

# 中国大陆城市 PM<sub>2.5</sub> 污染时空分布规律

李名升<sup>1</sup>,任晓霞<sup>2</sup>,于洋<sup>1</sup>,周磊<sup>1\*</sup> (1.中国环境监测总站,北京 100012; 2.中国地质环境监测院,北京 100081)

**摘要:**为分析中国大陆城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的时空分布规律,运用统计学方法和 GIS 技术对 2014 年开展 PM<sub>2.5</sub> 常规监测的 161 个城市进行分析, 结果发现:仅 8.1% 的城市年评价结果达标,日均质量浓度超标天数占 26.6%。夏季及春末、秋初 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较轻,冬季污染较重。PM<sub>2.5</sub> 的日变化曲线呈现不太明显的双峰分布,最低值出现在 16:00 前后,最高值出现在 10:00 前后,而凌晨至清晨保持相对较高的污染水平。京津冀及周边地区,中部地区的湖北、湖南、安徽 PM<sub>2.5</sub> 污染较重,东南沿海和云南、西藏污染相对较轻。PM<sub>2.5</sub> 的空间分布与风速、相对湿度、土地利用等因素的空间分布具有较强的相关性。PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 质量浓度比值的平均值为 0.591,空间上呈由西北向东南逐渐升高、南方高于北方的格局,时间上除 1、2 月份较高、5 月份较低外,其余月份基本稳定在 0.55~0.6。研究结果有利于从宏观上认识中国城市 PM<sub>2.5</sub> 污染的时空格局,从而针对性地开展环境污染防控。

**关键词:** 细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>); 时空分布; 可吸入颗粒物(PM<sub>10</sub>); 比值; 空气污染

**中图分类号:** X513      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-6923(2016)03-0641-10

**Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM<sub>2.5</sub>) pollution in mainland China.** LI Ming-sheng<sup>1</sup>, REN Xiao-xia<sup>2</sup>, YU Yang<sup>1</sup>, ZHOU Lei<sup>1\*</sup> (1.China National Environmental Monitoring Center, Beijing 100012, China; 2.China Institute of Geo-Environmental Monitoring, Beijing 100081, China). *China Environmental Science*, 2016,36(3): 641~650

**Abstract:** To investigate the spatiotemporal patterns law of PM<sub>2.5</sub> pollution in China, statistical methods and GIS technology were used to analyze the ground-level PM<sub>2.5</sub> monitoring results in 2014 from 161 cities at or above prefectural level in national air quality monitoring network. The results showed that only 8.1% cities met Grade II standard of ambient air quality standards (GB 3095~2012), and about 26.6% days failed to meet Grade II air quality standards. Diurnal PM<sub>2.5</sub> pollution was least in summer, late spring and early autumn, and was heavy in winter. Daily PM<sub>2.5</sub> concentration followed an indistinctive bimodal curve with minimum value around 16:00 and maximum value around 10:00. The pollution levels were relatively high from midnight to dawn. PM<sub>2.5</sub> pollution was serious in Beijing-Tianjin-Hebei region and its surrounding area, as well as Hubei, Hunan and Anhui. PM<sub>2.5</sub> pollution was least in southeast coast and Yunnan, Tibet. The spatial distribution of PM<sub>2.5</sub> was significantly correlated with spatial distributions of wind speed, relative humidity, and land use. The average ratio of PM<sub>2.5</sub> in PM<sub>10</sub> (PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio) was 0.591, which has spatial pattern of gradually increasing from northwest to southeast, and was higher in south region than in north region. Monthly average PM<sub>2.5</sub>/PM<sub>10</sub> ratio was basically stable ranged in 0.55~0.6, excluding higher in January, February, and lower in May. The results could benefit to further understanding on the spatiotemporal patterns of PM<sub>2.5</sub> pollution in China macroscopically, and promote to environmental pollution prevention and control measures accordingly.

**Key words:** PM<sub>2.5</sub>; spatial-temporal pattern; PM<sub>10</sub>; ratio; air pollution

细颗粒物(PM<sub>2.5</sub>)是指环境空气中空气动力学直径小于等于 2.5μm 的颗粒物,是大气复合型污染最重要的特征污染物<sup>[1]</sup>,与 O<sub>3</sub> 一起被认为是影响当今环境质量最重要的两种大气污染物<sup>[2]</sup>。为全面认识 PM<sub>2.5</sub> 的污染规律,国内外学者在 PM<sub>2.5</sub> 的元素组成<sup>[3-4]</sup>、来源解析<sup>[5-6]</sup>、健康效应<sup>[6]</sup>、跨界污染<sup>[7]</sup>等方面开展了卓有成效的研究,探讨气象因素<sup>[8-9]</sup>、植被覆盖、土地利用等<sup>[10]</sup>对 PM<sub>2.5</sub>

的影响,分析典型污染过程和重大历史事件的污染规律<sup>[8]</sup>,研究 PM<sub>2.5</sub> 对大气能见度的影响<sup>[11]</sup>。在 PM<sub>2.5</sub> 常规监测方面,美国于 20 世纪末期在全球率先制订 PM<sub>2.5</sub> 标准,并开展常规监测。欧盟国家、日本等也于 2005 年前后开展 PM<sub>2.5</sub> 的常规监测。

收稿日期: 2015-09-06

基金项目: 林业公益性行业科研专项经费项目(201304301)

\* 责任作者,高级工程师, zhoulei@cncmc.cn

我国科研界对  $\text{PM}_{2.5}$  的研究始于“七五”酸雨国家科技攻关项目<sup>[12-14]</sup>,但监测方法为手工监测.小范围的自动连续监测在青海瓦里关全球本底站<sup>[15-16]</sup>、珠江三角洲大气成分区域网<sup>[17]</sup>、粤港澳大湾区城市空气质量监测网和中国气象局大气成分监测站网<sup>[16]</sup>等均有开展.总体而言,我国  $\text{PM}_{2.5}$  监测存在一些局限性,主要有:时间的连续性较差<sup>[4,8,11]</sup>,长时间尺度的监测较为少见;监测点位布设较少<sup>[12-14]</sup>,未能形成全国性监测站网;对大气本底监测开展较早<sup>[15-16]</sup>,对城市区域的监测在 2000 年以后开始受到重视<sup>[18-19]</sup>,但监测结果和研究成果零散,且难以共享,从而难以从宏观角度进行把握.

