	南方城市	工业	电力	居民	交通	总量
山东	1 981	788	280	23	3 072	湖北	1 512	193	299	8	2 011
山西	982	733	390	8	2 113	贵州	442	689	409	3	1 542
京津冀地区	1 269	407	308	25	2 010	江苏	867	465	23	15	1 370
河南	958	597	97	15	1 667	四川	814	295	133	8	1 250
内蒙古	575	528	458	8	1 568	重庆	878	187	177	4	1 245
陕西	481	448	192	6	1 126	广东	744	332	26	16	1 118
辽宁	687	300	58	9	1 053	湖南	632	145	150	7	934
新疆	348	168	48	4	569	广西	459	195	32	5	691
黑龙江	322	146	29	7	503	云南	358	229	90	6	682
吉林	306	109	46	5	465	浙江	327	270	13	11	621
宁夏	232	152	27	1	411	安徽	346	145	44	9	544
甘肃	137	155	55	4	351	江西	296	173	44	6	519
青海	14	27	9	1	51	福建	366	95	28	5	493
西藏	0	0	0	1	1	上海	322	92	21	4	439
平均值	592	326	143	8		港澳台地区	30	28	2	3	63
百分比	55%	34%	13%	0.8%	1 069	海南	32	20	1	1	54
						平均值	471	200	83	7	761
						百分比	62%	26%	11%	1%	

表5 2010年 $\text{PM}_{2.5}$ 排放清单 10^3 t

北方城市	工业	居民	电力	交通	总量	南方城市	工业	居民	电力	交通	总量
山东	643	322	90	64	1119	四川	292	410	19	15	736
京津冀地区	634	354	62	50	1100	江苏	330	171	71	36	608
河南	512	265	55	40	873	湖北	273	269	18	19	578
山西	398	185	57	17	656	安徽	209	296	31	23	558
辽宁	276	171	46	22	516	广西	209	276	10	12	506
内蒙古	183	210	71	20	483	湖南	259	182	15	15	471
黑龙江	112	206	42	14	373	广东	221	146	49	25	441
陕西	141	166	25	15	347	贵州	122	249	20	6	397
吉林	124	141	28	11	304	云南	176	146	15	11	349
新疆	109	86	27	9	231	浙江	170	45	51	17	283
甘肃	90	108	15	8	221	江西	148	81	14	13	256
宁夏	48	19	14	3	83	重庆	112	121	11	8	252
青海	38	22	3	2	65	福建	112	56	17	10	194
西藏	2	3	0	1	6	上海	80	10	15	7	112
平均值	236	161	38	20	455	海南	12	16	2	2	32
百分比	52%	35%	9%	4%		港澳台地区	9	3	0	5	17
						平均值	153	138	20	13	324
						百分比	47%	43%	6%	4%	

3) 交通

NO_2 等污染物除了作为燃煤产物外,还主要来源于机动车尾气排放。研究表明,我国机动车保有量逐年增加^[33]。在2013年11月—2014年10月期间,北京、天津各季节的 NO_2 质量浓度都较高,见

图4。这是由于北京、天津这2个城市经济发展程度较高,机动车保有量较大^[34]。河南、郑州的机动车数量也较大(到2013年,数量突破210万辆,平均每4人1辆车),因此2014年重度污染天数多于北京。 SO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 来自于交通污染源的排放量较少。

4) 外来污染物的输送

污染严重地区的污染物有时还来自于周边地区的输送。研究表明,河北、河南和山西西部等地的污染物输送到北京,对北京空气质量造成了严重影响^[35]。

2.4.2 气象条件的影响

北方冬季空气重污染的主要特征表现为污染物PM_{2.5}和SO₂在静稳条件下的持续累积。京津冀地区除了污染排放量较大以外,大气静稳条件也不利于污染物扩散。石家庄在冬季各污染物的质量浓度均为最高值,尤其是PM_{2.5}冬季平均质量浓度达到230 μg/m³,而春、夏、秋3季各污染物的平均质量浓度值均较低,尤其是CO和NO₂,见图2—图4。造成污染物季节差异的主要原因除了冬季燃煤之外,气象条件的影响也是很重要的因素:冬季天气干燥少雨、静风天气多,逆温天气频繁,使得机动车、燃煤等排放物难以扩散^[36];春季的沙尘天气,使得PM_{2.5}的质量浓度也相对较高^[37-38];夏季雨水充沛,对污染物的湿清除作用降低了该时段的PM_{2.5}质量浓度^[39]。

