

# 中国南北方大气颗粒物和气体污染物的时空分布特征

杨秀梅, 马敏劲, 谭子渊, 朱安豹, 李旭<sup>1</sup>

(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, 兰州, 730000)

**摘要:** 利用中国环境监测总站 2014 年 12 月至 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  $PM_{10}$  污染日的频率分别为 17.23% 和 10.33%,  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$  具有较好的线性相关性,  $PM_{2.5}$  浓度约占  $PM_{10}$  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 ( $O_3$  除外), 比值  $PM_{2.5}/PM_{10}$  在秋末冬初大, 其他季节小。3) 北方  $PM_{2.5}$  年均浓度为  $62.28 \mu g/m^3$ , 比南方高  $12.62 \mu g/m^3$ , 北方  $PM_{10}$  年均浓度为  $115.98 \mu g/m^3$ , 比南方高  $36.34 \mu g/m^3$ , 虽然北方颗粒物浓度比南方大, 但除 2015 年 11 月外,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  北方都小于南方; 北方  $SO_2$ 、 $NO_2$ 、 $CO$  年均浓度分别为  $38.16 \mu g/m^3$ 、 $42.28 \mu g/m^3$ 、 $1256.67 \mu g/m^3$ , 比南方高  $18.43 \mu g/m^3$ 、 $3.56 \mu g/m^3$ 、 $315.83 \mu g/m^3$ , 南北  $O_3$  年均浓度相当。4) 从日变化看, 污染物平均浓度 ( $O_3$  和  $SO_2$  除外) 白天低于夜间, 下降速率白天大于夜间; 南北  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $CO$ 、 $NO_2$  平均浓度日变化呈“双峰双谷”型,  $O_3$  呈“单峰单谷”型; 日变化曲线还表明, 日间和夜间北方  $PM_{2.5}$ 、 $PM_{10}$ 、 $CO$ 、 $NO_2$  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; 日变化

**中图分类号:** X511

<sup>1</sup> 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: 杨秀梅 (1990-), 女, 甘肃会宁人, 兰州大学硕士研究生, 主要从事空气污染方面的研究. E-mail: yangxm15@lzu.edu.cn

通讯作者: 马敏劲 (1983-), 男, 云南昭通人, 副教授, 主要研究方向为大气边界层, 空气污染及其数值模拟. E-mail: minjinma@lzu.edu.cn

# Temporal and spatial distribution of atmospheric particulate matter and gaseous pollutants between Northern China and Southern China

Xiumei Yang, Minjin Ma, Ziyuan Tan, Anbao Zhu, Xu li

(The Gansu Key Laboratory of Arid Climate Change and Reducing Disaster, College of Atmospheric Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000)

**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 1)  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  episode days were 17.23% and 10.33% in China, respectively.  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  concentration had a good linear correlation.  $PM_{2.5}$  accounted for about 47% of  $PM_{10}$  mass concentrations. The heavily polluted cities were mainly located in Bohai Rim, Yangtze River Delta, Northwest China, Sichuan Basin, Hubei and Hunan Provinces. 2) 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  $O_3$ ). The ratios of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  were large in later autumn and early winter, but small in the other seasons. 3) The annual average of  $PM_{2.5}$  concentrations was  $62.28 \mu g/m^3$  in Northern China, which was  $12.62 \mu g/m^3$  higher than that in the South, as well as  $PM_{10}$  annual average  $115.98 \mu g/m^3$  in the North,  $36.34 \mu g/m^3$  higher than that in the South. Although the particulate matter concentration in Northern China is larger than that in the South,  $PM_{2.5}/PM_{10}$  (except November 2015) was reversed between the North and the South. The concentrations of  $SO_2$  ( $38.16 \mu g/m^3$ ),  $NO_2$  ( $42.28 \mu g/m^3$ ),  $CO$  ( $1256.67 \mu g/m^3$ ) in the North were  $18.43 \mu g/m^3$ ,  $3.56 \mu g/m^3$ ,  $315.83 \mu g/m^3$  higher than the values of the South, respectively. However, the annual average concentration of  $O_3$  in the North was fairly close to the South. 4) The daily mean concentrations of pollutants (except  $O_3$  and  $SO_2$ ) were higher in nighttime than that in daytime. The diurnal variation of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO$ ,  $NO_2$  concentration in Northern and Southern China both showed a “double peak and double valley” variation, and  $O_3$  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 the descending rates of  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$ ,  $CO$ ,  $NO_2$  concentrations had the similar comparison as pollutant concentrations between the North and the South.

**Key words:** particulate matter; gaseous pollutants; North-south differences; diurnal variation

引言

城市空气质量对气候、人体健康、国民经济等有重要的影响，流行病学研究曾表明大气颗粒物和气体污染物与人体健康密切相关<sup>[1]</sup>，2010 年全世界有 330 万人过早死亡是由室外高浓度的 PM<sub>2.5</sub> 污染引起<sup>[2]</sup>，仅中国珠三角地区，2013 年由 NO<sub>2</sub>、O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub> 污染引起 1.32-2.28 万人死亡，造成经济损失 147.68-253.05 亿<sup>[3]</sup>。近年来空气污染事件频发<sup>[4-6]</sup>，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，为本文衡量大气颗粒物和气体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<sup>[7]</sup>。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<sub>10</sub> 污染重于南方，两者差异主要表现在北方采暖期<sup>[8]</sup>，SO<sub>2</sub> 和 PM<sub>10</sub> 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<sup>[9]</sup>；Fahe Chai<sup>[10]</sup> 指出北方 SO<sub>2</sub>、CO 浓度明显大于南方，但 O<sub>3</sub> 和 NO<sub>2</sub> 却不明显；时间变化上，31 个省会城市 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、CO 日变化特征明显，在一天的 16:00 出现最低值，O<sub>3</sub> 则在午后出现最高值<sup>[11]</sup>；季节分布上也不均衡，白鹤鸣<sup>[12]</sup> 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 种气体污染物的空间分布和时间变化特征，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 日至 2015 年 11 月 31 日 171 个城市的大气常规污染物观测资料，包括 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 的逐小时质量浓度资料，按《环境空气质量标准》(GB 3095-2012) 的标准浓度限值，对 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> 进行污染浓度等级划分，见表 1。

表 1 环境空气污染物基本项目浓度限值<sup>[13]</sup>  
Tab.1 Air quality standards of ambient air pollutants<sup>[13]</sup>

序号	污染物项目	平均时间	浓度限值 (μg/m <sup>3</sup> )	
			一级	二级
1	二氧化硫 (SO <sub>2</sub> )	年平均	20	60
		24h 平均	50	150
2	二氧化氮 (NO <sub>2</sub> )	年平均	40	40
		24h 平均	80	80
3	一氧化碳 (CO)	24h 平均	4000	4000
4	颗粒物 (粒径小于等于 10 μm)	年平均	40	70
		24h 平均	50	150
5	颗粒物 (粒径小于等于 2.5 μm)	年平均	15	35
		24h 平均	35	75

