

马敏劲, 杨秀梅, 丁凡, 等. 中国南北方大气污染物的时空分布特征[J]. 环境科学与技术, 2018, 41(5): 187-197. Ma Minjin, Yang Xiumei, Ding Fan, et al. Temporal and spatial distribution of atmospheric pollutants between Northern China and Southern China[J]. Environmental Science & Technology, 2018, 41(5): 187-197.

中国南北方大气污染物的时空分布特征

马敏劲¹, 杨秀梅¹, 丁凡², 谭子渊¹, 李旭¹

(1. 兰州大学大气科学学院, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730000;

2. 兰州理工大学计算机与通信学院, 兰州 730050)

摘 要: 利用中国环境监测总站2014年12月-2015年11月171个城市的逐小时大气污染资料, 对比分析了南北方大气颗粒物和气体污染物的时空分布特征。结果表明: (1) 全国出现PM_{2.5}和PM₁₀污染日的频率分别为17.23%和10.33%, PM_{2.5}、PM₁₀具有较好的线性相关性, PM_{2.5}浓度约占PM₁₀浓度的47%, 颗粒物和气体污染物的重污染区主要分布在环渤海地区、长三角地区、西北地区、四川盆地和两湖地区。(2) 南北方大气颗粒物和气体污染物浓度具有明显的月季变化, 从12月到次年3月和6、11月差距大, 其他月份小(O₃除外), PM_{2.5}/PM₁₀比值在秋末冬初大, 其他季节小。(3) 北方PM_{2.5}年均浓度为62.28 μg/m³, 比南方高12.62 μg/m³, 北方PM₁₀年均浓度为115.98 μg/m³, 比南方高36.34 μg/m³, 虽然北方颗粒物浓度比南方大, 但除2015年11月外, PM_{2.5}/PM₁₀北方都小于南方; 北方SO₂、NO₂、CO年均浓度分别为38.16、42.28、1 256.67 μg/m³, 比南方高18.43、3.56、315.83 μg/m³, 南北O₃年均浓度相当。(4) 从日变化看, 污染物平均浓度(O₃和SO₂除外)白天低于夜间, 下降速率白天大于夜间; 南北PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂平均浓度日变化呈“双峰双谷”型, O₃呈“单峰单谷”型; 日变化曲线还表明, 日间和夜间北方PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂平均浓度都高于南方, 下降速率也是北方大于南方。

关键词: 颗粒物; 气体污染物; 南北差异; 时空分布

中图分类号: X51 **文献标志码:** A **doi:** 10.19672/j.cnki.1003-6504.2018.05.031

文章编号: 1003-6504(2018)05-0187-11

Temporal and Spatial Distribution of Atmospheric Pollutants Between Northern China and Southern China

MA Minjin¹, YANG Xiumei¹, DING Fan², TAN Ziyuan¹, LI Xu¹

(1. Gansu Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, College of Atmospheric Science, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China; 2. College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: By using hourly air pollution data of 171 cities in China from December 2014 to November 2015, the spatial and temporal distribution characteristics of atmospheric particulate matter and gaseous pollutants between northern and southern China were compared and analyzed. The results showed that PM_{2.5} and PM₁₀ episode days were 17.23% and 10.33% in China, respectively. PM_{2.5} and PM₁₀ concentration had a good linear correlation. PM_{2.5} accounted for about 47% of PM₁₀ mass concentrations. The heavily polluted cities were mainly located in Bohai Rim, Yangtze River Delta, northwest China, Sichuan Basin, Hubei and Hunan Provinces. There were obviously seasonal variations of particulate matter and gaseous pollutants in both northern and southern China. A large gap of the pollutants concentration existed between the north and the south from December 2014 to March 2015, June and November 2015, and the gap was small in the other months (except O₃). The ratios of PM_{2.5} and PM₁₀ were large in later autumn and early winter, but small in the other seasons. The annual average of PM_{2.5} concentrations was 62.28 μg/m³ in northern China, which was 12.62 μg/m³ higher than that in the south, as well as PM₁₀ annual average 115.98 μg/m³ in the north, 36.34 μg/m³ higher than that in the south. Although the particulate matter concentration in northern China is larger than that in the south, PM_{2.5}/PM₁₀ (except November 2015) was reversed between the North and the South. The concentrations of SO₂ (38.16 μg/m³), NO₂ (42.28 μg/m³), CO (1 256.67 μg/m³) in the North were 18.43 μg/m³, 3.56 μg/m³, 315.83 μg/m³ higher than the values of the south, respectively. However, the annual average concentration of O₃ in the north was fairly close to the south. The daily mean concentrations of pollutants (except O₃ and SO₂) were higher in nighttime than that in daytime. The diurnal variation of PM_{2.5}, PM₁₀, CO, NO₂ concentration in northern and southern China both showed a “double peak and double valley” variation, and O₃ as “single-peak single-valley” type. The daytime average pollutant concentrations as well as nighttime in the north were much higher than that in the south. The diurnal curves also shows that

《环境科学与技术》编辑部: (网址) <http://fjks.chinajournal.net.cn> (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@vip.126.com

收稿日期: 2017-07-15; 修回 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(41205008); 中央高校自由探索项目(lzujbky-2016-17); 中国气象局干旱气象科学研究基金(IAM201603)

作者简介: 马敏劲(1983-), 男, 副教授, 博士, 主要从事大气边界层、空气污染及数值模拟的研究, (电子信箱) minjinma@lzu.edu.cn。

the descending rates of $\text{PM}_{2.5}$, PM_{10} , CO, NO_2 concentrations had the similar comparison as pollutant concentrations between the north and the south.

Key words: particulate matter; gaseous pollutants; north-south differences; temporal and spatial distribution

城市空气质量对气候、人体健康、国民经济等有重要的影响,流行病学研究表明大气颗粒物和气体污染物与人体健康密切相关^[1],2010年全世界有330万人过早死亡是由室外高浓度的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染引起^[2],仅中国珠三角地区,2013年由 NO_2 、 O_3 、 PM_{10} 污染引起1.32~2.28万人死亡,造成经济损失上百亿^[3]。近年来空气污染事件频发^[4-6],中国政府为保护环境制定了相应的法律法规,2012年3月中国环境局制定了环境空气质量排放标准,为本文衡量大气污染物造成的污染状况提供了参考标准。

较之发达国家,发展中国家大部分城市面临空气污染问题,在不同气候、地形特征及主要污染源条件下,各个城市的空气污染问题有所不同^[7]。中国经纬度跨度大,地貌特征和气候类型复杂多样,南北经济发展不平衡,南北大气污染呈现出不同特征。鉴于此,以往研究探析了中国城市空气污染及区域性分布特征,发现北方 PM_{10} 污染重于南方,两者差异主要表现在北方采暖期^[8], SO_2 和 PM_{10} 浓度北方城市高于南方城市,京津冀及山东西北部均是污染高值中心^[9];Chai Fahe^[10]指出北方 SO_2 、CO浓度明显大于南方,但 O_3 和 NO_2 却不明显;时间变化上,31个省会城市 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 NO_2 、 SO_2 、CO日变化特征明显,在一天的16:00出现最低值, O_3 则在午后出现最高值^[11];季节分布上也不均衡,白鹤鸣^[12]指出北京、天津和石家庄3市的空气质量夏季最好,秋季次之,春、冬季最差。目前,对大气颗粒物和气体污染物的时空分布特征的研究不少,但大多数集中在个别城市或某个有限区域,本文利用全国171个城市的逐小时大气污染物监测资料,探析中国南北方大气颗粒物和4种气体污染物的时空分布特征,为大气污染治理提供一定的参考。

1 资料和方法

本文采用中国环境监测总站2014年12月1日-2015年11月31日171个城市逐小时的大气常规污染物观测资料,包括 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO、 O_3 的质量浓度,按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012)的标准浓度限值,对 $\text{PM}_{2.5}$ 、 PM_{10} 、 SO_2 、 NO_2 、CO、 O_3 进行污染浓度等级划分,见表1。中国南北方是根据地理上南北分界秦岭-淮河线来进行划分,由于经济存在南北差异,能源结构差异较大,南北方空气污染体现出不同污染特征。