中国颗粒物常规监测对象经历了降尘→总悬浮颗粒物(TSP)→ $\text{PM}_{10}$ → $\text{PM}_{2.5}$  的过程<sup>[20]</sup>.2013 年,环境保护部在 74 个城市开始  $\text{PM}_{2.5}$  的常规在线监测,为从宏观上认识我国城市  $\text{PM}_{2.5}$  污染特征创造了条件.本文利用 2014 年环保部门的监测数据对全国 161 个地级及以上城市  $\text{PM}_{2.5}$  污染进行多角度分析和规律性总结,从而为  $\text{PM}_{2.5}$  污染防治提供依据.

## 1 数据来源与说明

为保证评价对象的统一、规范和数据的完整性、代表性,本文仅对 2014 年开展常规监测的 161 个地级及以上城市进行分析.

其中  $\text{PM}_{2.5}$  监测数据来源于中国环境监测总站“全国城市空气质量实时发布平台”,数据计算方法和空气质量评价方法均依据相关国家环境保护标准<sup>[21-22]</sup>.风速、降水量、相对湿度等气象数据来源于中国气象科学数据共享服务网,土地利用数据来源于美国国家航空航天局土地处理的分布式主动归档中心 (<https://ladsweb.nascom.nasa.gov/>).该数据提取自中分辨率成像光谱仪 2013 年的土地利用产品(MCD12Q1),土地利用类别采用 International Geosphere Biosphere Programme (IGBP)的分类标准,空间分辨率为 500m.

## 2 $\text{PM}_{2.5}$ 污染特征

### 2.1 总体污染状况

由于仪器故障等原因,2014 年开展  $\text{PM}_{2.5}$  常规监测的 161 个城市共监测 58295d,平均每个城市监测 362d,符合评价技术规范要求.

2014 年,中国城市环境空气中  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度在  $1\sim 733\mu\text{g}/\text{m}^3$ .其中,达标天数比例为 73.4%.在超标天数中,轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染的比例分别为 16.2%、5.4%、4.1%和 0.9%. $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度分布区间较宽,表明城市间及同一城市不同时间污染程度差异较大.主要分布区间为  $15\sim 75\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占样本总数的 68.2%.其中,出现频率最高的区间为  $30\sim 45\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,占样本总数的 20.2%;而日均质量浓度大于  $150\mu\text{g}/\text{m}^3$  的出现频率很低,仅占样本总数的 5.0%. $\text{PM}_{2.5}$  日平均质量浓度的分布频率通常接近对数正态分布<sup>[23]</sup>.从 2014 年监测数据看, $\text{PM}_{2.5}$  日平均质量浓度较好的符合对数正态分布(K-S 检验的 sig.值为  $0.98>0.05$ ),说明监测数据的可信度较高.根据汤洁等<sup>[15]</sup>研究,最大出现频率所对应的数值(即对数正态分布的平均值)为该地区最具代表性大气状态下污染物的浓度值.根据对数正态分布拟合方程,2014 年中国  $\text{PM}_{2.5}$  最大出现频率对应的数值为  $37.5\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,是观测期间中国最具代表性大气状态下的  $\text{PM}_{2.5}$  浓度.

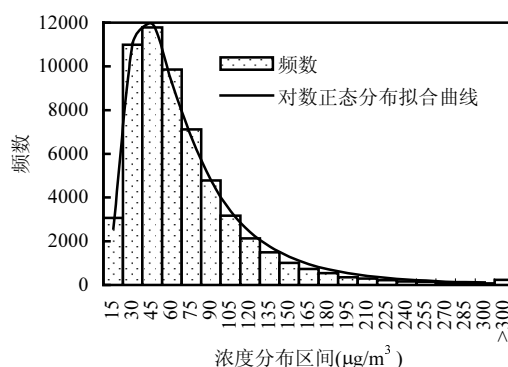


图1 2014 年 161 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度分布及对数正态分布拟合曲线

Fig.1 Frequency distribution histograms and log-normal fit of  $\text{PM}_{2.5}$  daily concentrations of 161 cities in 2014

分城市看,161 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  日均质量浓度达标率在 32.1%~99.7%,其中分布在 65%~86%的城

市相对集中(83 个), 占所有城市的 51.6%。仅 18 个城市日均质量浓度达标率大于 95%。

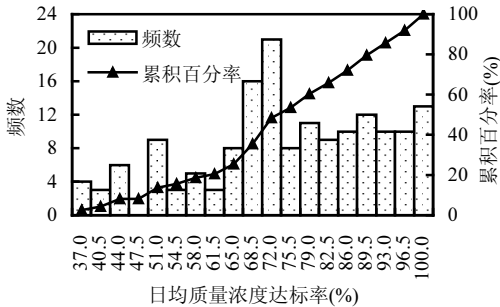


图2 2014 年 161 个城市 PM<sub>2.5</sub> 达标天数比例分布  
Fig.2 Frequency distribution histograms of PM<sub>2.5</sub> daily concentrations standard-reaching rate of 161 cities in 2014

161 个城市 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度在 19~130 μg/m<sup>3</sup>, 其中分布在 45~75 μg/m<sup>3</sup> 之间的城市相对集中, 占所有城市的 53.4%。仅 18 个城市 PM<sub>2.5</sub> 年均质量浓度小于 35 μg/m<sup>3</sup>。

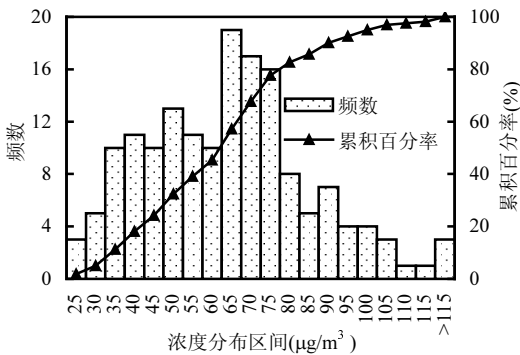


图3 2014 年 161 个城市 PM<sub>2.5</sub> 年均浓度分布  
Fig.3 Frequency distribution histograms of PM<sub>2.5</sub> annual concentrations of 161 cities in 2014

考虑到年均质量浓度和日均质量浓度达标率, 161 个城市中仅有 13 个城市 PM<sub>2.5</sub> 年评价结果达标, 达标城市比例仅为 8.1%。

与其他 5 项常规监测指标相比, PM<sub>2.5</sub> 26.6% 的污染天数比例远高于 PM<sub>10</sub>、O<sub>3</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO 的污染天数比例(分别为 19.0%、6.1%、