通过统计方法，得到 2014 年 12 至 2015 年 11 月各监测点 PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 浓度的日均值，当 PM<sub>2.5</sub> 浓度的日均值大于 75 μg/m<sup>3</sup> 时，则这一天为 PM<sub>2.5</sub> 污染日；当 PM<sub>10</sub> 浓度的日均值大于 150 μg/m<sup>3</sup> 时，记这一天为 PM<sub>10</sub> 污染日。当颗粒物的日均值小于 **一级浓度** 时 (PM<sub>2.5</sub><35 μg/m<sup>3</sup>，PM<sub>10</sub><**70** μg/m<sup>3</sup>)，则记为无颗粒物污染日<sup>[14]</sup>。

## 2 污染物年平均浓度分布特征

颗粒物是空气污染中普遍且危害较大的污染物之一<sup>[15]</sup>，其中可吸入颗粒物是影响我国环境空气质量的首要污染物。为分析我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  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  年均浓度，如图 1 所示， $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  整体分布呈现出由北向南降低的趋势，北方城市  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度高，南方低。达到  $PM_{2.5}$  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， $PM_{2.5}$  浓度变化范围为 40.91-93.48  $\mu g/m^3$ ，均值为 55.90  $\mu g/m^3$ ；与  $PM_{2.5}$  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  $\mu g/m^3$ ，均值为 95.79  $\mu g/m^3$ ；在 171 个城市中，达到  $PM_{2.5}$  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 月至 2015 年 11 月出现  $PM_{2.5}$  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  $PM_{2.5}$  污染日的频率为 26.68%，无  $PM_{10}$  污染日的频率为 14.50%， $PM_{2.5}$  浓度和  $PM_{10}$  浓度介于一级极限值和三级极限值之间发生频率分别占 56.09%和 75.17%。

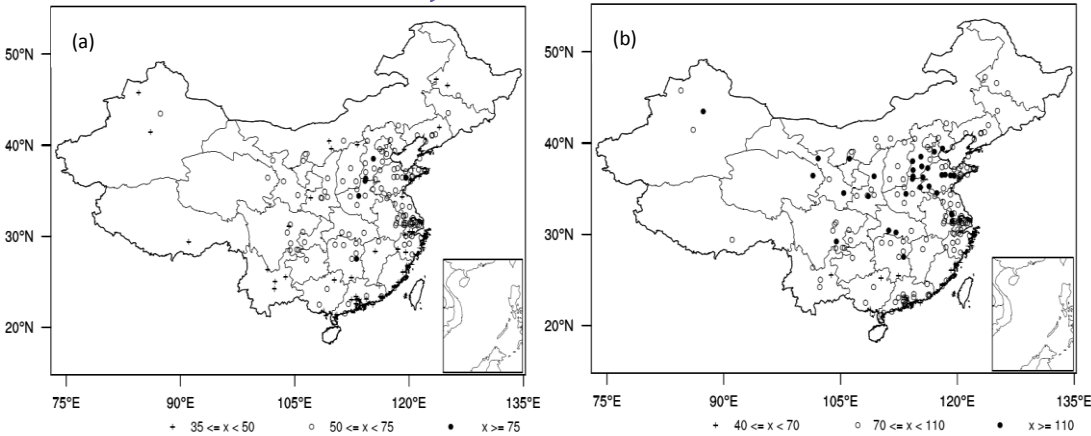


图 1 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国  $PM_{10}$  (a) 和  $PM_{2.5}$  (b) 年平均浓度空间分布图(单位:  $\mu g/m^3$ )

Fig.1 Spatial distributions of annual average of  $PM_{10}$  (a) and  $PM_{2.5}$  (b) mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China (unit:  $\mu g/m^3$ )

$PM_{2.5}$  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  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  浓度年均值的线性相关关系，可决系数  $R^2$  达 0.76， $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$  有较好的正相关关系，一元回归方程的斜率为 0.47，表明全国  $PM_{2.5}$  浓度约占  $PM_{10}$  浓度的 47%。

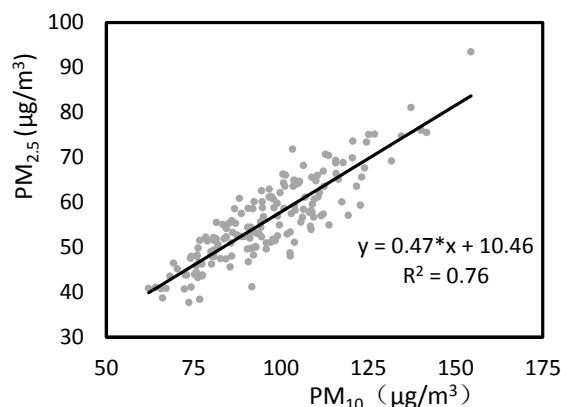
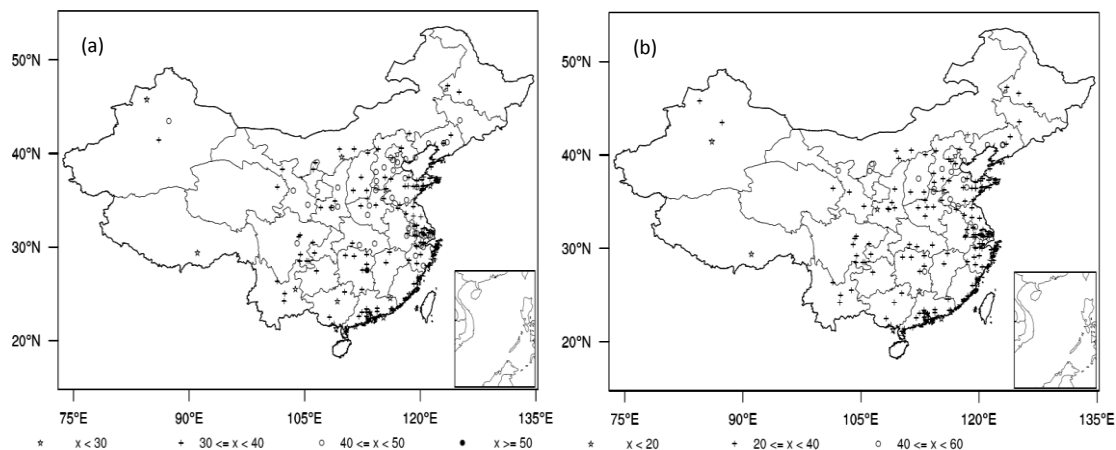


图2 2014年12月到2015年11月中国大陆171个城市PM<sub>2.5</sub>和PM<sub>10</sub>浓度年均值的线性相关图

Fig.2 The linear relationship between PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> mass concentrations in 171 cities from December 2014 to November 2015