表1 环境空气污染物基本项目浓度限值^[13]
Table 1 Air quality standards of ambient air pollutants^[13]

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值/($\mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$)	
			一级	二级
1	二氧化硫(SO_2)	年平均	20	60
		24 h 平均	50	150
2	二氧化氮(NO_2)	年平均	40	40
		24 h 平均	80	80
3	一氧化碳(CO)	24 h 平均	4 000	4 000
4	颗粒物(粒径 $\leq 10 \mu\text{m}$)	年平均	40	70
		24 h 平均	50	150
5	颗粒物(粒径 $\leq 2.5 \mu\text{m}$)	年平均	15	35
		24 h 平均	35	75

在统计计算中,虽然平均数据有一定的不确定性,但是可以大体反映污染程度,并且是对每个城市平均的,产生的误差应是均等的,因此用逐小时的平均值作为日均值,同理计算月均值和年均值。通过计算,得到2014年12月-2015年11月各监测点 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度的日均值,当 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的日均值 $>75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,则这一天为 $\text{PM}_{2.5}$ 污染日;当 PM_{10} 浓度的日均值 $>150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 时,记这一天为 PM_{10} 污染日。当颗粒物的日均值小于一级浓度限值时($\text{PM}_{2.5}<35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{10}<50 \mu\text{g}/\text{m}^3$),则记为无颗粒物污染日^[14]。

2 污染物年平均浓度分布特征

颗粒物是空气污染中普遍存在且危害较大的污染物之一^[15],其中可吸入颗粒物是影响中国环境空气质量的首要污染物。为分析中国颗粒物的分布状况,统计了2014年12月到2015年11月中国171个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 年均浓度,如图1所示, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 整体分布呈现出由北向南降低的趋势,北方城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度高,南方低。达到 $\text{PM}_{2.5}$ 二级标准限值的城市分布分散,分别出现在河北、河南、山东、湖南等地, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化范围为40.91~93.48 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均值为55.90 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;与 $\text{PM}_{2.5}$ 不同, PM_{10} 重污染城市分布具有区域特征,集中在华北地区、长三角地区、西北地区、两湖地区和四川盆地, PM_{10} 浓度变化范围为64.08~134.47 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,均值为95.79 $\mu\text{g}/\text{m}^3$;在171个城市中,达到 $\text{PM}_{2.5}$ 二级标准限值的城市占100%,而达到 PM_{10} 二级标准的城市则占到95.91%, PM_{10} 污染较轻的城市大多位于东部和南部沿海地区。

在所有监测城市中,2014年12月-2015年11月

出现 $\text{PM}_{2.5}$ 污染日的平均频率为17.23%,最高频率出现在河北保定,达41.92%,其次是淄博(37.53%)和衡水(36.99%);出现 PM_{10} 污染日的平均频率为10.33%,最高频率仍出现在河北保定,达33.97%,其次是淄博

(32.05%)和郑州(31.23%)。无 $\text{PM}_{2.5}$ 污染日的频率为26.68%,无 PM_{10} 污染日的频率为14.50%, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度和 PM_{10} 浓度介于一级和二级浓度限值之间的频率分别占56.09%和75.17%。见图1。

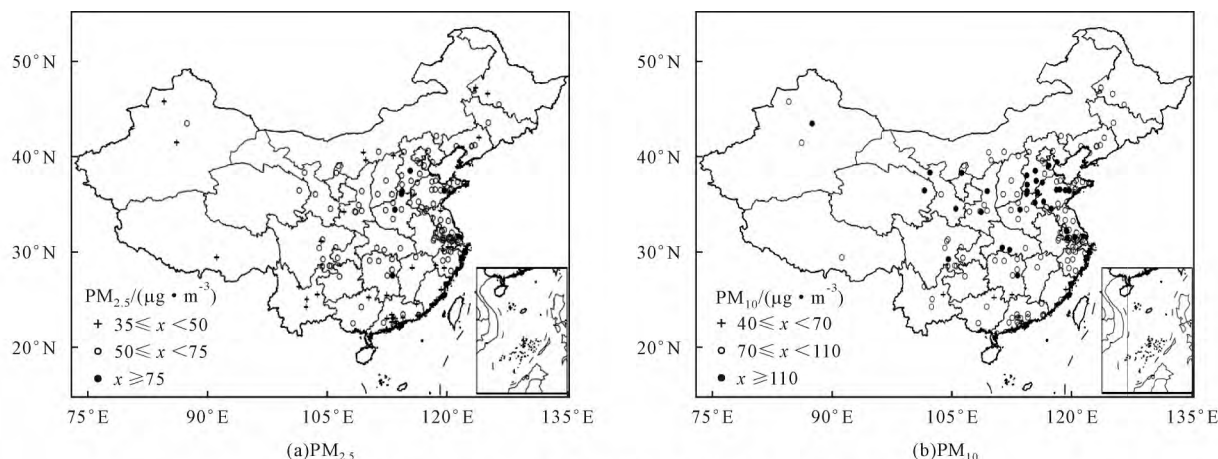


图1 2014年12月-2015年11月中国 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 年平均浓度空间分布图

Fig.1 Spatial distributions of annual average of PM_{10} and $\text{PM}_{2.5}$ mass concentrations in China from December 2014 to November 2015

$\text{PM}_{2.5}$ 是 PM_{10} 的重要组成部分,二者之间的关系表明了空气中颗粒物粒径分布的比重。图2给出了2014年12月到2015年11月中国171个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度年均值的线性相关关系,可决系数 R^2 达0.76, $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 有较好的正相关关系,一元回归方程的斜率为0.47,表明中国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度约占 PM_{10} 浓度的47%。

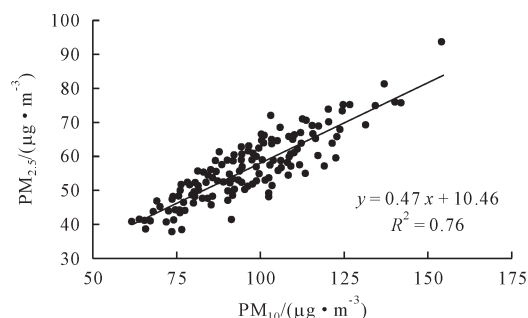


图2 2014年12月-2015年11月中国171个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度年均值的线性相关图

Fig.2 The linear relationship between $\text{PM}_{2.5}$ and PM_{10} mass concentrations in 171 cities of China from December 2014 to November 2015

与大气颗粒物不同, NO_2 空间分布无明显南北差异,高浓度区域主要位于环渤海(京津冀、辽东半岛和山东半岛),另外,长三角、陕甘地区、两湖地区和四川盆地也存在高浓度区。以环渤海为中心,形成一个明显的 SO_2 高浓度中心,浓度由中心向外逐渐小,而且自北向南的减小明显(图3(a)、(b));长三角和两湖地区 SO_2 浓度也明显要高于周围地区。 SO_2 浓度的年均值为 $30.04 \mu\text{g}/\text{m}^3$, NO_2 浓度的年均值为 $37.38 \mu\text{g}/\text{m}^3$,在171个监测城市中, NO_2 浓度达到一级标准限值的城市达