3.2%、1.7%和 0.7%)。在环境空气质量污染天数中, 以 PM<sub>2.5</sub> 为首要污染物的污染天数占全部污染天数的比例最高, 为 70.7%, 而以 O<sub>3</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub> 和 CO 为首要污染物的比例分别为 14.3%、13.7%、0.6%、0.6%和 0.1%。

总体来看, 中国城市 PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重, 是影响中国绝大多数城市环境空气质量的首要污染物。

## 2.2 时间变化规律

2.2.1 季节变化规律 与其他污染物类似<sup>[24-25]</sup>, 城市 PM<sub>2.5</sub> 污染也有明显的季节分布规律(图 4)。夏季及春末、秋初 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较轻, 其中 7、8、9 月份 PM<sub>2.5</sub> 的日均质量浓度超标率在 15% 以下, 评价等级为优的天数占全年优天数的 81.7%。冬季污染较重, 其中 1 月份污染最重, 月平均质量浓度为 109 μg/m<sup>3</sup>, 是月均浓度值最低的 8 月份的 2.7 倍。1 月份, 全国 60% 以上的天数 PM<sub>2.5</sub> 浓度超标, 其中重度及以上污染程度的比例为 22.0%。1 月份天数约占全年总天数的 8.5%, 但重度及以上污染天数占全年重度以上污染总天数的 37.3%, 严重污染天数占全年严重污染天数的 46.7%。

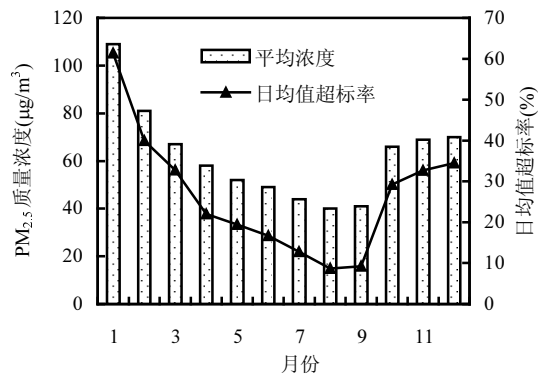


图4 2014 年 PM<sub>2.5</sub> 逐月质量浓度均值及超标天数比例  
Fig.4 Monthly concentrations and standard-exceeding rate of PM<sub>2.5</sub> in 2014

与已有研究类似<sup>[25-26]</sup>, 2014 年 PM<sub>2.5</sub> 的监测结果也是冬季污染较重, 夏季相对较轻。细节上的区别主要在于 1 月份污染状况的畸高和 10 月份污染状况的急剧恶化。1 月和 10 月的污染状况既受极度不利的气象条件所导致的重污染过程影

响,北方采暖地区也与冬季取暖等人为活动影响有关。

1 月份,1~7 日、14~20 日、23~25 日、29~31 日全国发生 4 次大范围的重污染过程,影响城市均在 90 个以上。1 月份重污染过程覆盖全国大部分地区,累计有 158 个城市(仅鄂尔多斯、拉萨、嘉峪关未受影响)出现 8452 天次污染,主要影响区域包括华北、东北、长江中下游地区、西北地区等,其中 1 月 31 日影响城市 131 个,是影响范围最广的一天。10 月份,中国再次发生 4 次间隔较短的持续性重污染过程,分别为:7~11 日、17~20 日、22~25 日、29~31 日。10 月份的重污染过程虽然影响范围(累计影响 128 个城市)和持续时间(共 15d)不及 1 月份,但  $\text{PM}_{2.5}$  浓度迅速积累,部分城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度在 24h 内即升高 200% 以上,且污染过后  $\text{PM}_{2.5}$  浓度并未像 1 月份那样迅速降低,而是保持在一个相对较高的水平。因此,10 月份  $\text{PM}_{2.5}$  的污染程度较前一月份迅速恶化。

**2.2.2 日变化规律** 161 个城市中,仅有 4 个城市(乌鲁木齐、克拉玛依、库尔勒、拉萨)位于东六区,与北京时间相差 2h,东七区与北京时间相差 1h,其作息规律与东八区几乎相同,气象条件的差异也不大。因此,本文没有考虑时差对日变化规律可能产生的影响。

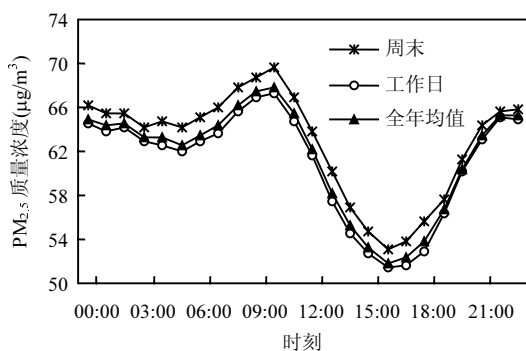


图 5  $\text{PM}_{2.5}$  浓度日变化趋势

Fig.5 Diurnal variations of  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations

由图 5 可见,城市  $\text{PM}_{2.5}$  日变化曲线呈现不太明显的双峰分布,峰值与谷值的绝对差值为  $17\mu\text{g}/\text{m}^3$  (为谷值的 33.3%)。在早晚上下班高峰的集中出行阶段,人为排放的颗粒物相对增多,且此

时大气混合层高度较低,近地面大气也易出现逆温层,污染物扩散条件相对不利,形成  $\text{PM}_{2.5}$  的第一个峰值;午后交通排放污染物有所减少,且大气层的对流运动逐渐增强,有利于污染物的扩散,使得 16:00 前后形成一天中  $\text{PM}_{2.5}$  的谷值;傍晚过后,交通污染叠加餐饮油烟污染使得城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度逐步升高,至午夜前后,工业电价进入低谷收费阶段,工业污染又助推  $\text{PM}_{2.5}$  污染,使得午夜至凌晨污染程度保持在一个相对较高的状态。

**2.2.3 工作日与周末规律** 污染的“周末效应”是指由于气象要素存在 7d 为周期的周循环特征、人类活动在工作日和周末存在较大的差异,导致污染物浓度在工作日和周末存在较为明显的差异<sup>[27]</sup>。一般认为,人类在工作日的活动强度、生产强度比周末高,可能排放更多的污染物进入大气,致使颗粒物浓度工作日高于周末<sup>[23]</sup>。但根据本文的研究结果,从全国宏观尺度看, $\text{PM}_{2.5}$  并没有表现出“周末效应”,反而周末的平均值比工作日高 3.1% (图 6)。这与已有部分研究有出入<sup>[27-28]</sup>,其原因可能是已有研究多集中在大城市和特大城市,而本研究的 161 个城市中所包含的中等城市较多,而中小城市人们工作半径较小,工业等生产活动周末运行率较高。

