

# 2014年中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化规律

王振波<sup>1,2</sup>, 方创琳<sup>1,2</sup>, 许 光<sup>1</sup>, 潘月鹏<sup>3</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院区域可持续发展与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

**摘要:** 大气霾污染因其对人体健康、生态环境和气候变化的影响而成为全球关注的严重环境问题, PM<sub>2.5</sub>是中国霾污染频繁的主要原因。过去对国家尺度上PM<sub>2.5</sub>时空分布的认识主要基于卫星观测, 因其反演方法的局限性, 卫星资料难以真实反映近地面PM<sub>2.5</sub>浓度的时空变化规律。本文基于中国2014年190个城市中的945个监测站的PM<sub>2.5</sub>浓度观测数据, 采用空间数据统计模型, 揭示了中国PM<sub>2.5</sub>的时空格局。结果显示, 2014年中国城市PM<sub>2.5</sub>平均浓度61 μg/m<sup>3</sup>, 具有显著的冬秋高、春夏低的“U”型逐月变化规律和周期性U-脉冲型逐日变化规律; 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度呈现显著的空间分异与集聚规律, 以及两次南北进退的空间循环周期; 胡焕庸线和长江是中国PM<sub>2.5</sub>浓度高值区和低值区的东西和南北分界线, 胡焕庸线以东和长江以北的环渤海城市群、中原城市群、长三角城市群、长江中游城市群和哈长城市群等地区是2014年PM<sub>2.5</sub>的高污染城市聚集地, 京津冀城市群是全年污染核心区; 以珠三角为核心的东南沿海地区是稳定的空气质量优良区。

**关键词:** PM<sub>2.5</sub>; 时空特征; 监测数据; 中国

DOI: 10.11821/dlxb201511003

## 1 引言

2013年初, 中国遭遇有观测记录以来最严重的雾霾天气, 罕见的连续高强度大气污染席卷了整个中东部<sup>[1]</sup>, 污染最严重的京津冀地区日均细颗粒物PM<sub>2.5</sub> (Particulate matter with aerodynamic diameter ≤ 2.5 μm) 浓度高达500 μg/m<sup>3</sup><sup>[2]</sup>, 引发社会的广泛关注。PM<sub>2.5</sub>浓度的增加不仅降低大气能见度<sup>[3]</sup>、影响人体健康<sup>[4]</sup>, 还通过改变辐射平衡影响气候变化<sup>[5]</sup>。同时, PM<sub>2.5</sub>浓度受到排放源强度、地形条件和气象因素的影响, 具有显著的时空变异性<sup>[6]</sup>。因此, 了解国家尺度上PM<sub>2.5</sub>浓度的变化规律不仅有利于认知大气污染的现状, 评估其对人体健康和生态环境的影响, 还可以为开展针对性的控制措施提供科学参考。

中国PM<sub>2.5</sub>的研究主要集中在观测条件较好的珠三角<sup>[7]</sup>、长三角<sup>[8]</sup>和京津冀地区<sup>[9]</sup>, 国家尺度的研究主要基于卫星观测, 如光学厚度 (aerosol optical thickness, AOT)<sup>[10]</sup>。基于AOT数据可以借助线性回归模型揭示PM<sub>2.5</sub>浓度的空间异质特征<sup>[11]</sup>, 但却难以揭示某个区域在不同时间尺度 (季节、月、日) 变化规律, 也难以反映近地面PM<sub>2.5</sub>浓度的空间分

收稿日期: 2015-04-16; 修订日期: 2015-05-16

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(41371177); 国家自然科学基金重点项目(71433008); 国家自然科学基金青年项目(41201168) [Foundation: Program of National Natural Science Foundation of China, No.41371177; Key Program of National Natural Science Foundation of China, No.71433008; Program of National Natural Youth Foundation of China, No.41201168]