气体污染物中，NO<sub>2</sub> 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<sub>2</sub> 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 3a、3b）；长三角和两湖地区SO<sub>2</sub> 浓度也明显要高于周围地区。SO<sub>2</sub> 浓度的年均值为 30.04 μg/m<sup>3</sup>，NO<sub>2</sub> 浓度的年均值为 37.38 μg/m<sup>3</sup>，在 171 个监测城市中，NO<sub>2</sub> 浓度达到一级标准限值的城市达 27.49%，SO<sub>2</sub> 浓度都未超过二级标准限值，而介于二级标准限值和一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<sub>3</sub> 和CO 浓度年均值分布图（图 3c、3d）可以看出，CO 浓度北方明显高于南方，O<sub>3</sub> 浓度南北差距不大，环渤海、长三角、西北地区部分地区、珠三角O<sub>3</sub> 和CO 浓度明显高于其他地区，湖南虽然O<sub>3</sub> 浓度不高，但是CO 浓度却很高；而西藏拉萨虽然颗粒物和其他气体污染物浓度较低，但是O<sub>3</sub> 浓度却很高，年均值达 62.45μg/m<sup>3</sup>。



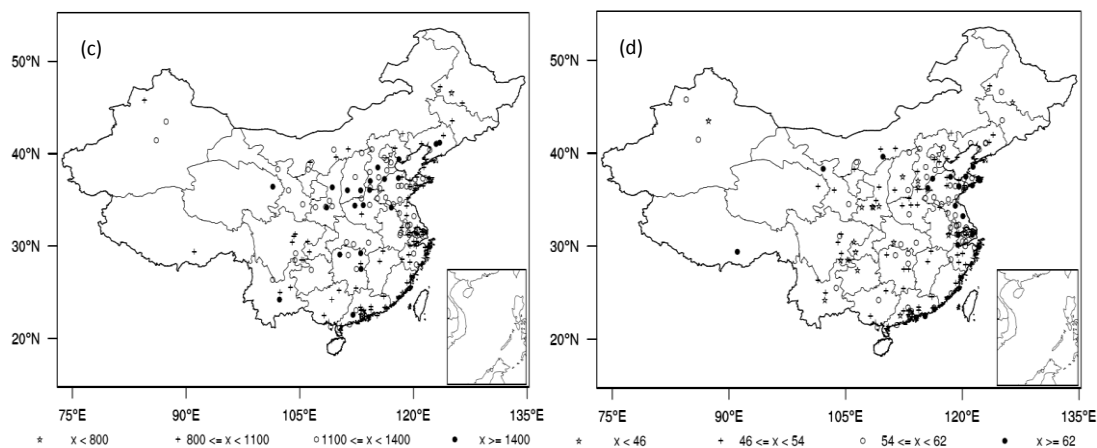


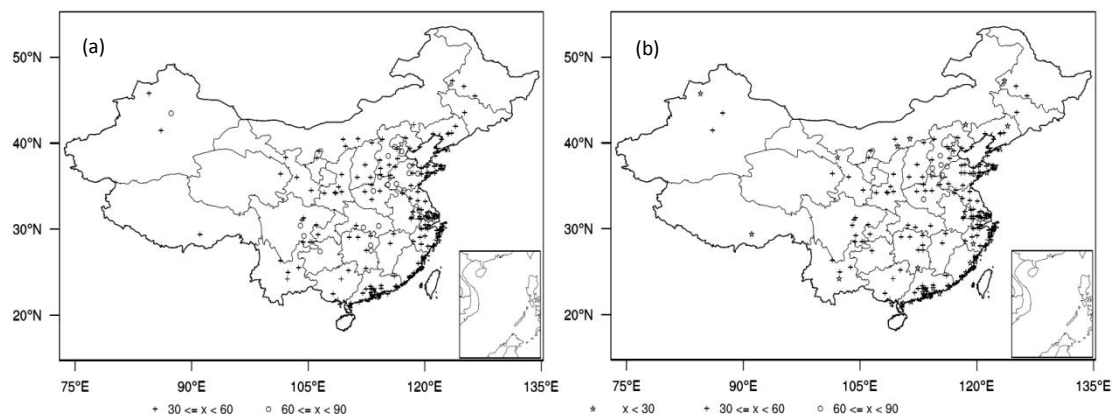
图3 2014年12月到2015年11月中国大陆NO<sub>2</sub>(a)、SO<sub>2</sub>(b)、CO(c)、O<sub>3</sub>(d)浓度年均值分布图(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.3 Spatial distributions of annual average of NO<sub>2</sub> (a), SO<sub>2</sub> (b), CO (c), O<sub>3</sub> (d) mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

### 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月到2015年11月中国171个城市PM<sub>2.5</sub>的空间分布存在明显的季节差异,春季PM<sub>2.5</sub>平均浓度为 $51.66 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,夏季为 $39.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,秋季为 $51.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,冬季为 $81.14 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ,PM<sub>2.5</sub>浓度夏季最低,春秋次之,冬季最重。春季PM<sub>2.5</sub>的大气中心主要分布在三个区,分别是华北地区、四川盆地、两湖地区(图4a);夏季大气中心在河北地区(图4b),秋季在河北地区,两河流域污染物浓度相当,以中国南方,东北部分地区及高海拔的西藏地区空气质量较好(图4c);冬季PM<sub>2.5</sub>的浓度普遍偏高,高污染中心主要有五个地区,分别为华北地区、长江三角洲地区,北湖南地区、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4d)。





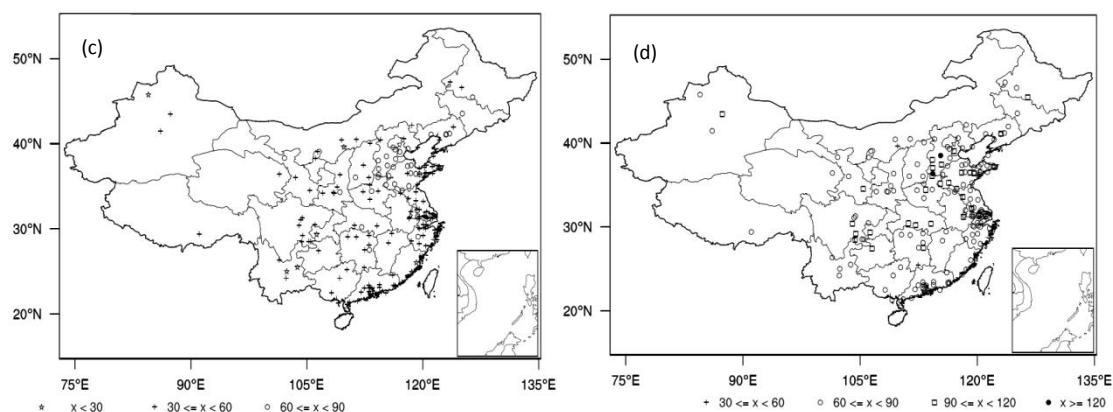


图4 2014年12月到2015年11月中国PM<sub>2.5</sub>浓度季节(a:春季、b:夏季、c:秋季、d:冬季)分布图(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.4 Spatial distributions of seasonal mean PM<sub>2.5</sub> mass concentrations from December 2014 to November 2015 in China (a: spring, b: summer, c: autumn, d: winter) (unit:  $\text{g}/\text{m}^3$ )