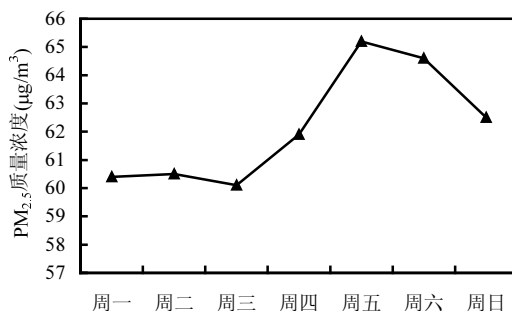


图 6  $\text{PM}_{2.5}$  浓度周变化趋势

Fig.6 Weekly variations of  $\text{PM}_{2.5}$  concentrations

从  $\text{PM}_{2.5}$  浓度的日变化趋势看(图 5),周末与工作日全天变化趋势基本一致,且均在相同的时刻达到峰值和谷值。

因此,就全国而言, $\text{PM}_{2.5}$  污染并未出现明显的周末效应,说明周末人们生活、作息的改变对  $\text{PM}_{2.5}$  污染的影响有限。

## 2.3 空间分布规律

**2.3.1  $\text{PM}_{2.5}$  污染空间格局** 以 161 个地级及以上城市  $\text{PM}_{2.5}$  年均质量浓度数据在 ArcGIS 中进行空间插值,得到 2014 年中国  $\text{PM}_{2.5}$  污染的空间格局分布图(图 7)。

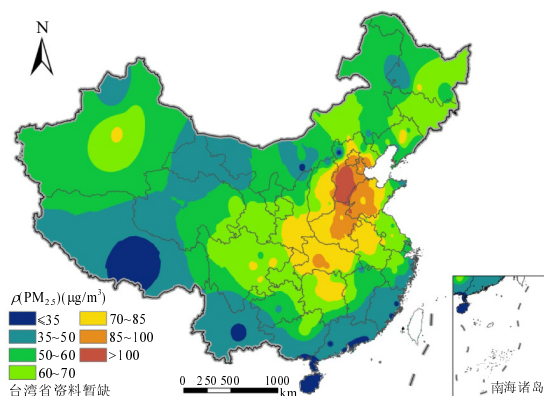


图 7 2014 年中国  $\text{PM}_{2.5}$  污染空间分布

Fig.7 Spatial distribution of  $\text{PM}_{2.5}$  pollution level in China in 2014

由图 7 可以看出,中国城市  $\text{PM}_{2.5}$  的重污染区域和污染相对较轻的区域基本呈集中连片分布态势.京津冀及其周边的山东、河南、山西是污染最重的地区,中部地区的湖北、湖南、安徽污染较为严重,西南地区的重庆、四川,西北地区的陕西、新疆和东北地区的辽宁、黑龙江等部分区域污染也相对较重.污染相对较轻的区域则集中分布在东南沿海和西南地区的云南、西藏.除鄂尔多斯外,18 个年均质量浓度达到二级标准限值的城市均分布在这一区域。

**2.3.2 南、北方地区差异** 从图 7 可以看出,  $\text{PM}_{2.5}$  重污染区域主要分布在北方地区,南方地区污染较北方地区轻.将中国大陆地区 31 个省级行政单元划分为北方地区(指华北、东北、西北诸省及山东、河南)和南方地区(其他地区,不包含港澳台地区),统计显示,北方地区  $\text{PM}_{2.5}$  平均质量浓度和日均质量浓度超标率分别为  $71\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 34.0%,较南方地区分别高出  $17\mu\text{g}/\text{m}^3$  和 14.2 个百分点.从日均质量浓度分布的离散程度看,北方地区日均质量浓度分布也较为离散,变异系数为 0.77,远大于南方地区 0.60 的变异系数。

南、北方地区的污染差异主要表现在深秋到初春这一时期(图 8).从  $\text{PM}_{2.5}$  超标天数比例看,2~4 月、11~12 月南北方地区超标天数比例的差值均在 15%以上,平均为 23.2%;而 5~9 月南北方地区超标天数比例的差值平均仅为 9.4%.1 月份南北方地区差异最小,主要是由于 2014 年 1 月份的重污染天气对南方地区的影响较为显著.从 2015 年最新数据看,1 月份南北方的差异也较为明显,与 2、3 月份基本相当。

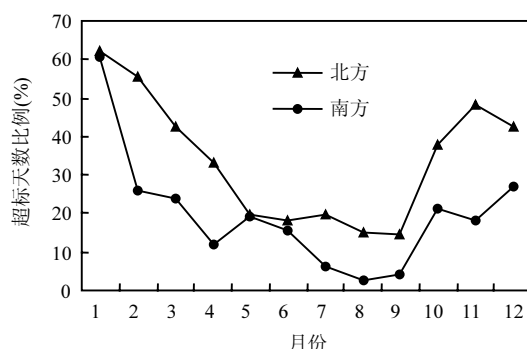


图 8 2014 年南北方地区  $\text{PM}_{2.5}$  超标天数比例月际比较  
Fig.8 Monthly standard-exceeding rate of  $\text{PM}_{2.5}$  in North China and South China in 2014

**2.3.3 影响因素的空间分布** 气象条件、地形地貌等对  $\text{PM}_{2.5}$  污染具有重要影响,尤其是对短时间污染过程的影响更为明显<sup>[8,10,29-31]</sup>.在此分析降水量、风速、相对湿度、土地利用等与  $\text{PM}_{2.5}$  污染的相关性。

基本思路为:将  $\text{PM}_{2.5}$  浓度划分为不同的级别,用以确定不同程度的污染区域,借助 GIS 空间分析中的区域分析功能,计算不同级别  $\text{PM}_{2.5}$  浓度区域内对应的气象要素的均值和标准差,分析  $\text{PM}_{2.5}$  与气象影响因素的相关关系.采用空间叠加交叉分类统计方法,计算不同级别  $\text{PM}_{2.5}$  浓度区域内各类别地表类型所占的比例,分析  $\text{PM}_{2.5}$  空间分布与土地利用类型的相关关系(表 1)。

由表 1 结合图 7 可以看出:

(1)  $\text{PM}_{2.5}$  的空间分布与土地利用具有明显的线性关系, $\text{PM}_{2.5}$  污染越重,受人类活动影响较大的耕地、城市和建设用地的比例越大,而林地、灌木丛、草原等植被常年覆盖的土地利用类型比

例越小.研究结果在一定程度上也反映出植被对 颗粒物的吸附作用<sup>[29-30]</sup>.