**作者简介:** 王振波(1980-), 男, 山东禹城人, 博士, 助理研究员, 中国地理学会会员(S110007159A), 主要研究方向为城市化与生态环境效应。E-mail: wangzb@igsrr.ac.cn

**通讯作者:** 方创琳(1966-), 男, 甘肃庆阳人, 博士, 研究员, 博士生导师, 主要从事城市与规划等方面的研究。E-mail: fangcl@igsrr.ac.cn

布格局<sup>[12]</sup>。因此, 近地面PM<sub>2.5</sub>的观测数据更具科学性和准确性。

为了应对霾污染频繁发生的现状, 国家环境保护部出台了新的《环境空气质量标准》(GB3095-2012)<sup>[13]</sup>, 并根据不同地区的空气污染特征、经济发展水平和环境管理要求逐步推进实施, 于2016年在全国实施新标准。重点地区已经在2013年1月1日起按新标准监测和评价空气质量, 同时向公众提供空气质量信息服务。2013年全国共在74座城市共建612个PM<sub>2.5</sub>浓度监测点, 2014年1月1日起, 中国已有190个城市向社会实时发布共建945个监测点, 遍布中国东南沿海和中部、东北地区。国家空气质量监测条件与范围不断增大, 为研究PM<sub>2.5</sub>浓度的时空特征奠定了基础。本文全面收集了2014年全国945个自动空气质量监测子站的PM<sub>2.5</sub>观测资料, 通过多种手段对数据时空分布进行定量分析, 以期获得更具代表性的中国PM<sub>2.5</sub>时空分布规律, 为大气污染治理提供科学依据。

## 2 研究区域、数据和方法

### 2.1 研究区域和数据来源

本文的研究区域为中国大陆, PM<sub>2.5</sub>浓度数据来源于中国环境监测总站的城市空气质量实时发布平台监测数据, 样本为2014年中国190个城市的945个监测点PM<sub>2.5</sub>浓度监测值(图1)。监测点采用Thermo Fisher 1405F观测PM<sub>2.5</sub>, 原理是以恒定的流速将环境空气中的PM<sub>2.5</sub>进行切割, 用滤膜动态测量系统(FDMS)配合微量震荡天平法(TEOM)测量PM<sub>2.5</sub>的质量浓度<sup>[14]</sup>。

根据GB3095-2012针对大气污染物浓度数据有效性的要求, 对PM<sub>2.5</sub>数据进行了质量控制。① 剔除原始数据中小时PM<sub>2.5</sub>浓度 $\leq 0$ 的值和缺失的值; ② 在计算日均值时, 若监测点当天缺测数据超过4小时, 则当天数据无效, 进行剔除; ③ 计算月均值时, 若监测点每月缺测天数少于27日, 则当月数据无效, 进行剔除; ④ 计算年均值时, 若监测点全年缺测数据少于324日, 则监测点全年数据无效, 进行剔除; 最后, 对于小时PM<sub>2.5</sub>浓度 $> 900 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的少数异常也进行了剔除。

因每个城市的监测站点数量不一, 本文取城市内部所有站点PM<sub>2.5</sub>监测浓度24 h平均值代表该城市的PM<sub>2.5</sub>的污染程度, 最终得到2014年全国190个监测城市PM<sub>2.5</sub>浓度监测有效天数为354天(其中3月29、30、31日, 5月25、26日, 7月14日, 9月27、28、29日, 12月27、28日数据缺失或无效, 剔除之)。按照GB3095-2012的术语定义, 本文中“日平均值”指一个自然日24小时平均浓度的算术平均值, “月平均值”指一个日历月内各日平均浓度的算术平均值, “季平均值”指一个日历季内各日平均浓度的算数平均值, “年平均值”指一个历年内各日平均浓度的算数平均值<sup>[15]</sup>; 春季为3-5月(有效天数为

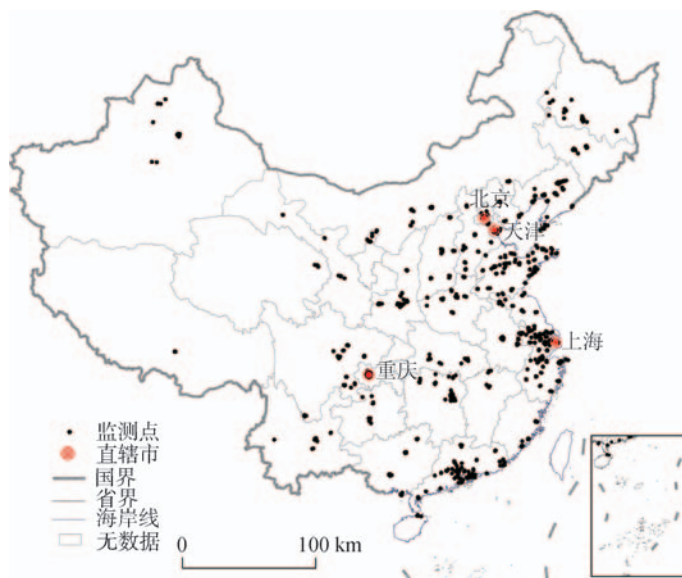


图1 2014年中国空气质量监测站的空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of air quality monitoring sites in China in 2014