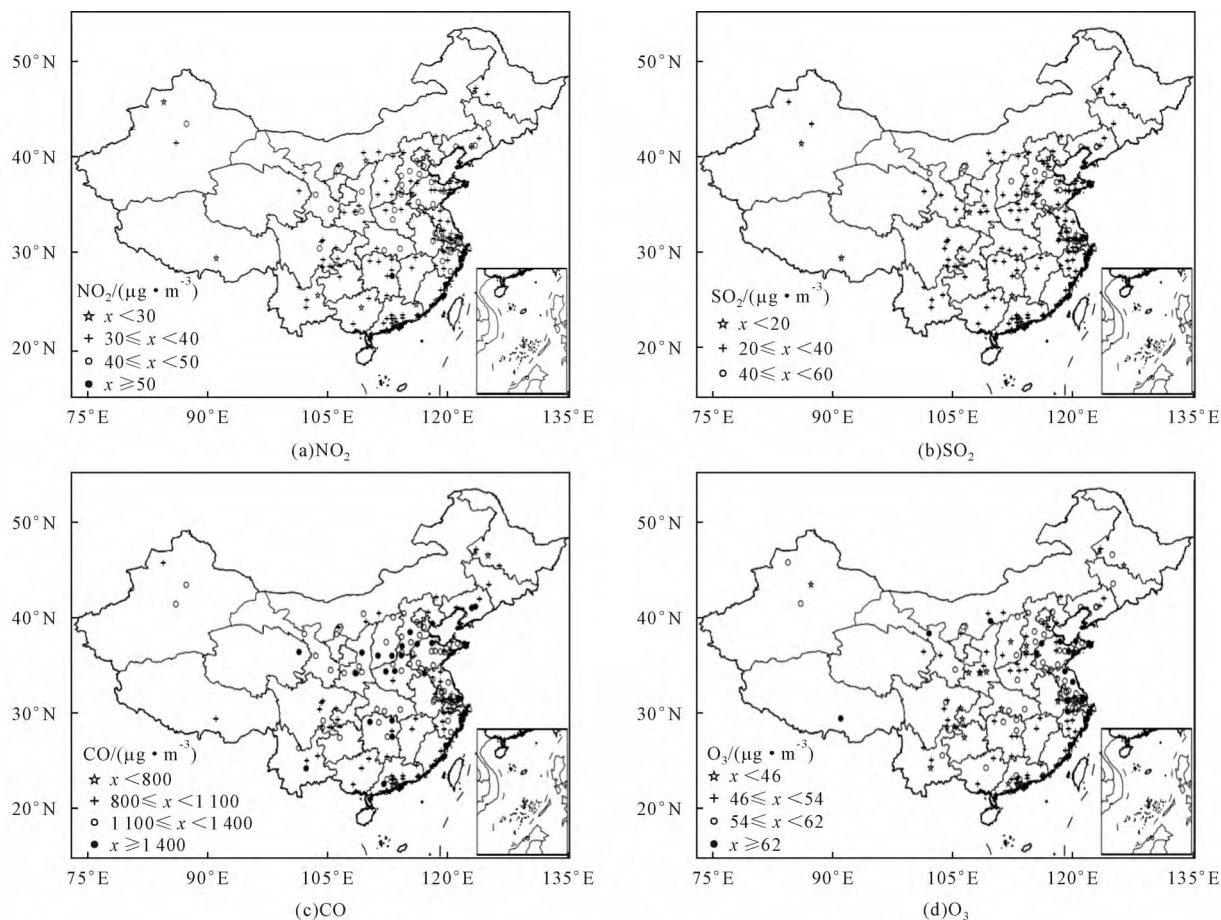
27.49%, SO_2 浓度都未超过二级标准限值,而介于一级和二级标准限值间的城市达94.74%,只有极少部分城市污染浓度低于一级标准限值,比如高海拔的拉萨地区。从 O_3 和 CO 浓度年均值分布图(图3(c)、(d))可以看出, CO 浓度北方明显高于南方, O_3 浓度南北差距不大,区域上 O_3 和 CO 浓度的高值中心主要集中在环渤海、长三角、珠三角和西北地区部分地区,虽然两湖地区 CO 浓度高,但 O_3 浓度却不是很高,拉萨则相反,其他污染物浓度较低,但是 O_3 浓度却很高,年均值达 $62.45 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

3 污染物月季分布及变化特征

3.1 大气颗粒物浓度分布及变化特征

2014年12月-2015年11月中国171个城市 $\text{PM}_{2.5}$ 的空间分布存在明显的季节差异,春季 $\text{PM}_{2.5}$ 平均浓度为 $51.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$,夏、秋、冬季分别为 39.14 、 51.64 、 $81.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度夏季最低,春秋次之,冬季最高。春季 $\text{PM}_{2.5}$ 的高值中心主要分布在3个区,分别是华北地区、四川盆地、两湖地区(图4(a));夏季高值中心在河北地区(图4(b)),秋季在河北地区,两河流域污染物浓度相当,中国南方、东北部分地区及高海拔的西藏地区空气质量较好(图4(c));冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 的浓度普遍偏高,高污染中心主要有5个地区,分别为华北、长江三角洲、湖北湖南、新疆部分地区以及四川盆地,南方沿海城市空气质量较全国其他地方好(图4(d))。

从春季到冬季, PM_{10} 平均浓度依次为 97.27 、 69.25 、 89.16 、 $127.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$,可见 PM_{10} 的浓度夏季最低,秋季次之,春季较高,冬季最高。春季,长江以北 PM_{10} 浓度普遍偏高(除了东北的部分地区)(图5(a));夏季

图3 2014年12月-2015年11月中国NO₂、SO₂、CO、O₃浓度年均值分布图Fig.3 Spatial distributions of annual average of NO₂, SO₂, CO, O₃ mass concentrations in China from December 2014 to November 2015

除了河北、河南,全国大部分地区PM₁₀浓度较低,东南沿海及西南地区几乎没有出现PM₁₀污染(图5(b));秋季PM₁₀浓度分布格局和春季的相似,PM₁₀浓度春季比秋季略高(图5(c));冬季PM₁₀的浓度普遍偏高,高污染中心成片分布,几乎所有的城市PM₁₀浓度超过100 μg/m³,只有长江以南的少部分城市和高海拔的拉萨PM₁₀浓度较低(图5(d))。

中国南北方颗粒物污染有明显的季节变化,PM_{2.5}和PM₁₀的浓度变化几乎同步,秋冬季污染最重,1月达到峰值,夏季污染最轻(图6),北方PM_{2.5}年平均浓度为62.28 μg/m³,比南方高12.62 μg/m³,PM₁₀年平均浓度为115.98 μg/m³,比南方高36.34 μg/m³。南北方PM₁₀的差异较PM_{2.5}大2倍,这与南北方PM_{2.5-10}分布差异有关。PM_{2.5}和PM₁₀月均值南北差距较大的时段有3个,一是12、1、11月与北方冬季供暖有很大关系;二是3月份北方沙尘天气较多,因此南北方也存在较大的差异;三是6、7月份南方颗粒物浓度降到最低,与南方雨季有关,南方降水多,对空气中悬浮的颗粒物有冲刷、清除的作用。

PM_{2.5}/PM₁₀比值能够表征细颗粒物在可吸入颗粒物中所占的比重^[16],通过PM_{2.5}/PM₁₀来分析城市空气

污染过程,比值越大,城市二次污染物越严重^[17]。由图7可见,PM_{2.5}/PM₁₀有明显的季节变化,南北方都有秋末冬初PM_{2.5}/PM₁₀值大、其他季节小的特征,即秋末冬初相对其他时间段可吸入颗粒物浓度增大。北方PM_{2.5}/PM₁₀年均值为0.53,南方为0.61,虽然北方PM_{2.5}和PM₁₀浓度均大于南方,但PM_{2.5}/PM₁₀北方却小于南方(2015年11月除外)。可见,北方PM_{2.5-10}在PM₁₀中所占的比重比南方大,PM_{2.5}所占的比重比南方小。王琳琳等^[18]研究表明,在有污染的天气条件下PM_{2.5}/PM₁₀值明显升高。我国冬春季节大气污染严重,夏秋季节轻,PM_{2.5}/PM₁₀季节变化与污染物浓度变化具有一致性。另外,利用PM_{2.5}/PM₁₀来度量沙尘的源^[19],北方3-5月份PM_{2.5}/PM₁₀的值最小,与北方3-5月份沙尘天气频发有关,结果与前人研究一致。

3.2 气体污染物浓度分布及变化特征

从2014年12月-2015年11月中国171个城市NO₂浓度的季节分布图(图8)可以看出,NO₂污染的整体水平较低,南北方无明显差异,春季NO₂平均浓度为36.64 μg/m³,夏季为26.94 μg/m³,秋季为37.36 μg/m³,冬季为48.57 μg/m³。NO₂的重污染区和颗粒物的重污染区一致,除了关注的环渤海地区、长江三角洲地