2.4.3 地形的影响

地形也是影响污染物扩散和积聚的重要因素。石家庄周边特殊的地形是决定该地区PM_{2.5}质量浓度高于其他地区的主要原因之一。夏季,在东南风的作用下,随风西移的污染物受到太行山的阻挡;冬季,来自西伯利亚的强冷空气也被太行山拦截。因此,冬、夏季节石家庄境内的大气污染物均不易被扩散而大量积聚。而东南沿海地区在海滨条件下,多为海陆风环流,地形和气象条件均为污染物的扩散、稀释起到了重要作用。西南地区(多丘陵地貌)和青藏高原则在复杂地形和边界层湍流特性的影响下,地面年平均风速较大,因此有利于污染物扩散^[40-41],这与图2—图4显示的结果相符。

3 结 论

利用中国环境监测总站发布的大气污染物质量浓度监测资料,分析了在2013年11月—2014年10月我国大气污染物(PM_{2.5}、SO₂和NO₂)在不同季节的时空分布特征及其差异,比较了SO₂质量浓度年代际变化特征,并分析了污染成因。主要研究结论如下。

1) 2014年全国污染物以颗粒污染物为主,即对健康有严重危害的PM_{2.5}。从季节分布来看,其质量浓度随季节变化特征明显,即冬季达到最高(102.8 μg/m³),春、秋季次之(分别为67 μg/m³、62 μg/m³),夏季最低(36 μg/m³)。从地理分布来看,北方质量浓度明显高于南方,高质量浓度区主要集中在人口密集的京津冀地区(季平均质量浓度最高值出现在冬季,达106 μg/m³)。北方冬季空气重污染的特征主要表现为PM_{2.5}和SO₂在静稳条件下的持续累积,而东南沿海质量浓度较低。其他3季,污染

物质量浓度在南方、北方城市的差异远远小于冬季。工业排放、取暖季燃煤排放量增多以及不同地区的局地地理环境、气象条件的差异是导致上述特征的主要原因。

2) 气态污染物SO₂的全国平均质量浓度的季节性差异与PM_{2.5}相似;NO₂全国平均质量浓度的季节性差异很小,只是在冬季质量浓度稍有升高,但与PM_{2.5}和SO₂质量浓度在冬季的增幅相比,NO₂的质量浓度冬季增幅较小。SO₂质量浓度年代际变化结果表明,就全国城市而言,1994年与1984年相比,平均质量浓度降低了6.9%,在2013年11月—2014年10月与1994年相比,平均质量浓度降低了61.9%,其中在1984年和1994年,均表现为南方城市年均值高于北方城市,差值分别为16.6 μg/m³和5.5 μg/m³,说明改革开放初期南方经济发展快,能源消耗量大,造成SO₂污染比北方严重;而到2014年表现为北方城市年均值高于南方,差值为29.6 μg/m³,表明南方城市空气污染防治成效大于北方。

3) 严重污染天数较多的省会城市北方地区偏多,石家庄、武汉、合肥、西安、北京5个城市严重污染等级天数均大于20 d,PM_{2.5}质量浓度年均值大于80 μg/m³。其中,在2013年11月—2014年10月污染最严重的城市石家庄,全年总污染天数达275 d,中度及中度以上污染天数约160 d,PM_{2.5}年均值约130 μg/m³,且各类污染物质量浓度均明显高于其他城市。与2005—2012年污染状况相比,各污染物年均质量浓度均有较大的增幅。但同属于京津冀地区的北京污染程度与2013年相比,各类污染物质量浓度则均降低,表明北京空气污染治理初见成效。

[参考文献] (References)