从春季到冬季, PM<sub>10</sub> 平均浓度依次为  $97.27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $69.25 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $89.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $127.48 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 可见 PM<sub>10</sub> 的浓度夏季最低, 秋季次之, 春季较夏季重, 冬季最重, 长江以北 PM<sub>10</sub> 浓度普遍偏高(除了东北的部分地区)(图 5a); 夏季除了河北河南大部分地区 PM<sub>10</sub> 浓度较低, 东南沿海及我国的西南地区几乎没有出现 PM<sub>10</sub> 污染(图 5b); 秋季 PM<sub>10</sub> 浓度分布格局和春季的相似, 虽然 PM<sub>10</sub> 浓度春季比秋季高, 但南方污染物浓度秋季较春季轻(图 5c); 冬季 PM<sub>10</sub> 的浓度普遍偏高, 高污染中心成片分布, 几乎所有的城市 PM<sub>10</sub> 浓度超过  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 只有长江以南的少部分城市和高海拔的拉萨 PM<sub>10</sub> 浓度较低(图 5d)。

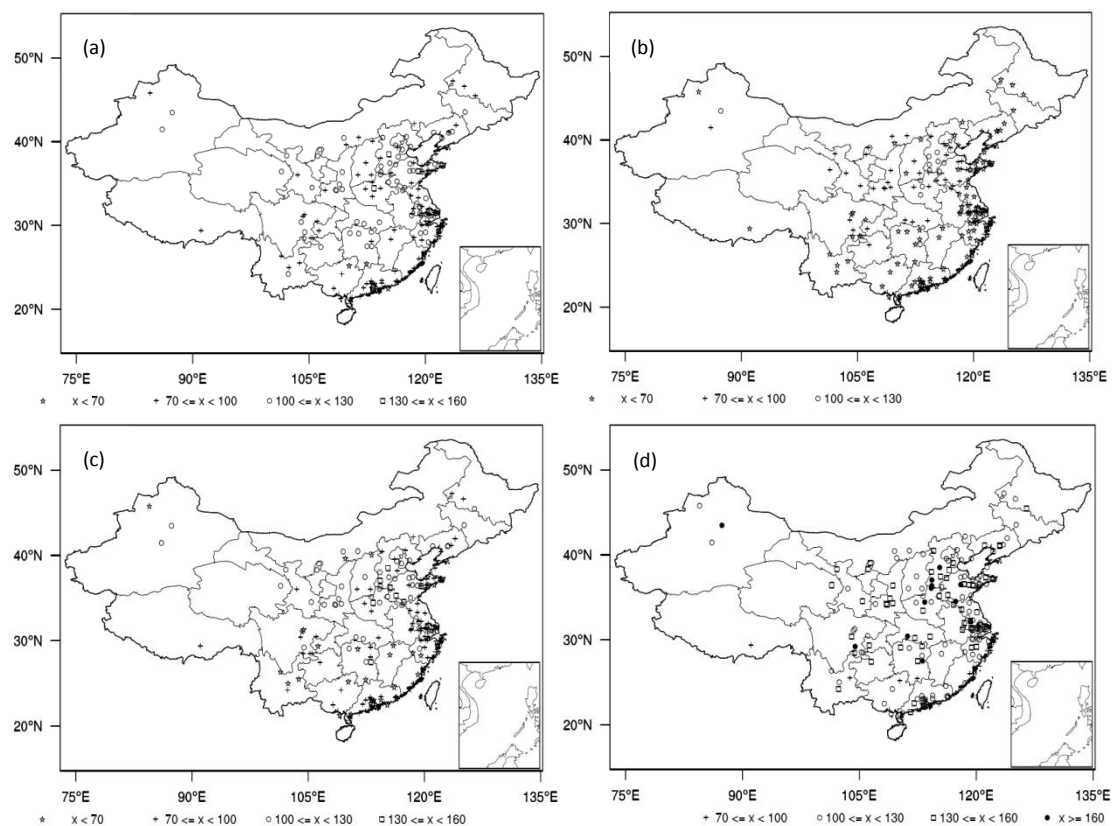


图5 2014年12月到2015年11月中国大陆PM<sub>10</sub>浓度季节(a:春季、b:夏季、c:秋季、d:冬季)分布图(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.5 Spatial distributions of seasonal mean PM<sub>10</sub> mass concentrations from December 2014 to November 2015

spring, b: summer, c: autumn, d: winter) (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

中国南、北方颗粒物污染有明显的季节变化， $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  的浓度变化几乎同步，春冬季污染最重，1 月达到峰值，夏季污染最轻（图 6），北方  $\text{PM}_{2.5}$  年平均浓度为  $62.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比南方高  $12.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ， $\text{PM}_{10}$  年平均浓度为  $115.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ，比南方高  $36.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。南北方  $\text{PM}_{10}$  的差异较  $\text{PM}_{2.5}$  大两倍，这与南北  $\text{PM}_{2.5-10}$  分布差异有关。 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  月均值南北差距较大的时段有三个，第一是 12、1、11 月，与北方冬季供暖有很大关系；第二是 3 月份，北方沙尘天气较多，因此南北在较大的差异；第三是 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。

比值  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  能够表征细颗粒物在可吸入颗粒物中所占的比重<sup>[16]</sup>，通过  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  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<sup>[17]</sup>。由图 7 可见， $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  有明显的季节变化，南北方都有秋末冬初  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  值大、其他季节小的特征，即秋末冬初相对其他时间段增加了可吸入颗粒物浓度。北方  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  年均值为 0.53，南方  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  年均值为 0.61，虽然北方  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度均大于南方，但  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  北方却小于南方（2015 年 11 月除外），可见，北方  $\text{PM}_{2.5-10}$  在  $\text{PM}_{10}$  中所占的比重比南方大， $\text{PM}_{2.5}$  所占的比重比南方小。王琳琳等<sup>[18]</sup>研究表明，在有污染的天气条件下  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  值明显升高。我国冬春季节大气污染严重，夏秋季节轻， $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  季节变化与污染物浓度变化具有一致性。另外，利用  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  来度量沙尘的源<sup>[19]</sup>，北方 3~5 月份  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  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。