表 1 PM<sub>2.5</sub> 不同浓度区间所对应的影响因素分布  
Table 1 Spatial distribution of influencing factors for PM<sub>2.5</sub>

质量浓度(μg/m <sup>3</sup> )	平均降水量(mm)	平均风速(m/s)	平均相对湿度(%)	主要土地利用类型占比(%)	
				植被覆盖地 <sup>a</sup>	耕地和城市建设用地 <sup>b</sup>
≤35	724±528	2.6±0.5	52.1±15.5	84.3	4.4
35~60	520±532	2.3±0.7	53.0±14.5	56.8	8.4
60~85	785±474	2.0±0.5	65.2±11.5	55.1	29.9
85~100	607±186	2.2±0.4	64.3±5.8	15.3	81.8
>100	432±68	1.9±0.2	60.2±2.6	6.8	92.1

注:a:植被覆盖地包括林地(forest)、灌木丛(shrublands)、多树草原(woody savannas)和稀树草原(savannas);b:耕地和城市建设用地包括耕地(croplands)、城市和建设用地(urban and build-up).

(2) PM<sub>2.5</sub> 的空间分布与风速也基本呈线性关系.风速越大,越有利于污染物的扩散,则颗粒物污染越轻,PM<sub>2.5</sub> 质量浓度小于等于 35μg/m<sup>3</sup> 的区域年均风速比大于 100μg/m<sup>3</sup> 的区域大 0.7m/s.

(3) 相对湿度与 PM<sub>2.5</sub> 空间分布的关系呈倒 U 型,即在一定的浓度区间内,相对湿度越高 PM<sub>2.5</sub> 污染越重,但当浓度超过 85μg/m<sup>3</sup> 时,随着 PM<sub>2.5</sub> 污染的加重相对湿度却在减小.

(4) 降水量与 PM<sub>2.5</sub> 空间分布总体上没有表现出简单的对应关系,但分段来看,在 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度小于 60μg/m<sup>3</sup> 和大于 60μg/m<sup>3</sup> 的区域,PM<sub>2.5</sub> 污染的加重均伴随着降水量的减少.若将全国分为 PM<sub>2.5</sub> 质量浓度大于 60μg/m<sup>3</sup> 的区域和小于 60μg/m<sup>3</sup> 的区域,两者的平均降水量分别为 738mm 和 504mm,说明降水对细颗粒物有一定的冲刷作用,但可能不如对粗颗粒的冲刷作用明显<sup>[31]</sup>.

3 PM<sub>2.5</sub> 污染与 PM<sub>10</sub> 污染的对比较

PM<sub>2.5</sub> 是 PM<sub>10</sub> 的组成部分,但两者的属性和来源又有所差别.因此,PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 污染的时空特征既有相似的一面也存在差异性的一面(图 7、图 9).对比发现:

(1) PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 具有很强的同步性.两种污染物日均浓度具有较好的线性关系,相关系数为 0.86(在 0.01 水平双侧显著),线性拟合方程拟合优度为 0.738.同时,当其中一种污染物达到污染等级时另一种污染物往往也会发生污染:当

PM<sub>2.5</sub> 污染时,61.7%的天数内 PM<sub>10</sub> 也污染;当 PM<sub>10</sub> 污染时,86.5%的天数内 PM<sub>2.5</sub> 也污染.同一地区内不同粒径颗粒物的同步变化是颗粒物污染区域性本质的重要依据<sup>[32]</sup>,因此,整体而言,中国颗粒物污染存在区域性污染特征,发挥区域联动效应是提升城市乃至整个区域环境空气质量的重要途径.

(2) PM<sub>2.5</sub> 污染较 PM<sub>10</sub> 更重.前文已经述及,PM<sub>2.5</sub> 的污染天数比例为 26.6%,远高于 PM<sub>10</sub>19.0%的污染天数比例,并且 161 个城市中 PM<sub>2.5</sub> 的超标城市(148 个)也多于 PM<sub>10</sub> 的超标城市数(129 个).此外,在 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 同时污染的 9448 天次中,有 83.8%的天次 PM<sub>2.5</sub> 的超标倍数(超标倍数=日均质量浓度/二级标准限值-1)高于 PM<sub>10</sub> 的超标倍数,即超标程度更为严重.

(3) PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 污染空间格局基本一致,但西北地区 PM<sub>10</sub> 的污染相对严重.PM<sub>10</sub> 重污染区域仍主要分布在京津冀及其周边地区、西北地区、湖北等省,污染相对较轻的区域集中分布在长江以南和东北地区.与 PM<sub>2.5</sub> 污染分布空间的不同主要有:①西北部分地区 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较轻但 PM<sub>10</sub> 污染较为严重;②湖南、安徽、重庆、四川 PM<sub>2.5</sub> 污染相对较重,部分地区为 PM<sub>2.5</sub> 重污染区域,但 PM<sub>10</sub> 污染相对较轻.

(4) PM<sub>10</sub> 的周末效应较 PM<sub>2.5</sub> 略为明显.PM<sub>10</sub> 浓度的周变化趋势与 PM<sub>2.5</sub> 相似,也是在周五达到最高值,周一到周三较小且较为稳定,但与 PM<sub>2.5</sub> 周末污染重于工作日不同的是,PM<sub>10</sub> 的污

染表现出了一定的周末效应,周末  $\text{PM}_{10}$  的浓度比工作日浓度低 0.3%,说明颗粒物粒径越大受人类生活方式改变影响的可能性越大.