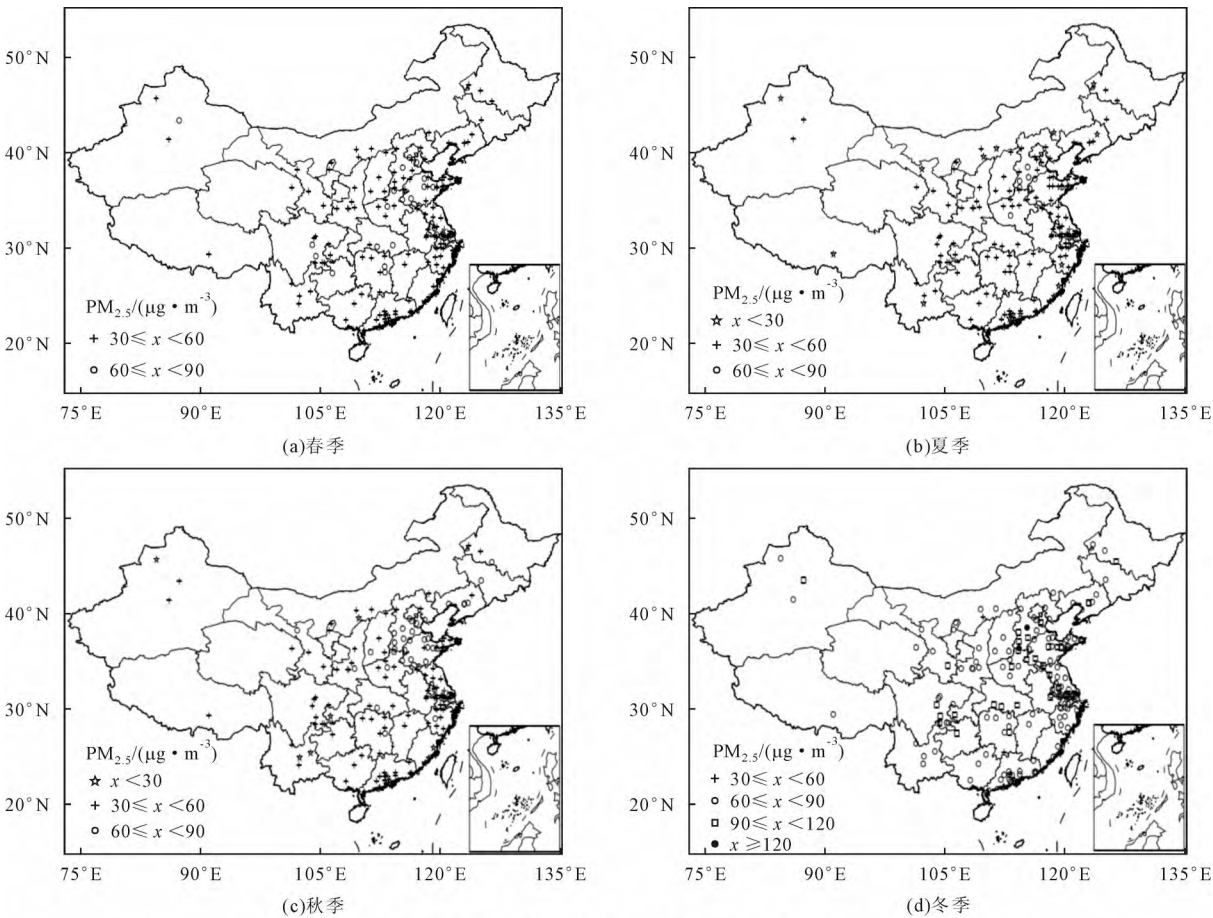


图4 2014年12月-2015年11月中国PM_{2.5}浓度季节分布图

Fig.4 Spatial distributions of seasonal mean PM_{2.5} mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China

区、西北地区,四川盆地和两湖地区的污染突出,对其形成原因和机理需要更多关注。

与NO₂变化一致,SO₂、CO最大浓度出现在冬季,春秋次之,夏季最小,而O₃则不同,夏季最大,春季次之,秋季较小,冬季最小(表2)。四季中SO₂区域分布也不尽相同,春秋季节分布类似,以环渤海地区、山西、武汉为SO₂高值中心,东南沿海较低(图略);夏季除河南、山东、湖南、江西和宁夏北部SO₂浓度较高,其他地方浓度较低;冬季,长江流域及以北地区SO₂浓度明显高于其他地区,而且明显高于其它3个季节,约为其它季节的2倍,冬季北方城市SO₂浓度明显偏高,可能因为10月下旬至11月初进入采暖期,燃煤量增加,SO₂排放量也随之增加。

CO夏季污染轻,春季全国浓度分布较均一,没有高值中心,秋季污染有所加重,出现2个主要污染中心,一个在山西至河北一带,另一个是湖南地区。冬季CO污染成片出现,浓度高值中心明显增多,主要有环渤海、陕西,珠三角、四川盆地、湖南以及青海新疆一带(图略)。

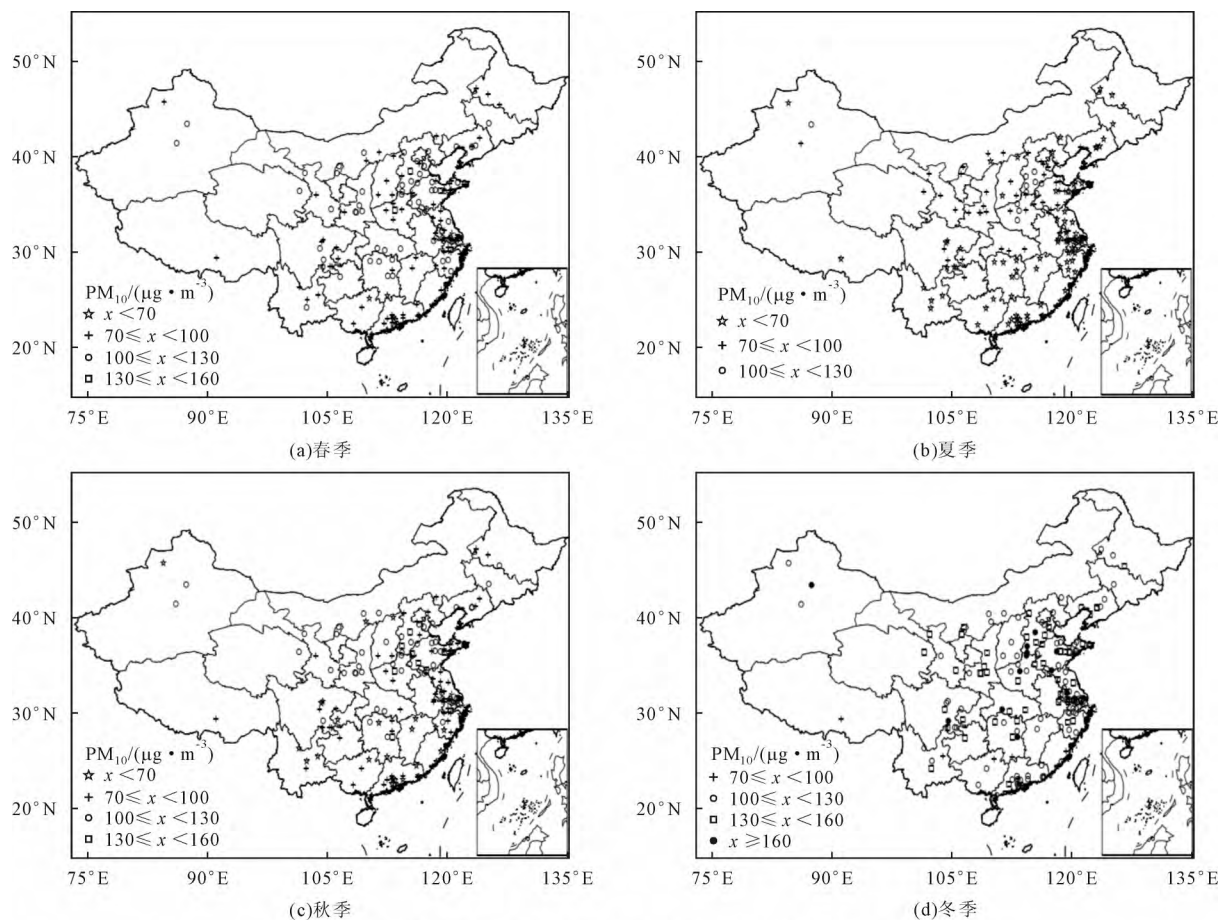
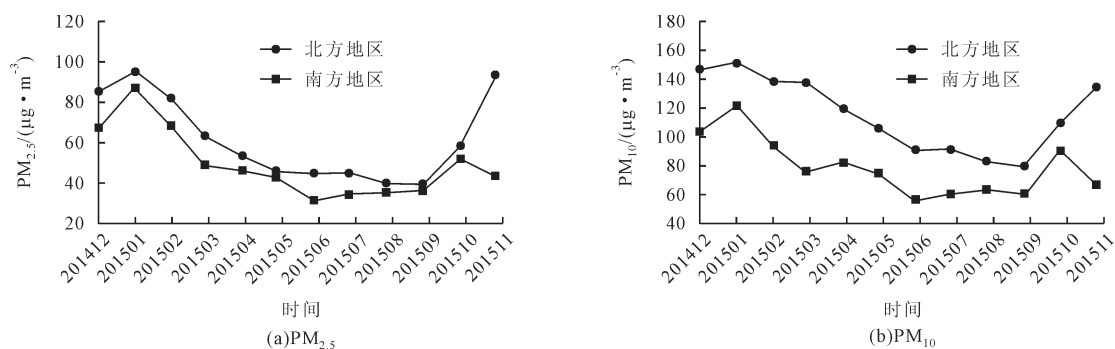
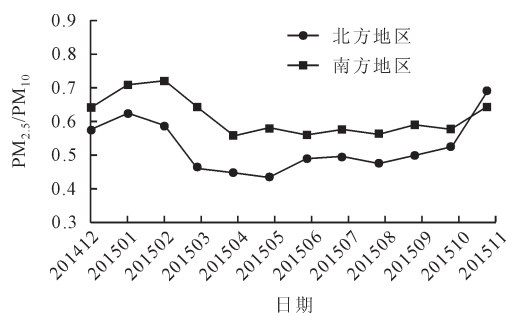
O₃与其他气体污染物分布不尽相同(图9),东部沿海O₃浓度高于西部内陆地区,除夏季外,O₃浓度没