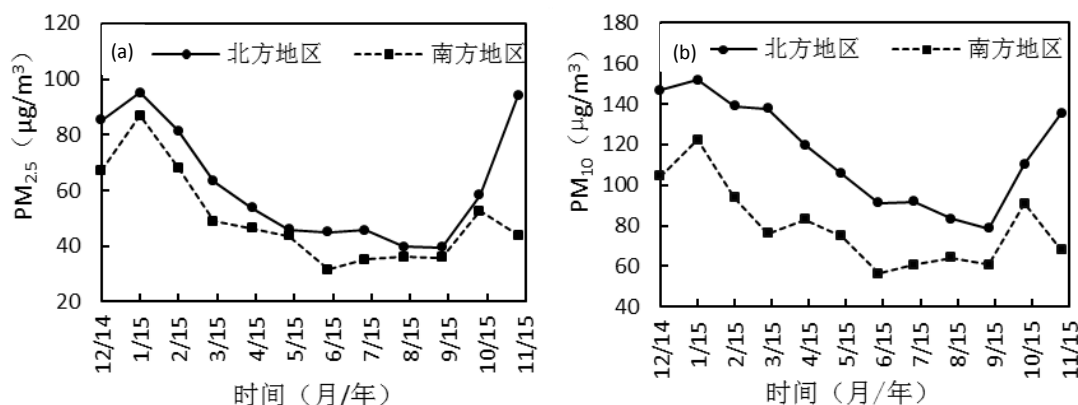


图 6 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国南、北方  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度月变化 (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.6 Monthly variations of the  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$  in Northern and Southern cities December 2014 to November 2015 (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

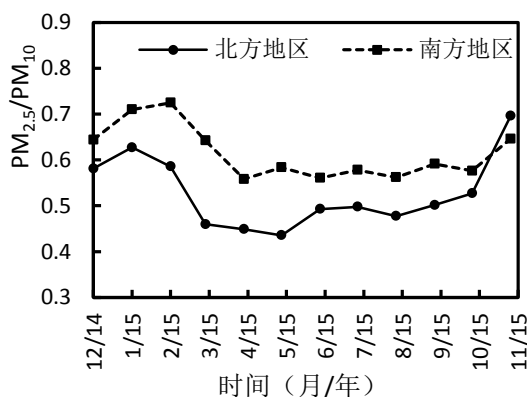


图 7 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国南、北方  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  月变化

Fig.7 Monthly variations of the  $\text{PM}_{2.5}/\text{PM}_{10}$  in Northern and Southern cities December 2014 to November



### 3.2 气体污染物浓度分布及变化特征

从 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国 171 个城市  $\text{NO}_2$  浓度的季节分布图 (图 8) 可以看出,  $\text{NO}_2$  污染的整体水平较低, 南北方无明显差异, 春季  $\text{NO}_2$  平均浓度为  $36.64 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 夏季为  $26.94 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 秋季为  $37.36 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 冬季为  $48.57 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。 $\text{NO}_2$  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。

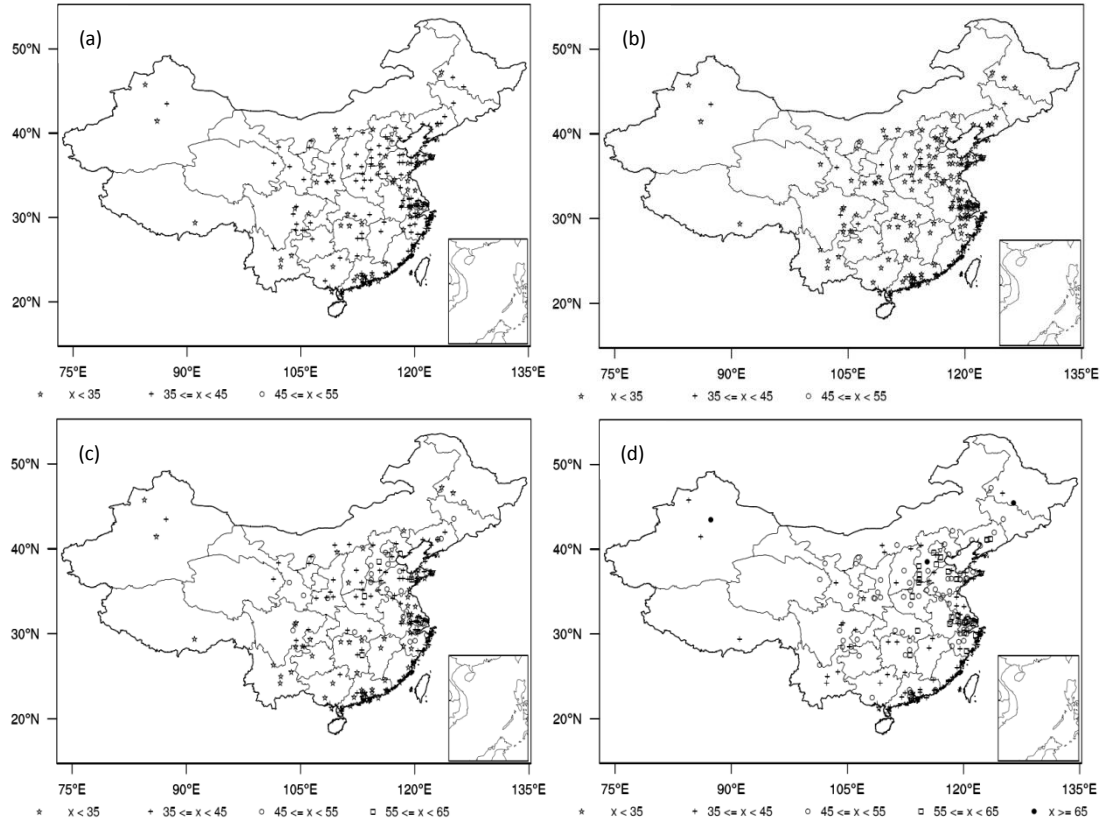


图 8 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国大陆  $\text{NO}_2$  浓度季节 (a: 春季; b: 夏季; c: 秋季; d: 冬季) 分布图 (单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.8 Spatial distributions of seasonal mean  $\text{NO}_2$  mass concentrations from December 2014 to November 2015

spring, b: summer, c: autumn, d: winter) (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

与  $\text{NO}_2$  变化一致,  $\text{SO}_2$ 、 $\text{CO}$  最大浓度出现出在冬季, 春秋次之, 夏季最小, 而  $\text{O}_3$  则不同, 夏季最大, 春季次之, 秋季较小, 冬季最小 (表 2)。四季中  $\text{SO}_2$  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  $\text{SO}_2$  高值中心, 东南沿海地区较低 (图略); 夏季除河南、湖南和宁夏北部  $\text{SO}_2$  浓度较高, 其他地方浓度较低; 冬季, 长江流域及其以北地区  $\text{SO}_2$  浓度明显高于其他地区, 而且明显高于其它三个季节, 约为其它季节的 2 倍, 冬季北方城市  $\text{SO}_2$  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,  $\text{SO}_2$  排放量也随之增加。

$\text{CO}$  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, 有两个主要污染中心, 一个出现在山西至河北一带, 另一个是湖南地区。冬季  $\text{CO}$  污染成片出现, 浓度高值中心明显增多, 主要有环渤海地区、陕西地区, 珠三角地区、四川盆地、湖南地区以及青海新疆一带 (图略)。