87天), 夏季为6-8月(91天), 秋季为9-11月(88天), 冬季为1、2和12月(88天)。

## 2.2 空间插值方法

PM<sub>2.5</sub>浓度作为一种描述大气状态的标量, 在受当地人类活动影响的同时, 还受到大气活动混合扩散的影响, 类似气温等状态量, 存在着显著的空间关联性, 即相近地区的PM<sub>2.5</sub>浓度值在统计上会更加接近。受经济和人力等条件限制, 中国环境监测点分布尚不均匀, 其中近70%的监测点集中在环渤海、长三角和珠三角三大经济发达区域。通过插值即可了解区域内的完整空间分布。有研究指出, 区域层面插值的精度比遥感反演要更加准确<sup>[15]</sup>。区域尺度要素常用的插值方法有反距离插值(Inverse Distance Weighted, IDW)、克里金插值(Ordinary Kriging Method, OKM), 前者估测像元的精度受其到已知点距离的影响较大, 对插值点的分散性和均匀性要求较高, 非均衡插值点的插值结果波动性较大, 连续性较差; 后者在生成输出表面的最佳估算方法之前, 应对插值点属性的空间行为进行全面计算, 得出的结果连续性较好<sup>[16]</sup>。本文从全国190个监测点中随机抽取13个点作为验证点, 采用交叉验证法(cross-validation)对插值的效果进行验证。结果显示, OKM精度均在85%以上, 优于IDW, 这与潘竞虎等在对全国主要城市的11-12月PM<sub>2.5</sub>空间分布特征研究中的结论一致<sup>[17]</sup>, 说明OKM插值能较科学地反映中国PM<sub>2.5</sub>的空间分布格局, 故选之。

## 2.3 基于Moran's I的PM<sub>2.5</sub>浓度空间集聚分析方法

根据地理学第一定律, 地理事物或属性在空间分布上互为相关, 存在集聚(Clustering)、随机(Random)、规则(Regularity)分布, 并且相关性随距离增大而减少<sup>[18]</sup>, 该现象称为空间自相关<sup>[19-20]</sup>。大气活动所具有的空间关联性特征导致相近地区的PM<sub>2.5</sub>浓度值在统计上会更加接近<sup>[21]</sup>。空间自相关统计量能够刻画变量在同一个分布区内的观测数据之间潜在的相互依赖性 or 联系的紧密性<sup>[22]</sup>, 常用于分析地理和大气要素空间集聚和变化趋势, 为探索要素的时空集聚与演变规律提供依据<sup>[23]</sup>。在PM<sub>2.5</sub>研究领域, 该模型已经成功用于分析全国重点城市<sup>[17]</sup>和珠三角<sup>[24]</sup>等区域的PM<sub>2.5</sub>空间格局, 并得出PM<sub>2.5</sub>具有显著的空间自相关特性。可见, 空间自相关可以解释PM<sub>2.5</sub>的多尺度时空演变规律, 并有效提取其热点区域。

常用全局空间自相关分析和局部空间自相关进行分析。全局Moran指数I的计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} z_i z_j}{S_0 \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1)$$

式中:  $S_0 = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}$ ;  $W_{ij}$ 为空间权重矩阵, 本文取相邻单元为1, 其余为0。Moran指数I的取值在[-1, 1]之间。小于0表示负相关, 等于0表示不相关, 大于0表示正相关。对于Moran指数, 可以用标准化统计量Z检验是否存在空间自相关关系。

标准化统计量Z检验的计算公式为:

$$Z_I = \frac{I - E[I]}{\sqrt{V[I]}} \quad (2)$$

其中:

$$E[I] = -1/(n-1) \quad (3)$$

$$V[I] = E[I^2] - E[I]^2 \quad (4)$$

在0.05的显著水平下,  $Z(I) > 1.96$ , 表示PM<sub>2.5</sub>浓度空间单元之间存在着正的空间自相关, 即相似的高值或低值存在空间聚集;  $-1.96 < Z(I) < 1.96$ , 表示PM<sub>2.5</sub>浓度空间相关性不明显; 若  $Z(I) < -1.96$ , 表示PM<sub>2.5</sub>空间单元分布存在负相关, 属性值趋于分散分布。

局部空间自相关用以确定PM<sub>2.5</sub>空间聚集的具体位置。局部Moran指数的计算公式为

$$I_i = \frac{x_i - \bar{X}}{S_i^2} \sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}(x_i - \bar{X}) \tag{5}$$