- [1] DING Y H, LIU Y J. Analysis of long-term variations of fog and haze in China in recent 50 years and their relations with atmospheric humidity [J]. Science China: Earth Sciences, 2014, 57(1): 36-46.
- [2] 陈思宇, 黄建平, 刘晶晶, 等. 利用MODIS和OMI资料研究中国半干旱地区沙尘气溶胶对暖云的影响[J]. 地球科学进展, 2010(125): 188-198.
CHEN Siyu, HUANG Jianping, LIU Jingjing, et al. Effects of dust aerosols on cloud in semi-arid regions as inferred from OMI and MODIS retrievals [J]. Advances in Earth Science, 2010(125): 188-198. (in Chinese)
- [3] KAN H D, CHEN R J, TONG S L. Ambient air pollution, climate change, and population health in China [J]. Environment International, 2012(42): 10-19.
- [4] WANG Y, ZHANG R Y, SARAVANAN R. Asian pollution climatically modulates mid-latitude cyclones following hierarchical modelling and observational analysis [J]. Nature Communications, 2014; DOI: 10.1038/ncomms 4098.
- [5] PARK S U, CHO J H, PARK M S. Analyses of high aerosol concentration events (dense haze/mist) occurred

- in East Asia during 10-16 January 2013 using the data simulated by the aerosol modeling system [J]. *International Journal of Chemistry*, 2013(3): 10-26.
- [6] CHEN S Y, HUANG J P, ZHAO C, et al. Modeling the transport and radiative forcing of Taklimakan dust over the Tibetan Plateau: a case study in the summer of 2006 [J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2013, 118: 797-812.
- [7] CHEN S Y, ZHAO C, QIAN Y, et al. Regional modeling of dust mass balance and radiative forcing over East Asia using WRF-Chem [J]. *Aeolian Research*, 2014(15): 15-30.
- [8] CHEN S Y, HUANG J P, QIAN Y, et al. Effects of aerosols on autumn precipitation over Mid-Eastern China [J]. *Journal of Tropical Meteorology*, 2014(20): 242-250.
- [9] 吴新敏, 孙建国. 乌鲁木齐市与北方四城市的空气污染对比及原因分析[J]. *干旱环境监测*, 2002, 16(4): 218-222.
- WU Xinmin, SUN Jianguo. Comparison of the air pollution between the Urumqi and the other northern cities [J]. *Arid Environmental Monitoring*, 2002, 16(4): 218-222. (in Chinese)
- [10] 王慧丽, 雷宇, 陈潇君, 等. 京津冀燃煤工业和生活锅炉的技术分布与大气污染物排放特征[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(10): 1510-1517.
- WANG Huili, LEI Yu, CHEN Xiaojun, et al. Technology distribution and air pollutant emissions from coal-fired boilers for industrial and residential use in Beijing-Tianjin-Hebei area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(10): 1510-1517. (in Chinese)
- [11] 陈纯, 朱泽军, 刘丹, 等. 郑州市大气 $PM_{2.5}$ 的污染特征及源解析[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 47-52.
- CHEN Chun, ZHU Zejun, LIU Dan, et al. Pollution characteristics and source apportionment of $PM_{2.5}$ of ambient air in Zhengzhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(5): 47-52. (in Chinese)
- [12] 胡敏, 唐倩, 彭剑飞, 等. 我国大气颗粒物来源及特征分析[J]. *环境与可持续发展*, 2011, 36(5): 15-19.