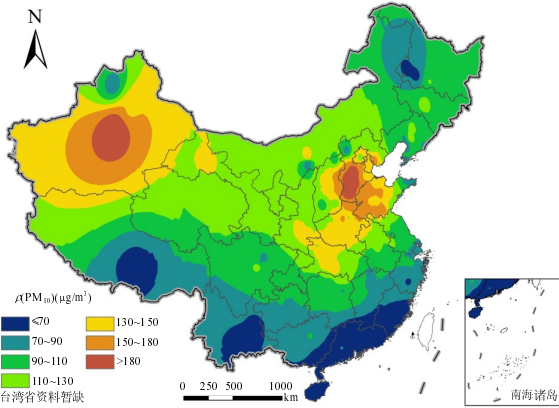


图 9 2014 年中国  $\text{PM}_{10}$  污染空间分布

Fig.9 Spatial distribution of  $\text{PM}_{10}$  pollution level in China in 2014

(5)  $\text{PM}_{10}$  污染的南北差异比  $\text{PM}_{2.5}$  的差异更为显著.2014 年,北方地区  $\text{PM}_{10}$  和  $\text{PM}_{2.5}$  的超标天数比例分别为 29.6%和 34.0%,两者差距不大;而南方地区超标比例分别为 9.3%和 19.8%,两者差异较为明显,由此造成南北方地区  $\text{PM}_{10}$  污染的

地区差异比  $\text{PM}_{2.5}$  的地区差异更为显著.从数据来看,北方地区  $\text{PM}_{10}$  的平均质量浓度和平均超标天数比例分别为南方地区的 1.6 倍和 3.2 倍,而  $\text{PM}_{2.5}$  的相应倍数为 1.3 倍和 1.7 倍.

#### 4 $\text{PM}_{2.5}$ 与 $\text{PM}_{10}$ 质量浓度比值分析

有关颗粒物源解析和颗粒物中元素特征的研究表明<sup>[4,33]</sup>,二次颗粒物对  $\text{PM}_{2.5}$  的贡献较大,而扬尘、燃煤尘等对  $\text{PM}_{10}$  的贡献较大.因此, $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度的比值<sup>[34-35]</sup>一定程度上可以反映区域受二次污染的影响程度.此外, $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度的比值越小,区域污染类型为传统煤烟型污染的可能性越大;比值越大,区域污染类型越有可能为复合型污染.

2014 年,161 个城市空气中  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度的平均值分别为  $62.2\mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $105.1\mu\text{g}/\text{m}^3$ ,两者的比值为 0.591.161 个城市中 64 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  和  $\text{PM}_{10}$  质量浓度比值小于全国均值,97 个城市高于全国均值,比值范围在 0.271~0.881,其中分布在 0.55~0.70 之间的城市最为集中,占全部城市数的 62.1%.

##### 4.1 时间变化规律

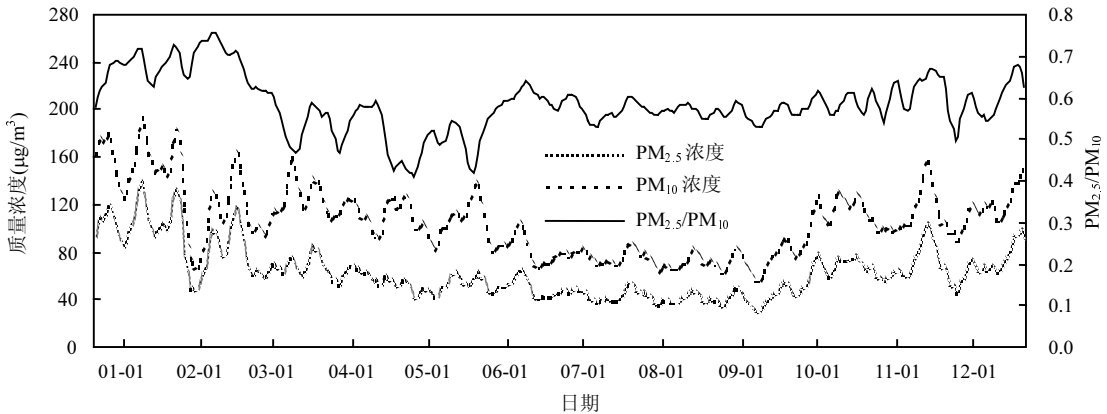


图 10 2014 年  $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{PM}_{10}$  质量浓度及其比值逐日变化

Fig.10 Daily concentrations and ratios of  $\text{PM}_{2.5}$  and  $\text{PM}_{10}$

从年内变化趋势看(图 10), $\text{PM}_{2.5}$  与  $\text{PM}_{10}$  质量浓度比值除 1、2 月份较高、5 月份较低外,其余月份相差较小,基本稳定在 0.55~0.6,反映出各月份二次污染物的生成差异不大.1、2 月份比值

偏高,多在 0.6 以上甚至达到 0.7 以上,其原因与不利的天气条件有关,静风、逆温等条件下更利于细颗粒物的生成.此外,冬季南方地区的潮湿、寒冷天气对于  $\text{PM}_{2.5}$  监测数据也有一定影响,易造



成数据偏高,甚至形成  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  在数据上的“倒挂”现象<sup>[36]</sup>。5 月份前后是中国沙尘天气多发季节,2014 年发生的 7 次大范围沙尘天气过程均发生在 3~5 月,对拉低这一时期  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的比值具有一定的作用。此外,5 月份前后北方地区多处于春旱阶段,相对湿度较小,地表覆盖较低,地面裸露,地表扬尘较多,而扬尘对粗颗粒的贡献更大。这也是 5 月份比值相对较低的一个原因。

从日变化趋势看(图 11), $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度的比值近似呈正弦曲线分布。根据各地源解析结果,工业生产对  $PM_{2.5}$  的贡献多在 20%~30%,因此凌晨前后开工的工业生产可能是此段时间比值上升的原因。扬尘对  $PM_{10}$  的贡献比  $PM_{2.5}$  大,因此昼间的建筑扬尘和汽车扬尘对拉低  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的比值有一定作用。

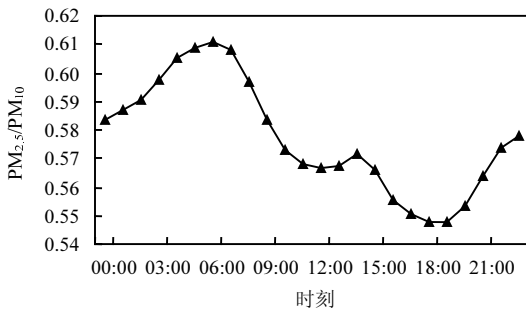


图 11  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度比值的日变化趋势

Fig.11 Diurnal variations of  $PM_{2.5}/PM_{10}$

## 4.2 空间分布规律

$PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度的比值在空间上呈现出由西北向东南逐渐升高、南方地区高于北方地区的空间格局,比值较高的区域集中分布在长江以南-青藏高原以东地区(云贵高原除外)(图 12)。