有明显的南北差异。冬季O₃浓度普遍较低,没有明显的高值中心;春季,环渤海地区、珠三角和四川盆地为O₃的高值中心,其他地方浓度相当;夏季北方O₃浓度明显高于南方,可能与南方夏季季风带来丰沛的降水有关,一方面降水会稀释空气中O₃浓度,另一方面减少了光化学反应;秋季,O₃高浓度区沿着大陆的东海岸分布,形成山东地区、长三角、珠三角3个高浓度中心。

表2 2014年12月-2015年11月中国SO₂、CO、O₃浓度的季节平均

Table 2 Seasonal mean of SO ₂ , CO, O ₃ mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China (μg/m ³)				
污染物	春季	夏季	秋季	冬季
SO ₂	29.92	21.65	22.41	46.17
CO	1 010	890	1 130	1 510
O ₃	58.86	73.16	50.76	32.22

从气体污染物月变化图上看(图10),南北方CO、SO₂、NO₂都具有明显的季节变化和南北差异,CO、SO₂、NO₂浓度冬季最高,春秋次之,夏季最低,O₃则相反。北方SO₂年平均浓度为38.16 μg/m³,比南方高18.43 μg/m³;北方NO₂年平均浓度为42.28 μg/m³,比南方高3.56 μg/m³;北方CO年平均浓度为1 256.67 μg/m³,比南方高315.83 μg/m³;北方和南方O₃年平均浓度分别为52.24 μg/m³和52.26 μg/m³。12月-次年

图5 2014年12月-2015年11月中国PM₁₀浓度季节分布图Fig.5 Spatial distributions of seasonal mean PM₁₀ mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China图6 2014年12月-2015年11月中国南方和北方PM_{2.5}和PM₁₀浓度月变化Fig.6 Monthly variations of the PM_{2.5} and PM₁₀ in northern and southern cities in China from December 2014 to November 2015图7 2014年12月-2015年11月中国南、北方PM_{2.5}/PM₁₀月变化Fig.7 Monthly variations of the PM_{2.5}/PM₁₀ in northern and southern cities in China from December 2014 to November 2015

3月,南北方CO、SO₂平均浓度差距非常大,在1月份达到最大,北方CO平均浓度比南方大840 μg/m³,SO₂差距达52.92 μg/m³,这个时段与北方供暖期正好吻合,供暖期北方CO、SO₂平均浓度明显高于南方;6-8月份CO、SO₂浓度最低,CO、SO₂南北差距也非常小。与其它气体污染不同,北方O₃随时间变化呈“单峰”结构,南方呈弱“双峰”结构,均是夏秋高,冬春低。冬季北方O₃浓度略低于南方,4月份之后,北方O₃浓度大幅上升,6月份达最大,高出南方23.25 μg/m³,8月份之后急剧降低,之后浓度低于南方;O₃浓度与太阳辐射、温

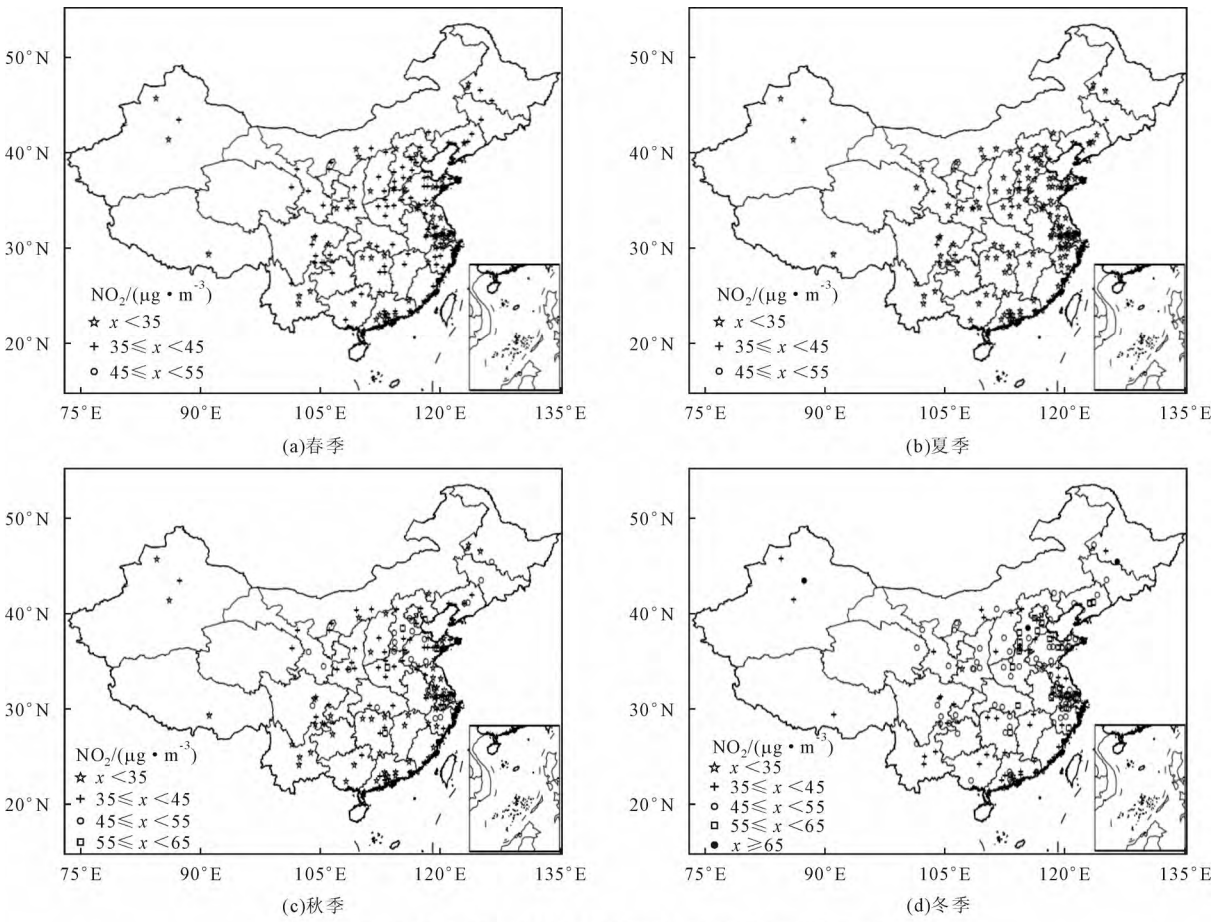


图8 2014年12月-2015年11月中国NO₂浓度季节分布图
Fig.8 Spatial distributions of seasonal mean NO₂ mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China