$\text{O}_3$  与其他气体污染物分布不尽相同 (图 9), 东部沿海  $\text{O}_3$  浓度高于西部内陆地区, 除夏

季外，O<sub>3</sub>浓度没有明显的南北差异。冬季 O<sub>3</sub>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 O<sub>3</sub>的高值中心，其他地方浓度相当；夏季北方 O<sub>3</sub>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<sub>气</sub>，另一方面会降<sub>雨</sub>化化学反应；秋季，O<sub>3</sub>高浓度区沿着大陆的东海岸分布，形成山东地区、长三角、珠三角三个高浓度中心。

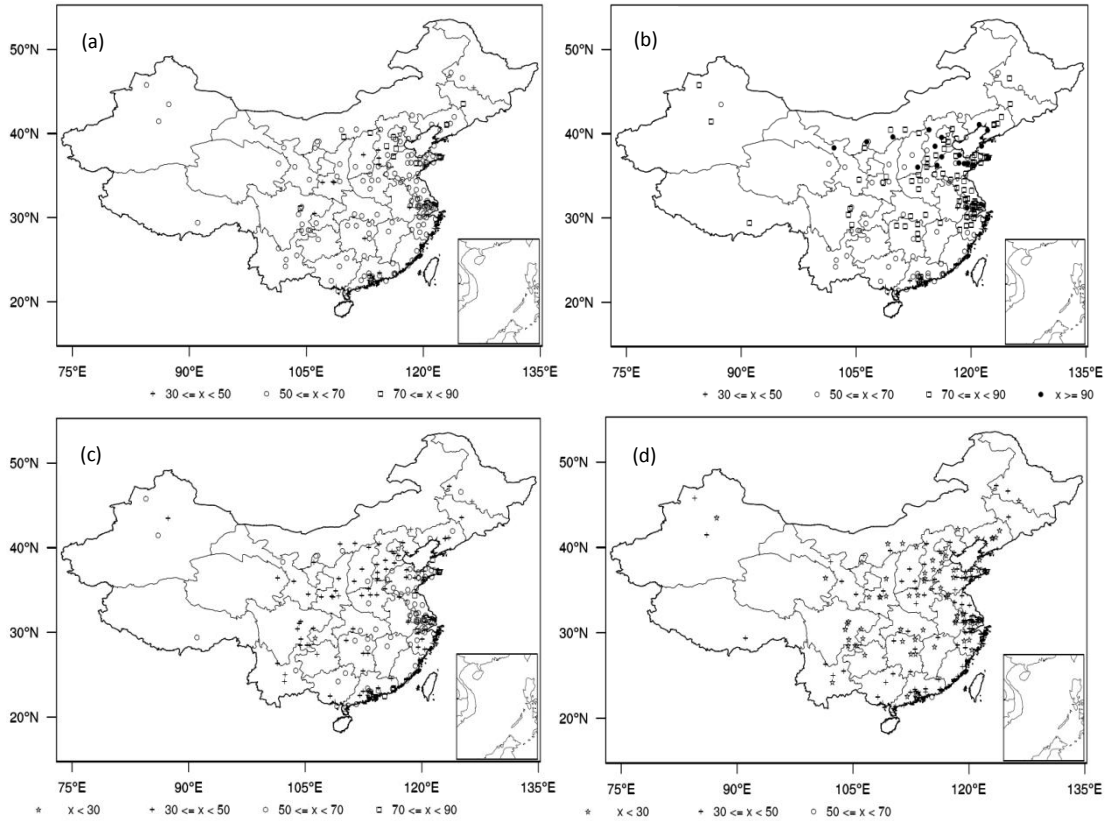


图9 2014年12月到2015年11月中国大陆O<sub>3</sub>浓度季节(a:春季;b:夏季;c:秋季;d:冬季)分布图(单位: µg/m<sup>3</sup>)

Fig.9 Spatial distributions of seasonal mean O<sub>3</sub> mass concentrations from December 2014 to November 2015 (spring, b: summer, c: autumn, d: winter) (unit: µg/m<sup>3</sup>)

表2 2014年12月到2015年11月中国CO、O<sub>3</sub>浓度的季节平均

Tab.2 Seasonal mean of SO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub> mass concentrations from December 2014 to November 2015.

污染物(µg/m <sup>3</sup> )	春季	夏季	秋季	冬季
SO <sub>2</sub>	29.92	21.65	22.41	46.17
CO	1010	890	1130	1510
O <sub>3</sub>	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、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>都具有明显的季节变化和南北差异，CO、SO<sub>2</sub>、NO<sub>2</sub>春冬季浓度高，夏秋季节浓度低，O<sub>3</sub>则相反。北方SO<sub>2</sub>年平均浓度为38.16 µg/m<sup>3</sup>，比南方高18.43 µg/m<sup>3</sup>；北方NO<sub>2</sub>年平均浓度为42.28 µg/m<sup>3</sup>，比南方高3.56 µg/m<sup>3</sup>；北方CO年平均浓度为1256.67 µg/m<sup>3</sup>，比南方高315.83 µg/m<sup>3</sup>；北方和南方O<sub>3</sub>年平均浓度分别为52.24 µg/m<sup>3</sup>和52.26 µg/m<sup>3</sup>。12月至次年3月，南北方CO、SO<sub>2</sub>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/m<sup>3</sup>，SO<sub>2</sub>为52.92 µg/m<sup>3</sup>，这个时段与北方供暖时间正好吻合，供暖期北方CO、SO<sub>2</sub>平均浓度明显高于南方；6-8月份

CO、SO<sub>2</sub> 浓度最低，CO、SO<sub>2</sub> 南北差距也非常小。与其它气体污染不同，北方 O<sub>3</sub> 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 O<sub>3</sub> 浓度略低于南方，4 月份之后，北方 O<sub>3</sub> 浓度大幅上升，6 月份达最大，高出南方 23.25 μg/m<sup>3</sup>，8 月份之后急剧减少，后浓度低于南方；O<sub>3</sub> 浓度与太阳辐射、温度有关<sup>[20]</sup>，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 O<sub>3</sub> 浓度并没有随着太阳高度角的增大而增大。