西北地区在七大区域中比值最低,其次为华北,两区域的比值均小于全国均值,分别为 0.467 和 0.539。东北、西南、华东地区比值略高于全国均值,分别为 0.610、0.617、0.619,但华东、西南部分地区比值较高。华南地区是六大区域中比值最高的区域,平均为 0.650,其中湖南、广东、广西比值最高且分布较为集中, $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  比值最高的 20 个城市中有 11 个分布在这 3 个省区。西

北地区比值偏低主要是由于该地区是受沙尘天气影响最为显著的区域,粗颗粒污染相对较重,拉低了  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  的比值。此外,西北地区是我国经济发展相对落后的地区,传统工业占比较大,煤烟型污染较为典型,也是造成比值较低的重要原因。华南地区比值偏高一方面与本地区相对较重的二次污染相关,另一方面潮湿的气候条件对于  $PM_{2.5}$  也有一定影响。

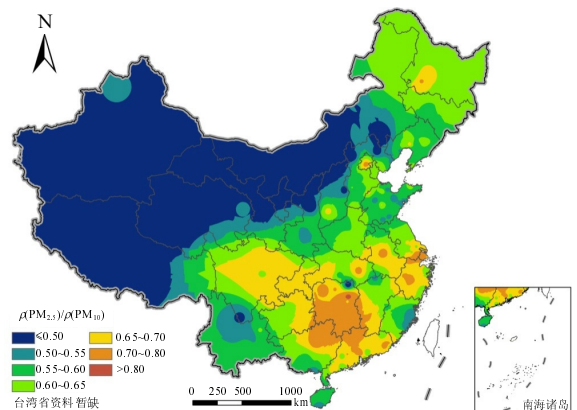


图 12 2014 年  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度比值的区域分布  
Fig.12 Spatial distribution of the ratio of  $PM_{2.5}$  and  $PM_{10}$  in 2014

从南北方区域差异看,南方地区  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度的比值为 0.648,远高于北方地区的 0.554, $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  比值最高的 40 个城市中有 36 个分布在南方。

## 4.3 不同污染程度的变化规律

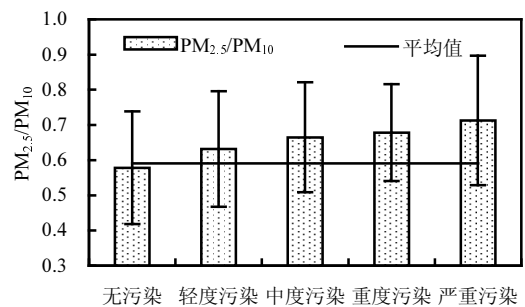


图 13 不同污染等级下  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  质量浓度比值  
Fig.13  $PM_{2.5}/PM_{10}$  in different pollution level

只考虑  $PM_{2.5}$  和  $PM_{10}$ ,根据空气质量指数



(AQI)计算方法,将颗粒物的污染等级划分为无污染、轻度污染、中度污染、重度污染和严重污染,分别计算不同污染等级下 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 质量浓度的比值(图 13)。

随着颗粒物污染程度的加重,PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 的比值逐渐升高,严重污染时的比值比无污染时高 23.2%,说明重污染天气下二次污染更为严重。

## 5 结论

5.1 中国城市 PM<sub>2.5</sub> 污染较为严重且呈现出冬季污染较重,夏季相对较轻的季节分异规律。2014 年,开展常规监测的 161 个城市 PM<sub>2.5</sub> 达标天数比例为 73.4%,其中 7、8、9 月份 PM<sub>2.5</sub> 的日均质量浓度超标率在 15%以下,1、2、3、11、12 月超标率均在 30%以上。

5.2 PM<sub>2.5</sub> 监测数据的可信度较高。一般认为 PM<sub>2.5</sub> 日平均质量浓度的分布频率常接近对数正态分布。从 2014 年监测数据看,日平均质量浓度的分布较好的符合对数正态分布。

5.3 PM<sub>2.5</sub> 重污染区域和污染相对较轻的区域基本呈集中连片分布态势。京津冀及其周边地区,中部地区的湖北、湖南、安徽污染较为严重,污染相对较轻的区域则集中分布在东南沿海和西南地区的云南、西藏。

5.4 PM<sub>2.5</sub> 污染的空间分布与风速、相对湿度、土地利用等因素的空间分布具有较强的相关性。一般的,污染越重的区域,年均风速越小,相对湿度越高,耕地和城市建设用地比例越高,但降水与 PM<sub>2.5</sub> 的线性关系并不明显。

5.5 PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 质量浓度的比值在空间上呈现出由西北向东南逐渐升高、南方地区高于北方地区的空间格局,在时间上除 1、2 月份较高外,其余月份基本稳定。

5.6 重污染天气下二次污染更为严重。随着颗粒物污染程度的加重,PM<sub>2.5</sub> 与 PM<sub>10</sub> 的比值逐渐升高,严重污染时的比值比无污染时高 23.2%。

## 参考文献:

[1] 朱 彤,尚 静,赵德峰.大气复合污染及灰霾形成中非均相化学过程的作用 [J]. 中国科学:化学,2010,40(12):1731-1740.

[2] Streets D G, Fu J S, Jang C J, et al. Air quality during the 2008 Beijing Olympic Games [J]. *Atmospheric Environment*, 2007,41: 480-492.

[3] Shaltout A A, Boman J, Shehadeh Z F, et al. Spectroscopic investigation of PM<sub>2.5</sub> collected at industrial, residential and traffic sites in Taif, Saudi Arabia [J]. *Journal of Aerosol Science*, 2015,79:97-108.

[4] 刘 浩,张家泉,张 勇,等.黄石市夏季昼间大气 PM<sub>10</sub> 与 PM<sub>2.5</sub> 中有机碳、元素碳污染特征 [J]. *环境科学学报*, 2014,34(1):36-42.

[5] 郑 玫,张延君,闰才青,等.上海 PM<sub>2.5</sub> 工业源谱的建立 [J]. *中国环境科学*, 2013,33(8):1354-1359.

[6] Pui D Y H, Chen S C, Zuo Z L. PM<sub>2.5</sub> in China: Measurements, sources, visibility and health effects, and mitigation [J]. *Particuology*, 2014,13:1-26.

[7] Wang J, Li X, Jiang N, et al. Long term observations of PM<sub>2.5</sub>-associated PAHs: Comparisons between normal and episode days [J]. *Atmospheric Environment*, 2015,104:228-236.