- HU Min, TANG Qian, PENG Jianfei, et al. Study on characterization and source apportionment of atmospheric particulate matter in China [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2011, 36(5): 15-19. (in Chinese)
- [13] 王玮, 汤大钢, 刘红杰, 等. 中国 $PM_{2.5}$ 污染状况和污染特征的研究[J]. *环境科学研究*, 2000, 13(1): 1-5.
- WANG Wei, TANG Dagang, LIU Hongjie, et al. Research on current pollution status and pollution characteristics of $PM_{2.5}$ in China [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2000, 13(1): 1-5. (in Chinese)
- [14] 孙炳彦, 刘连友, 郭兰兰, 等. 我国南北方城市空气质量对比分析[J]. *环境保护科学*, 2008, 34(4): 1-4.
- SUN Bingyan, LIU Lianyou, GUO Lanlan, et al. Comparative analysis on cities' ambient air quality in south and north China [J]. *Environmental Protection Science*, 2008, 34(4): 1-4. (in Chinese)
- [15] 王勇, 柳林涛, 李江波, 等. 北京气态污染物变化与空中水汽变化的比较研究[J]. *环境科学与技术*, 2015, 38(6): 50-57.
- WANG Yong, LIU Lintao, LI Jiangbo, et al. Comparison between the change of gaseous pollutants and precipitable water vapor in Beijing [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6): 50-57. (in Chinese)
- [16] 李小飞, 张明军, 王圣杰, 等. 中国空气污染指数变化特征及影响因素分析[J]. *环境科学*, 2012, 33(6): 1936-1943.
- LI Xiaofei, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China [J]. *Environmental Science*, 2012, 33(6): 1936-1943. (in Chinese)
- [17] 臧星华, 鲁垠涛, 姚宏, 等. 中国主要大气污染物的时空分布特征研究[J]. *生态环境学报*, 2015, 24(8): 1322-1329.
- ZANG Xinghua, LU Yintao, YAO Hong, et al. The temporal and spatial distribution characteristics of main air pollutants in China [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2015, 24(8): 1322-1329. (in Chinese)
- [18] 杨新兴, 尉鹏, 冯丽华. 大气颗粒物 $PM_{2.5}$ 及其源解析[J]. *前沿科学*, 2013, 7(2): 12-19.
- YANG Xinxing, WEI Peng, FENG Lihua. Atmospheric particulate matter $PM_{2.5}$ and its sources [J]. *Frontier Science*, 2013, 7(2): 12-19. (in Chinese)
- [19] HJ 633—2012. 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].
- HJ 633—2012. Technical regulation on ambient air quality index(on trial) [S]. (in Chinese)
- [20] 全国城市空气质量实时发布平台, 中国环境监测总站. [EB/OL]. [2016-06-01]. <http://106.37.208.233:20035/>.
- The national urban air quality real-time publishing platform, National Environmental Monitoring Station. [EB/OL]. [2016-06-01]. <http://106.37.208.233:20035/>. (in Chinese)
- [21] LI M, ZHANG Q, KUOKAWA J, et al. MIX: a mosaic Asian anthropogenic emission inventory for the MICS-Asia and the HTAP projects [J]. *Atmospheric Chemistry Physics Discussions*, 2015, 15(23): 34813-34869.
- [22] 陆雅静, 王辉, 鲍晓磊, 等. 石家庄市 2005-2012 年环境空气质量变化及影响因素分析[J]. *河北工业科技*, 2014, 31(5): 401-406.
- LU Yajing, WANG Hui, BAO Xiaolei, et al. Ambient air quality change and the affecting factors from 2005 to 2012 in Shijiazhuang City [J]. *Hebei Journal of Industrial Science & Technology*, 2014, 31(5): 401-406. (in Chinese)
- [23] 朱红霞, 赵淑莉, 阚海东. 2013 年我国典型城市大气污染物浓度分布特征[J]. *环境科学与技术*, 2015(6): 227-233.
- ZHU Hongxia, ZHAO Shuli, KAN Haidong. Character-