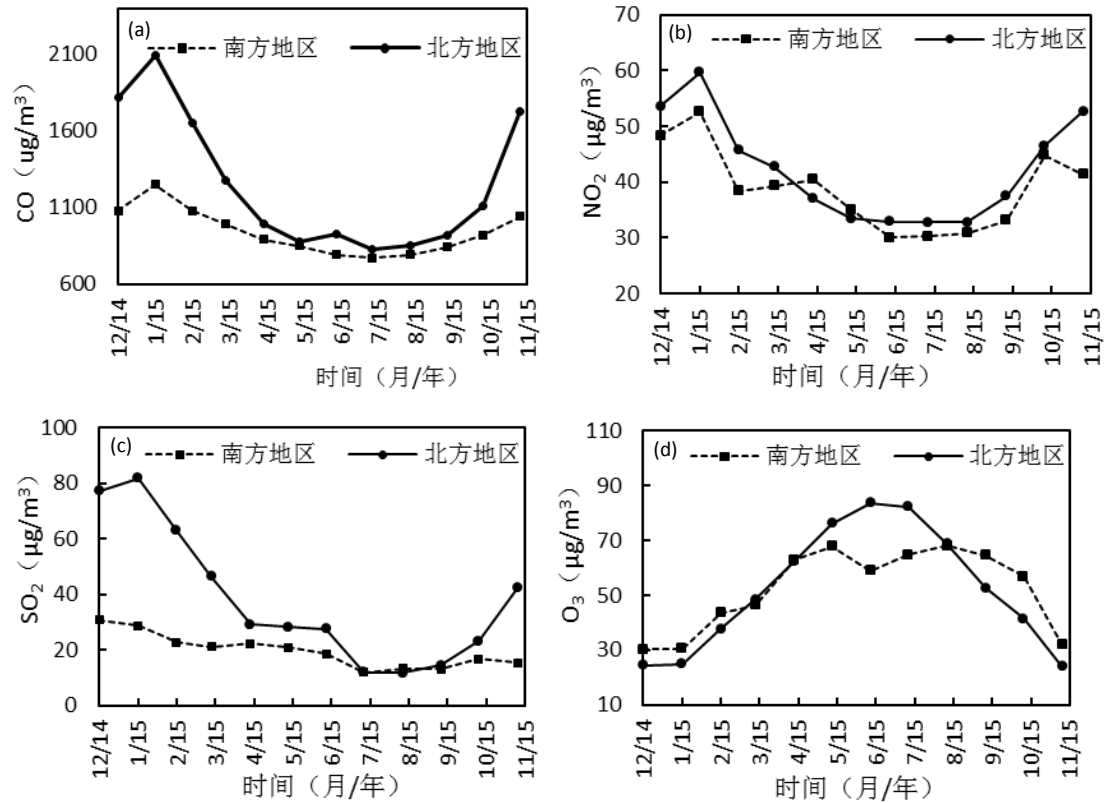


图 10 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国北方 4 种气体污染物浓度月变化(单位: μg/m<sup>3</sup>)  
Fig.10 Monthly variations of the gaseous pollutants in Northern and Southern cities December 2014 to November 2015 (unit: μg/m<sup>3</sup>)

#### 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、污染源密切相关，呈现不同的日变化特征<sup>[21-22]</sup>，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，PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 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 09:00-10:00 PM<sub>10</sub> 和 PM<sub>2.5</sub> 出现第一个峰值，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 前后达到第二个峰值，此时的浓度值与上午出现第一个峰值相当；22:00 之后，这两种污染物浓度值均缓慢下降，在 05:00 前后达到第二个谷值，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<sub>2.5</sub> 白天平均值为 44.73 μg/m<sup>3</sup>，夜间为 47.64 μg/m<sup>3</sup>，而北方 PM<sub>2.5</sub> 白天平均值为 63.56 μg/m<sup>3</sup>，夜间为 68.03 μg/m<sup>3</sup>；南北方 PM<sub>10</sub> 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 09:00-10:00，北方 PM<sub>2.5</sub> 下降速率为 1.54 μg/(m<sup>3</sup>·h)，而夜间 21:00 至次日 05:00，下降速率为 0.97 μg/(m<sup>3</sup>·h)；PM<sub>10</sub> 的在对应时段的下降速率分别为 3.30 μg/(m<sup>3</sup>·h)和 1.76 μg/(m<sup>3</sup>·h)；南方 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub> 白

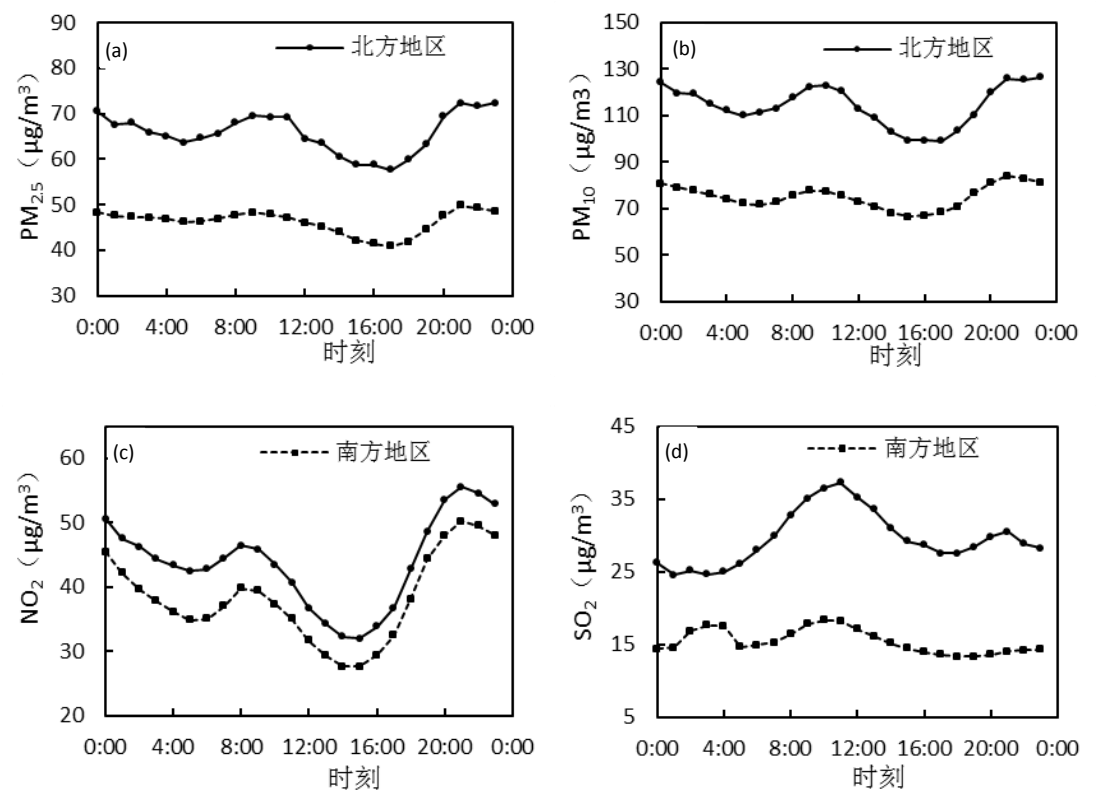
天与夜间的下降速率见表 3。因此，不论南方或北方，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 白天下降速率均大于夜间，不论白天或夜间，PM<sub>2.5</sub> 和 PM<sub>10</sub> 下降速率北方均大于南方。

表 3 南北方大气颗粒物白天和夜间浓度特征

Tab.3 The concentration features of atmospheric particulate matter in Northern and Southern cities.