[8] 蒋永成,赵天良,王 宏,等.福州市 PM<sub>2.5</sub> 污染过程中大气边界层和区域传输研究 [J]. *中国环境科学*, 2015,35(2):347-355.

[9] Chithra V S, Nagendra S. Impact of outdoor meteorology on indoor PM<sub>10</sub>, PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>1</sub> concentrations in a naturally ventilated classroom [J]. *Urban Climate*, 2014,10:77-91.

[10] Aguilera I, Eeftens M, Meier R, et al. Land use regression models for crustal and traffic-related PM<sub>2.5</sub> constituents in four areas of the SAPALDIA study [J]. *Environmental Research*, 2015,140: 377-384.

[11] Xiao S, Wang Q Y, Cao J J, et al. Long-term trends in visibility and impacts of aerosol composition on visibility impairment in Baoji, China [J]. *Atmospheric Research*, 2014,149:88-95.

[12] 王文兴.中国酸雨成因研究 [J]. *中国环境科学*, 1994,14(5): 323-328.

[13] 吴 兑,陈位超,常业谛,等.华南地区大气气溶胶质量谱与水溶性成分谱分布的初步研究 [J]. *热带气象学报*, 1994,10(1): 85-96.

[14] 吴 兑.南海北部大气气溶胶水溶性成分谱分布特征 [J]. *大气科学*, 1995,19(5):615-622.

[15] 汤 洁,温玉璞,周凌晔,等.中国西部大气清洁地区黑碳气溶胶的观测研究 [J]. *应用气象学报*, 1999,0(2):160-170.

[16] 傅敏宁,郑有飞,徐星生,等.PM<sub>2.5</sub> 监测及评价研究进展 [J]. *气象与减灾研究*, 2011,34(4):1-6.

[17] 吴 兑,毛节泰,邓雪娇,等.珠江三角洲黑碳气溶胶及其辐射特性的观测研究 [J]. *中国科学(D 辑:地球科学)*, 2009,39(11): 1542-1553.

[18] He K B, Yang F M, Ma Y L, et al. Characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China [J]. *Atmospheric Environment*, 2001,35:4959-4970.

- [19] 魏复盛,滕恩江,吴国平,等.我国 4 个大城市空气  $PM_{2.5}$ ,  $PM_{10}$  污染极其化学组成 [J]. 中国环境监测, 2001,17(7):1-6.
- [20] 李名升,张建辉,张殷俊,等.近 10 年中国大气  $PM_{10}$  污染时空格局演变 [J]. 地理学报, 2013,68(11):1504-1512.
- [21] HJ 633-2012 环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行) [S].
- [22] HJ 663-2013 环境空气质量评价技术规范(试行) [S].
- [23] WHO(World Health Organization). WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005 [R]. Geneva: World Health Organization, 2006.
- [24] 廖志恒,范绍佳.2006-2012 年珠江三角洲地区  $O_3$  污染对人群健康的影响 [J]. 中国环境科学, 2015,35(3):897-905.
- [25] 周勤迁,潘月鹏,王 剑,等.黑龙江海伦农业区冬春  $PM_{2.5}$  和气态污染物污染特征 [J]. 中国环境科学, 2014,34(4):844-851.
- [26] 张 杰,李 昂,谢品华,等.基于卫星数据研究兰州市  $NO_2$  时空分布特征以及冬季  $NO_x$  放通量 [J]. 中国环境科学, 2015,35(8): 2291-2297.
- [27] Jones A M, Yin J, Harrison R M. The weekday-weekend difference and the estimation of the non-vehicle contributions to the urban increment of airborne particulate matter [J]. Atmospheric Environment, 2008,42(19):4467-4479.
- [28] 雷 瑜,张小玲,唐宜西,等.北京城区  $PM_{2.5}$  及主要污染气体“周末效应”和“假日效应”研究 [J]. 环境科学学报, 2015,35(5): 1520-1528.
- [29] Catinon M, Ayrault S, Boudouma O, et al. Atmospheric element deposit on tree barks: The opposite effects of rain and transpiration [J]. Ecological Indicators, 2012,14(1):170-177.
- [30] Guéguen F, Stille P, Lahd G M, et al. Atmospheric pollution in an urban environment by tree bark biomonitoring - part II: Sr, Nd and Pb isotopic tracing [J]. Chemosphere, 2012,86(6):641-647.
- [31] 韩 燕,徐 虹,毕晓辉,等.降水对颗粒物的冲刷作用及其对雨水化学的影响 [J]. 中国环境科学, 2013,33(2):193-200.
- [32] 贺克斌,贾英韬,马永亮,等.北京大气颗粒物污染的区域性本质 [J]. 环境科学学报, 2009,29(3):482-487.
- [33] Huang R J, Zhang Y L, Bozzetti C, et al. High secondary aerosol contribution to particulate pollution during haze events in China [J]. Nature, 2014,514(7521):218-222.
- [34] 吴 兑,吴 晟,李 菲,等.粗粒子气溶胶远距离输送造成华南严重空气污染的分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(4):540-545.
- [35] 吴 兑,吴 晟,李海燕,等.穗港晴沙两重天——2010 年 3 月 17-23 日珠三角典型灰霾过程分析 [J]. 环境科学学报, 2011,31(4):695-703.
- [36] 潘本锋,郑皓皓,李莉娜,等.空气自动监测中  $PM_{2.5}$  与  $PM_{10}$  “倒挂”现象特征及原因 [J]. 中国环境监测, 2014,30(5):90-95.

**作者简介:** 李名升(1981-),男,山东安丘人,高级工程师,博士,主要从事环境质量综合分析与评价研究。

## 《中国环境科学》喜获

### 中国科协精品科技期刊 TOP50 项目资助

《中国环境科学》2015 年 6 月获得中国科协精品科技期刊 TOP50 项目资助.中国科协精品科技期刊 TOP50 项目按照“以奖促建”的原则,通过以奖代补方式,遴选支持一批高端精品科技期刊,形成学科导航期刊集群.推动其加快成长为促进科技知识生产传播的重要渠道、促进学术交流的重要平台和促进学术生态建设的苗圃花坛,为我国科技期刊的发展发挥示范引领作用.经过专家评审和公示,最终确定入选的期刊均为学术影响力强、引证指标好、在学术交流与学科建设中起到重要作用、服务科技工作者成效显著、学术出版道德规范的优秀中文科技期刊.