度有关^[20],南方6-7月份虽然太阳高度角增大,但由于夏季阴雨天气的增多,有效太阳辐射日相对减少,因此O₃浓度并没有随着太阳高度角的增大而增大。

4 污染物浓度的日变化特征

大气污染物浓度与边界层湍流扩散、污染物排放密切相关,呈现不同的日变化特征^[21,22],图11为南北各种污染物的日变化图,从图中可以看出,无论南北,PM₁₀和PM_{2.5}具有一致的变化,随时间都具有“双峰双谷”的特点,但南方颗粒物浓度变化比北方颗粒物浓度平缓。一天中,上午09:00-10:00PM_{2.5}和PM₁₀浓度出现第1个峰值,10:00以后浓度开始下降,到16:00-17:00之间出现谷值,之后浓度又逐渐上升,在21:00-22:00前后达到第2个峰值,此时的浓度值与上午出现第1个峰值相当;22:00之后,这2种污染物浓度值

均缓慢下降,在05:00前后达到第2个谷值,但浓度高于16:00-17:00谷值的浓度,此后再次升高。将08:00-20:00作为白天时段,20:00至次日08:00作为夜间时段,南方PM_{2.5}白天平均值为44.73 μg/m³,夜间为47.64 μg/m³,而北方PM_{2.5}白天平均值为63.56 μg/m³,夜间为68.03 μg/m³;南北方PM₁₀白天和夜间平均值的变化特点如表3所示。可见,不论白天或夜间,颗粒物浓度北方都高于南方;不论南方或北方,颗粒物浓度夜间要高于白天。白天09:00-15:00,北方PM_{2.5}下降速率为1.54 μg/(m³·h),而夜间21:00-次日05:00,下降速率为0.97 μg/(m³·h);PM₁₀在对应时段的下降速率分别为3.30 μg/(m³·h)和1.76 μg/(m³·h);南方PM_{2.5}、PM₁₀白天与夜间的下降速率见表3。因此,不论南方或北方,PM_{2.5}和PM₁₀白天下降速率均大于夜间,不论白天或夜间,PM_{2.5}和PM₁₀下降速率北方均大于南方。

表3 南北方大气颗粒物白天和夜间浓度特征

Table 3 The concentration features of atmospheric particulate matter in northern and southern cities of China					
地区	污染物	白天平均浓度/(μg·m ⁻³)	夜间平均浓度/(μg·m ⁻³)	白天下降速率/(μg·m ⁻³ ·h ⁻¹)	夜间下降速率/(μg·m ⁻³ ·h ⁻¹)
北方	PM _{2.5}	63.56	68.03	1.54	0.97
	PM ₁₀	109.93	118.49	3.30	1.76
南方	PM _{2.5}	44.73	47.64	0.88	0.41
	PM ₁₀	72.26	77.75	1.64	1.31

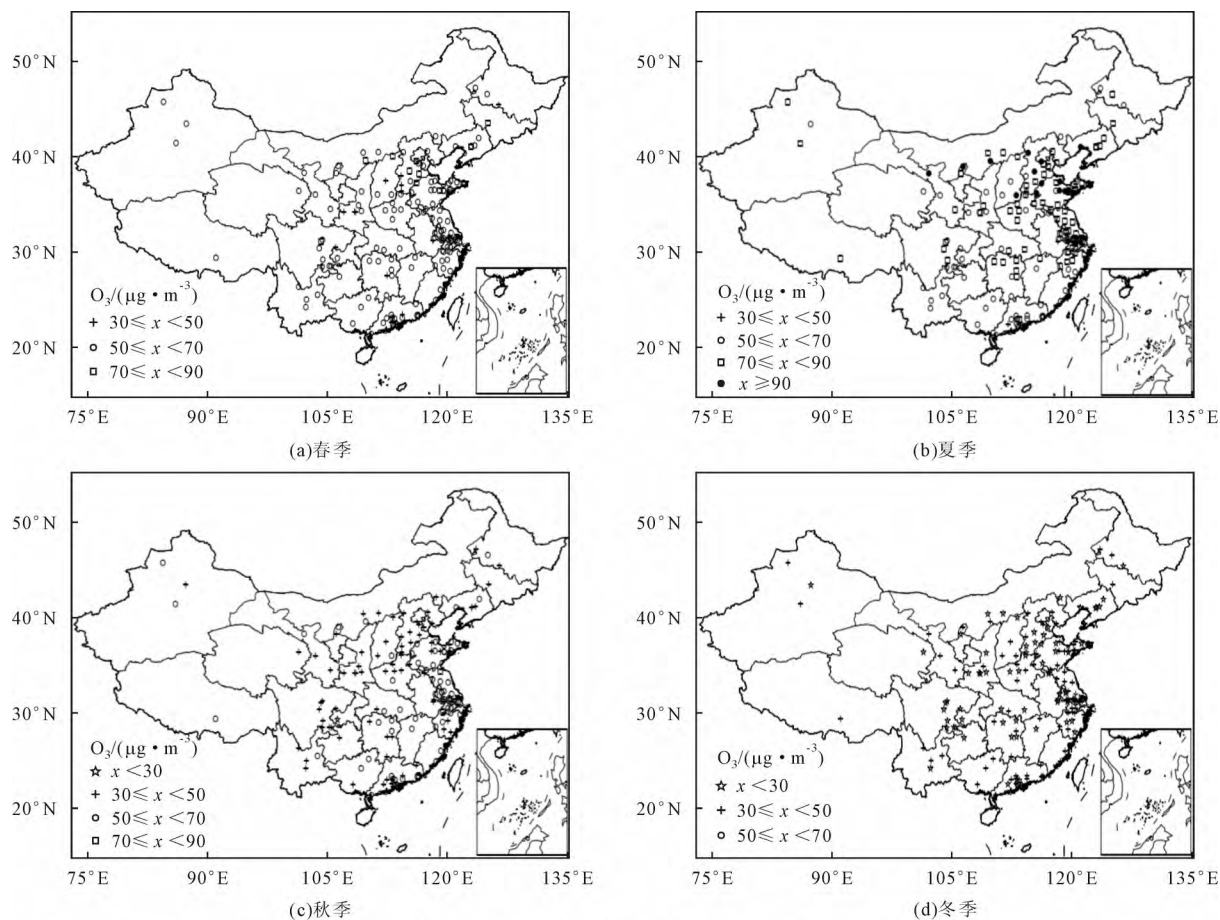
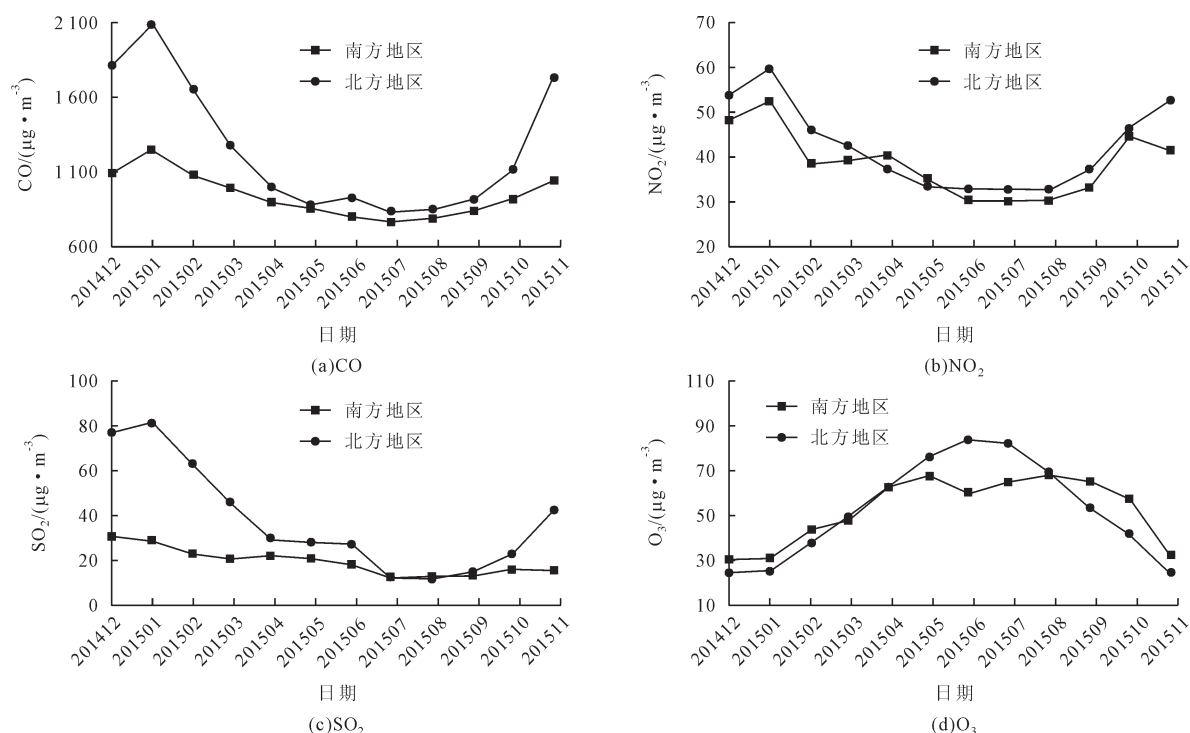
图9 2014年12月-2015年11月中国O₃浓度季节分布图Fig.9 Spatial distributions of seasonal mean O₃ mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China