		白天平均浓 度(μg/m <sup>3</sup> )	夜间平均浓 度(μg/m <sup>3</sup> )	白天下降速率 (μg/(m <sup>3</sup> .h))	夜间下降速率 (μg/(m <sup>3</sup> .h))
北方	PM <sub>2.5</sub>	63.56	68.03	1.54	0.97
	PM <sub>10</sub>	109.93	118.49	3.30	1.76
南方	PM <sub>2.5</sub>	44.73	47.64	0.88	0.41
	PM <sub>10</sub>	72.26	77.75	1.64	1.31

南北方气体污染物（除 O<sub>3</sub> 外）浓度的分布总体呈“双峰双谷”结构，NO<sub>2</sub> 和 CO 第一个峰值出现的时间比颗粒物的早 1 小时，10:00 之后迅速降低，14:00-15:00 到谷底，比颗粒物的早 1 小时，之后浓度又逐渐上升，在 21:00-22:00 前后达到第二个峰值，第二个峰值气体污染物的浓度比第一个峰值高。污染浓度逐渐积累，22:00 之后，NO<sub>2</sub> 和 CO 浓度值均缓慢下降，在 05:00 前后达到第二个谷值，但此时的浓度值高于白天 14:00-15:00 谷值浓度。NO<sub>2</sub> 与 SO<sub>2</sub> 的双峰结构不同，CO 第一个峰值的浓度大于第二个峰值，NO<sub>2</sub> 反之。SO<sub>2</sub> 浓度在 11:00-12:00 时出现第一峰值，同 CO 类似，SO<sub>2</sub> 第一峰值的浓度值大于第二峰值。O<sub>3</sub> 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 O<sub>3</sub> 平均浓度都是南方大于北方。



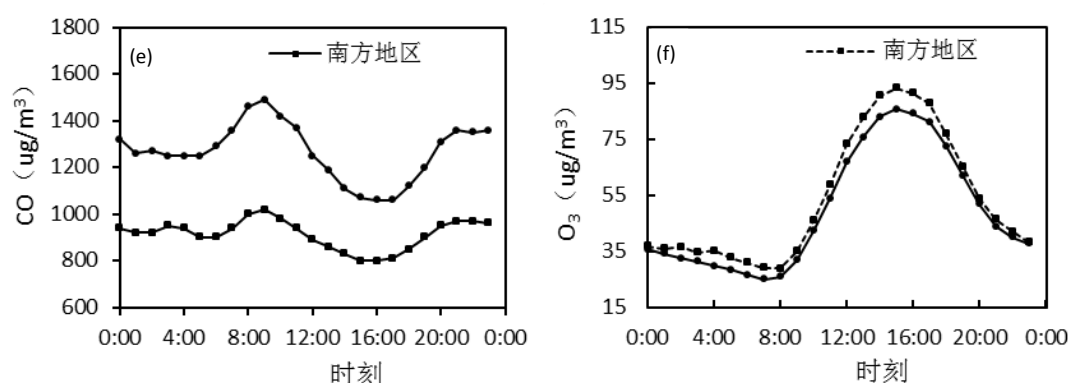


图 11 2014 年 12 月到 2015 年 11 月中国北方和南方污染物浓度日变化(单位:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

Fig.11 Diurnal variation of particulate matter and gaseous pollutants in Northern and Southern cities, December 2014 to November 2015 (unit:  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )

表 4 南北方气体污染物白天和夜间浓度特征

Tab.4 The concentration features of gaseous pollutants in Northern and Southern cities.

		白天平均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	夜间平均浓度 ( $\mu\text{g}/\text{m}^3$ )	白天下降速率 ( $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ )	夜间下降速率 ( $\mu\text{g}/(\text{m}^3 \cdot \text{h})$ )
北方	$\text{NO}_2$	39.48	48.18	1.98	1.45
	$\text{SO}_2$	31.88	27.22	0.84	0.48
	CO	1233.33	1302.5	60	12.22
南方	$\text{NO}_2$	34.33	41.99	1.69	1.7
	$\text{SO}_2$	15.6	15.14	0.47	0.07
	CO	890	938.33	31.43	7.78

CO、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  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、 $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$  的平均浓度均是北方大于南方。时间分布上, 无论南北 CO、 $\text{NO}_2$  平均浓度白天都小于夜间, 而  $\text{SO}_2$  北方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  $\text{NO}_2$  相差不大外, 无论南北 CO 和  $\text{SO}_2$  下降速率都白天大于夜间。

## 结论

通过对中国 2014 年 12 月到 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  $\text{PM}_{2.5}$  二级标准限值的城市占 100%, 而  $\text{PM}_{10}$  为 95.91%。年平均出现  $\text{PM}_{2.5}$  污染日的频率为 17.23%,  $\text{PM}_{10}$  的为 10.33%;  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  浓度呈正相关,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度可视为占  $\text{PM}_{10}$  浓度的 47%; 达  $\text{NO}_2$  一级标准限值的城市为 27.49%, 而  $\text{SO}_2$  为 94.74%。

(2)  $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{SO}_2$ 、CO、 $\text{NO}_2$  的浓度春冬季节高于夏秋季节,  $\text{O}_3$  反之。12 月到次年 3 月份、11 月污染物 ( $\text{O}_3$  除外) 南北方差距大, 其他月份差距很小。污染物高值中心由京津冀向西北到河西走廊, 另一个为两湖地区向西到四川盆地, 而珠三角为 CO 和  $\text{O}_3$  高浓度区。北方  $\text{PM}_{2.5}$  浓度年均值为  $62.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 比南方高  $12.62 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 北方  $\text{PM}_{10}$  浓度为  $115.98 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 比南方高  $36.34 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 北方  $\text{SO}_2$ 、 $\text{NO}_2$ 、CO 年均浓度分别为  $38.16 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $42.28 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $1256.67 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 比南方高  $18.43 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $3.56 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 、 $315.83 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 北  $\text{O}_3$

年均浓度分别为  $52.26 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $52.24 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

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

(4)  $\text{PM}_{2.5}$ 、 $\text{PM}_{10}$ 、 $\text{CO}$ 、 $\text{NO}_2$  的日变化呈“双峰双谷”型， $\text{O}_3$  呈“单峰单谷”型。南北方污染物的浓度夜间高于白天，白天的下降速率大于夜间；白天和夜间颗粒物浓度均是北方高于南方，北方下降速率均大于南方，不同的是南方  $\text{SO}_2$  白天和夜间浓度相当。



## 参考文献

- [1] 殷永文, 程金平, 段玉森, 等. 上海市霾期间 PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>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
- [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<sub>2.5</sub>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.
- [6] 俞科爱, 胡晓, 黄旋旋, 顾小丽, 徐宏辉, 刘洁, 丁烨毅, 郭建民. 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.
- [7] Zanganeh Shahraki S. The analysis of Tehran urban sprawl and its effect on agricultural lands[D]. MA Thesis in Geography and Urban Planning, University of Tehran, In Persian), 2007.
- [8] 李名升, 张建辉, 张殷俊, 等. 近 10 年中国大气 PM<sub>10</sub>污染时空格局演变[J]. 地理学报, 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]. 兰州大学, 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]. 南京信息工程大学, 2013.
- [13] 环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 [环保部标准 HJ 633—2012].
- [14] Filonchyk M, Yan H, Yang S, et al. A study of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> 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<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> aerosols 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.
- [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]. 清华大学, 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.
- [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.