式中:  $x_i$ 是*i*的属性;  $\bar{X}$  是其平均值;  $w_{i,j}$  是空间权重矩阵; 则

$$S_i^2 = \frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n w_{i,j}}{n-1} - \bar{X}^2 \tag{6}$$

局部Moran指数检验的标准化统计量为Z(I)。

$$Z_{Ii} = \frac{I_i - E[I_i]}{\sqrt{V[I_i]}} \tag{7}$$

$$E[I_i] = -\frac{\sum_{j=1, j \neq i}^n}{n-1} \tag{8}$$

$$V[I_i] = E[I_i^2] - E[I_i]^2 \tag{9}$$

在0.05的显著水平下, 若  $Z > 1.96$  且该单元与其邻近单元PM<sub>2.5</sub>浓度均高于平均值, 称之为“热区”(hot spot); 若  $Z > 1.96$  且该单元与其邻近单元在该年度的火灾发生率都低于平均值, 则为“冷区”(cold spot)。若  $Z < -1.96$  则表示存在空间负相关, 即高PM<sub>2.5</sub>浓度单元被低PM<sub>2.5</sub>浓度单元所环绕的“高一低关联”(High-Low), 以及低PM<sub>2.5</sub>浓度单元被高PM<sub>2.5</sub>浓度单元环绕的“低—高关联”(Low-High)。当  $Z = 0$  时, 观测值呈独立的随机分布。一般来讲,  $Z$  大于1.96就是显著, 大于2.58为极其显著。

2.4 中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度的空间自相关性验证

利用ArcGIS10.2平台的空间分析模型对PM<sub>2.5</sub>浓度数据进行空间自相关性验证。从Moran's *I*来看, 2014年12个月的平均Z(I)值为19.86, 且均大于2.58, 表明中国城市PM<sub>2.5</sub>全局浓度存在显著的正空间自相关(高高集聚或低低集聚)。Spatial Autocorrelation Model结果中, Gi\_Bin字段用于识别统计显著性的热点和冷点。置信区间+3到-3中的要素反映置信度为99%的统计显著性, 置信区间+2到-2中的要素反映置信度为95%的统计显著性, 置信区间+1到-1中的要素反映置信度为90%的统计显著性; 而置信区间0中要素的聚类则没有统计学意义(表1)。

3 结果分析

3.1 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度的时间变化规律

2014年中国190个监测城市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为61 μg/m<sup>3</sup>, 年均浓度最高的10座城市为

表1 2014年中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度空间自相关指数  
Tab. 1 Spatial autocorrelation index of PM<sub>2.5</sub> concentrations in the major cities of China in 2014

月份	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
Moran's <i>I</i>	0.16	0.30	0.24	0.09	0.05	0.20	0.31	0.26	0.16	0.16	0.26	0.16
Z(I)	15.94	29.85	24.03	10.78	5.59	20.66	31.10	26.11	16.18	16.16	25.94	15.92
HH城市数	119	110	123	36	15	126	120	123	70	63	121	124



邢台、保定、石家庄、邯郸、衡水、德州、菏泽、唐山、聊城、廊坊, 前8位城市年均值大于  $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。根据中国最新的环境空气质量标准 (GB 3095-2012), 环境空气功能区分为二类, 一类区为自然保护区、风景名胜区和需要特殊保护的区域,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度年均限值和日均限值分别为  $15 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 二类区为居住区、商业交通居民混合区、文化区、工业区和农村地区, 年、日均限值分别为  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。将全国城市按二类环境功能区统计, 2014 年仅三亚、海口、拉萨、鄂尔多斯、湛江等 17 个城市达到年均限值, 长沙等 139 个城市年均浓度位于  $35\sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  之间, 邢台等 34 个城市  $\text{PM}_{2.5}$  年均值高于二类环境功能区的日均限值。

**3.1.1 季节变化规律** 污染物排放强度和大气扩散条件存在明显的季节变化, 相应的, 中国城市  $\text{PM}_{2.5}$  呈现显著的冬高夏低、春秋居中的季节变化规律。中国北方地区冬季燃煤取暖导致全国  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最高, 全国平均浓度为  $84 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 高值区遍及整个长江以北地区; 夏季全国  $\text{PM}_{2.5}$  平均浓度  $44 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 春秋  $\text{PM}_{2.5}$  均值分别为  $59 \mu\text{g}/\text{m}^3$  和  $58 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 其中受西北主导风向和西北地区干旱、植被稀疏等自然条件影响, 中国春季  $\text{PM}_{2.5}$  高值区主要集中在西北地区, 如库尔勒春季均值高达  $134 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。