- teristics of main atmospheric pollutants concentration in Chinese typical cities in 2013 [J]. *Environmental Science & Technology*, 2015(6): 227-233. (in Chinese)
- [24] SCHWARTZ J. Air pollution and blood markers of cardiovascular risk [J]. *Environmental Health Perspectives*, 2001, 109(S3): 405-409.
- [25] 王耀庭, 李威, 张小玲, 等. 北京城区夏季静稳天气下大气边界层与大气污染的关系[J]. *环境科学研究*, 2012, 25(10): 1092-1098.
WANG Yaoting, LI Wei, ZHANG Xiaoling, et al. Relationship between atmospheric boundary layer and air pollution in summer stable weather in the Beijing urban area [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2012, 25(10): 1092-1098. (in Chinese)
- [26] 洪全. 重庆市能源消耗与大气污染关系探讨[J]. *重庆师范学院学报(自然科学版)*, 2003, 20(1): 51-53.
HONG Quan. Relationship between energy consumption and air pollution in Chongqing [J]. *Journal of Chongqing Normal University (Natural Science Edition)*, 2003, 20(1): 51-53. (in Chinese)
- [27] 李培, 王新, 柴发合, 等. 我国城市大气污染控制综合管理对策[J]. *环境与可持续发展*, 2011, 36(5): 8-14.
LI Pei, WANG Xin, CHAI Fahe, et al. Recommendation and suggestion on policy and measures for air pollution control integrated management in China [J]. *Environment & Sustainable Development*, 2011, 36(5): 8-14. (in Chinese)
- [28] POPE C A, DOCKERY D W. Air pollution and life expectancy in China and beyond [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2013, 110(32): 12861-12862.
- [29] 王昭攀. 空气污染的主要来源及针对性防范[J]. *北方环境*, 2013, 29(1): 73-75.
WANG Zhaopan. The main source of air pollution and targeted prevention [J]. *Northern Environment*, 2013, 29(1): 73-75. (in Chinese)
- [30] DINER D J, BECKERT J C, REILLY T H, et al. Multi-angle imaging spectro radiometer (MISR) instrument description and experiment overview [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1998, 36(4): 1072-1087.
- [31] 何永晴, 赵玉成, 冯蜀青. 西宁市逆温特征及其与空气污染物浓度的相关分析[J]. *冰川冻土*, 2014, 36(3): 608-613.
HE Yongqing, ZHAO Yucheng, FENG Shuqing. Temperature inversion in Xining city: characteristics and correlation with air pollutant concentrations [J]. *Journal of Glaciology & Geocryology*, 2014, 36(3): 608-613. (in Chinese)
- [32] 陈纯, 朱泽军, 刘丹, 等. 郑州市大气PM_{2.5}的污染特征及源解析[J]. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 47-52.
CHEN Chun, ZHU Zejun, LIU Dan, et al. Pollution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} of ambient air in Zhengzhou [J]. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(5): 47-52. (in Chinese)
- [33] 张远航, 邵可生, 唐孝炎, 等. 中国城市光化学烟雾污染研究[J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 1998, 34(2): 392-400.
ZHANG Yuanhang, SHAO Kesheng, TANG Xiaoyan, et al. The study of urban photochemical smog pollution in China [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 1998, 34(2): 392-400. (in Chinese)
- [34] 陈姗姗, 束炯, 徐建中, 等. 中国若干典型城市对流层NO₂时空分布特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2010, 19(12): 1484-1490.
CHEN Shanshan, SHU Jiong, XU Jianzhong, et al. Tropospheric NO₂ pollution analysis of some typical cities in China [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, 19(12): 1484-1490. (in Chinese)
- [35] 程念亮, 李云婷, 张大伟, 等. 2014年10月北京市4次典型空气重污染过程成因分析[J]. *环境科学研究*, 2015, 28(2): 163-170.
CHENG Nianliang, LI Yunting, ZHANG Dawei, et al. Analysis about the characteristics and formation mechanisms of serious pollution events in October 2014 in Beijing [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2015, 28(2): 163-170. (in Chinese)
- [36] 王斌. 利用空气污染指数(API)分析我国空气污染的时空变化特征[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2008.
WANG Bin. The spatial and temporal variation of air pollution characteristics in China adopting air pollution index (API) analysis [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2008. (in Chinese)
- [37] 郭勇涛. 沙尘天气对我国北方和邻国日本大气环境影响的初步研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2013.
GUO Yongtao. A preliminary study on the influence of sand dust weather on the atmospheric environment in the north of China and its neighboring countries [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2013. (in Chinese)
- [38] 王金艳, 王式功, 马艳, 等. 我国北方春季沙尘暴与气候因子之关系[J]. *中国沙漠*, 2007, 27(2): 296-300.
WANG Jinyan, WANG Shigong, MA Yan, et al. Relation between climatic characters and dust storm in spring in Northern China [J]. *Journal of Desert Research*, 2007, 27(2): 296-300. (in Chinese)
- [39] 刘辰. 深圳大气湿沉降中水溶性有机物的化学组成及变化特征[D]. 北京: 北京大学, 2007.
LIU Chen. Chemical composition and characteristics of water soluble organic compounder in precipitation of Shenzhen [D]. Beijing: Peking University, 2007. (in Chinese)
- [40] 高亮. 内陆强风特性的现场实测与模拟[D]. 西安: 长安大学, 2012.
GAO Liang. Simulation and field measurement of the characters of strong wind in inner land of China [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. (in Chinese)
- [41] STREETS D G, BOND T C, CARMICHAEL G R, et al. An inventory of gaseous and primary aerosol emissions in Asia in the year 2000 [J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984-2012), 2003, 108: D21.