图10 2014年12月-2015年11月中国南北方4种气体污染物浓度月变化

Fig.10 Monthly variations of the gaseous pollutants in northern and southern cities of China from December 2014 to November 2015

南北方气体污染物(除O₃外)浓度的分布总体呈“双峰双谷”结构,NO₂和CO第1个峰值出现的时间比颗粒物的早1 h,10:00之后迅速降低,14:00-15:00达

到谷值,比颗粒物的早1 h,之后浓度又逐渐上升,在21:00-22:00前后达到第2个峰值,第2个峰值气体污染物的浓度比第1个峰值高。污染物浓度逐渐积累,

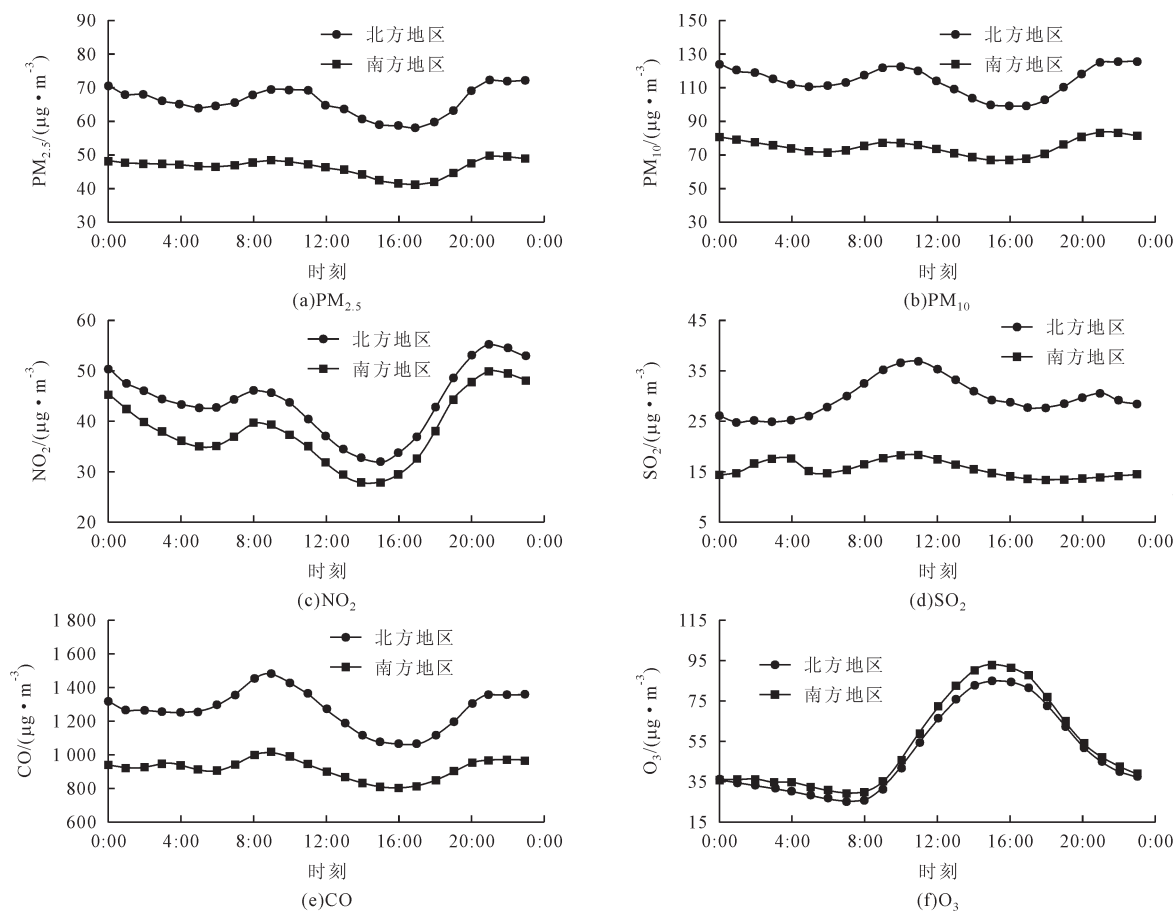


图11 2014年12月-2015年11月中国南方和北方污染物浓度日变化
Fig.11 Diurnal variation of particulate matter and gaseous pollutants in northern and southern cities of China from December 2014 to November 2015

22:00之后,NO₂和CO浓度值均缓慢下降,在05:00前后达到第2个谷值,但此时的浓度值高于白天14:00-15:00谷值浓度。和NO₂、CO的双峰结构不同,CO第1个峰值的浓度大于第2个峰值,NO₂反之。SO₂浓度在11:00-12:00时出现第1峰值,同CO类似,SO₂第1峰值的浓度值大于第2峰值。O₃平均浓度的日变化有“单峰单谷”的特点,08:00最小,14:00最大,00:00-

23:00的O₃平均浓度都是南方大于北方。

CO、SO₂、NO₂白天和夜间平均浓度的变化特征如表4所示,不论白天还是夜间,CO、SO₂、NO₂的平均浓度均是北方大于南方。时间分布上,无论南北CO、NO₂平均浓度白天都小于夜间,而北方SO₂白天平均浓度略大于夜间,南方则浓度相当;从下降速率来看,除NO₂相差不大外,无论南北CO和SO₂下降速率都白天大于夜间。

表4 南北方气体污染物白天和夜间浓度特征

Table 4 The concentration features of gaseous pollutants in northern and southern cities of China

地区	污染物	白天平均浓度/(μg·m ⁻³)	夜间平均浓度/(μg·m ⁻³)	白天下降速率/(μg·m ⁻³ ·h ⁻¹)	夜间下降速率/(μg·m ⁻³ ·h ⁻¹)
北方	NO ₂	39.48	48.18	1.98	1.45
	SO ₂	31.88	27.22	0.84	0.48
	CO	1 233.33	1 302.5	60	12.22
南方	NO ₂	34.33	41.99	1.69	1.7
	SO ₂	15.6	15.14	0.47	0.07
	CO	890	938.33	31.43	7.78

5 结论

通过对中国2014年12月-2015年11月171个城市颗粒物和气体污染物时空特征的统计分析,得出其时空分布特征和南北区域间的差异,为对空气污染预

防及重点控制提供一定的参考。

(1)中国171个城市中达PM_{2.5}二级标准限值的城市占100%,而PM₁₀为95.91%。年均出现PM_{2.5}污染日的频率为17.23%,PM₁₀为10.33%;PM_{2.5}和PM₁₀年均浓度呈正相关,PM_{2.5}浓度可视为占PM₁₀浓度的47%;达

NO₂一级标准限值的城市为27.49%,而SO₂为94.74%。

(2)PM₁₀、PM_{2.5}和SO₂、CO、NO₂的浓度冬春季节高于夏秋季节,O₃反之。12月-次年3月和6、11月污染物(O₃除外)南北方差距大,其他月份差距很小。重污染区主要分布在环渤海地区、长三角地区、西北地区、四川盆地和两湖地区,而珠三角为CO和O₃浓度高值区。北方PM_{2.5}年均浓度为62.28 μg/m³,比南方高12.62 μg/m³,北方PM₁₀年均浓度为115.98 μg/m³,比南方高36.34 μg/m³;北方SO₂、NO₂、CO年均浓度分别为38.16、42.28、1256.67 μg/m³,比南方高18.43、3.56、315.83 μg/m³,南北O₃年均浓度分别为52.26 μg/m³和52.24 μg/m³。

(3)秋末冬初南北方PM_{2.5}/PM₁₀比值大,其他季节小。虽然北方颗粒物浓度均大于南方,但是PM_{2.5}/PM₁₀北方却小于南方(2015年11月除外),因此,北方PM_{2.5-10}在PM₁₀中所占比重比南方大。

(4)PM_{2.5}、PM₁₀、CO、NO₂的日变化呈“双峰双谷”型,O₃呈“单峰单谷”型。南北方污染物浓度夜间高于白天,白天的下降速率大于夜间;白天和夜间颗粒物、CO、SO₂和NO₂平均浓度均是北方高于南方,O₃平均浓度日变化南北相当,北方下降速率均大于南方。

[参考文献]

- [1] 殷永文,程金平,段玉森,等.上海市霾期间PM_{2.5}、PM₁₀污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析[J].环境科学,2011,32(7):1894-1898.
Yin Yongwen, Cheng Jinping, Duan Yusen, et al. Correlation analysis between the PM_{2.5}, PM₁₀ sampled from the hazy day and the number of outpatient about breathing sections, breathing sections of pediatrics in Shanghai[J]. Environmental Science, 2011,32(7):1894-1898.
- [2] 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.
- [3] Lu X, Teng Y, Fung J C H, et al. Estimation of health and economic costs of air pollution over the Pearl River Delta region in China[J]. Science of the Total Environment, 2016 (566/567):134-143.
- [4] Leng C, Duan J, Xu C, et al. Insights into a historic severe haze weather in Shanghai: synoptic situation, boundary layer and pollutants[J]. Atmospheric Chemistry & Physics, 2015,15(22):32561-32605.
- [5] 廖晓农,孙兆彬,何娜,等.边界层低空急流导致北京PM_{2.5}迅速下降及其形成机制的个例分析[J].环境科学,2016,37(1):51-59.
Liao Xiaonong, Sun Zhaobin, He Na, et al. A case study on the rapid decrease of PM_{2.5} pollution in Beijing related with BL jet and its mechanism[J]. Environmental Science, 2016, 37(1):51-59.
- [6] 俞科爱,胡晓,黄旋旋,等.宁波区域霾过程的天气分型及环流场特征[J].气象,2015(12):1514-1524.
Yu Ke'ai, Hu Xiao, Huang Xuanxuan, et al. Weather types and characteristics of atmospheric circulation for regional haze in Ningbo[J]. Meteorological, 2015(12):1514-1524.
- [7] Zanganeh Shahraki S. The Analysis of Tehran Urban Sprawl and Its Effect on Agricultural Lands[D]. Geography and Urban Planning, University of Tehran, Persian: 2007.
- [8] 李名升,张建辉,张殷俊,等.近10年中国大气PM₁₀污染时空格局演变[J].地理学报,2013,68(11):1504-1512.
Li Mingsheng, Zhang Jianhui, Zhang Yinjun, et al. Spatio-temporal pattern changes of ambient air PM₁₀ pollution in China in recent 10 years[J]. Journal of Geography, 2013,68 (11):1504-1512.
- [9] 刘亚梦.我国大气污染物时空分布及其与气象因素的关系[D].兰州:兰州大学,2014.
Liu Yameng. The Spatial and Temporal Distribution of Atmospheric Pollutants in China and Its Relationship with Meteorological Factors[D]. Lanzhou: Journal of Lanzhou University, 2014.
- [10] Chai F, Gao J, Chen Z, et al. Spatial and temporal variation of particulate matter and gaseous pollutants in 26 cities in China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2014, 26(1): 75-82.
- [11] Zhao S, Yu Y, Yin D, et al. Annual and diurnal variations of gaseous and particulate pollutants in 31 provincial capital cities based on *in situ* air quality monitoring data from China National Environmental Monitoring Center[J]. Environment international, 2016(86):92-106.
- [12] 白鹤鸣.京津冀地区空气污染时空分布研究[D].南京:南京信息工程大学,2013.
Bai Heming. Study on Spatial and Temporal Distribution of Air Pollution in Beijing-Tianjin-Hebei[D]. Nanjing: Nanjing University of Information Science & Technology, 2013.
- [13] HJ 633-2012,环境空气质量指数(AQI)技术规定[S].
HJ 633-2012, Technical Regulations of Environmental Air Quality Index (AQI)[S].
- [14] Filonchyk M, Yan H, Yang S, et al. A study of PM_{2.5} and PM₁₀ concentrations in the atmosphere of large cities in Gansu Province, China, in summer period[J]. Journal of Earth System Science, 2016,125(6):1175-1187.
- [15] Sheppard L, Levy D, Checkoway H. Correcting for the effects of location and atmospheric conditions on air pollution exposures in a case-crossover study[J]. Journal of Exposure Analysis & Environmental Epidemiology, 2001, 11(2): 86-96.
- [16] Wang Y, Zhuang G, Chen S, et al. Characteristics and sources of formic, acetic and oxalic acids in PM_{2.5} and PM₁₀ aero-

- sols in Beijing, China[J]. Atmospheric Research, 2007,84(2): 169–181.
- [17] Wang S, Liao T, Wang L, et al. Process analysis of characteristics of the boundary layer during a heavy haze pollution episode in an inland megacity, China[J]. Journal of Environmental Sciences, 2016(40):138–144.
- [18] 王琳琳, 王淑兰, 王新锋,等. 北京市2009年8月大气颗粒物污染特征[J]. 中国环境科学, 2011,31(4):553–560.
Wang Linlin, Wang Shulan, Wang Xinfeng, et al. Characteristics of particulate matter pollution during August 2009 in Beijing[J]. Chinese Journal of Environmental Science, 2011, 31(4):553–560.
- [19] Zhang X Y, Arimoto R, Zhu G H, et al. Concentration, size-distribution and deposition of mineral aerosol over Chinese desert regions[J]. Tellus Series B-Chemical & Physical Meteorology, 1998,50(4):317–330.
- [20] 张玉强. 研究中国地面臭氧时空分布特征[D]. 北京:清华大学, 2011.
Zhang Yuqiang. Seasonal and Spatial Variability of Surface Ozone over China[D]. Beijing:Tsinghua University, 2011.
- [21] 谢学军,李杰,王自发. 兰州城区冬季大气污染物日变化的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2010,15(5):695–703.
Xie Xuejun, Li Jie, Wang Zifa. Numerical simulation of diurnal variations of the air pollutants in winter of Lanzhou City[J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(5): 695–703.
- [22] 韩素芹,冯银厂,边海,等. 天津大气污染物日变化特征的WRF-Chem数值模拟[J]. 中国环境科学, 2008,28(9):828–832.
Han Suqin, Feng Yinchang, Bai Hai, et al. Numerical simulation of diurnal variation of major pollutants with WRF-Chem model in Tianjin[J]. China Environmental Science, 2008,28(9):828–832.