**3.1.2 2014 年  $\text{PM}_{2.5}$  月度变化规律** 中国城市的月均浓度呈现出“U”形起伏的变化规律。1-5 月呈现下降趋势, 6-9 月基本平稳, 略有降低, 10-12 月呈现上升趋势。其中 1 月  $\text{PM}_{2.5}$  浓度最高, 为  $108 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ; 二月平均浓度降低为  $93.82 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 均在  $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的标准线以上。9 月  $\text{PM}_{2.5}$  月均浓度最低, 为  $33 \mu\text{g}/\text{m}^3$ , 在  $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$  的标准线以下。3 月、10 月、11 月、12 月平均浓度在  $60\sim 70 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间, 4-8 月平均浓度在  $39\sim 52 \mu\text{g}/\text{m}^3$  区间。所以, 4-9 月是中国全年空气质量优良时段 (图 2)。

**3.1.3 2014 年  $\text{PM}_{2.5}$  逐日变化规律** 中国城市日均浓度变化呈现出周期性脉冲型起伏变化规律。春季和冬季波动周期较短, 平均为 7 日一个周期; 夏季和秋季波动周期较长, 约为 15 日一个周期。全年  $\text{PM}_{2.5}$  日均浓度整体呈现秋冬高夏秋低的 U 形趋势 (图 2)。2014 年日均最高值出现在 1 月 ( $148 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 最低值出现在 9 月 ( $27 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。

**3.1.4  $\text{PM}_{2.5}$  超标情况统计** 根据环境空气质量指数 (AQI) 技术规定 (试行) (HJ633-2012) [25] 定义的中国 24 h 污染等级划分标准,  $\text{PM}_{2.5}$  浓度可划分为 6 个等级, 即优 ( $0\sim 35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 良 ( $35\sim 75 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 轻度污染 ( $75\sim 115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 中度污染 ( $115\sim 150 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 重度污染 ( $150\sim 250 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), 严重污染 ( $250\sim 500 \mu\text{g}/\text{m}^3$ )。计算全国 190 个城市日均  $\text{PM}_{2.5}$  浓度, 得出每个城市各污染等级天数的频率。结果显示, 2014 年 190 个城市空气质量平均达标天数 274 天, 总体呈现夏季最多、秋春次之, 冬季最少的季节规律, 夏季空气质量

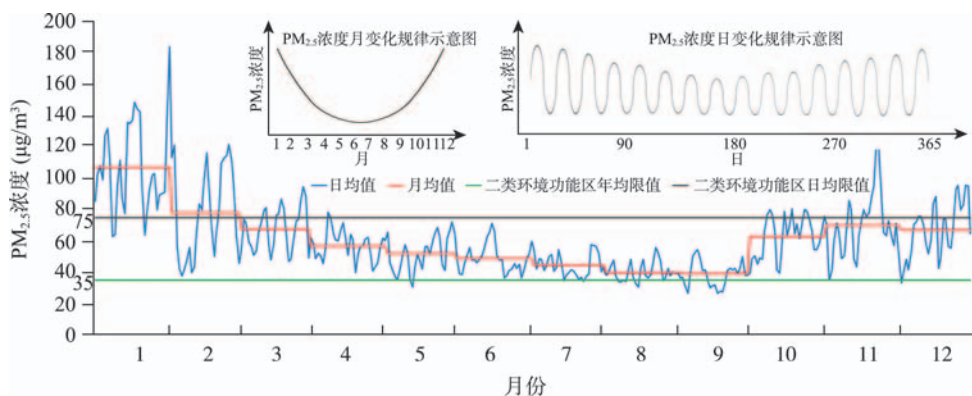


图 2 2014 年中国主要城市  $\text{PM}_{2.5}$  浓度时间变化规律图

Fig. 2 The distribution of the daily and monthly  $\text{PM}_{2.5}$  concentration change in the major cities of China in 2014

达标率86.84%，秋季和春季分别为76.65%和75.57%，冬季55.51%；从月度来看，6-8月空气达标率均高于80%，其中8月达标率90.32%，全年最高；4、5和10月均在60%~70%之间，2、3、11、12月在50%~60%之间，1月最低为41.94%。反之，污染天数则呈现春冬多，夏秋少的规律，1、2、3、11和12月的污染天数比例均超过30%，重度以上

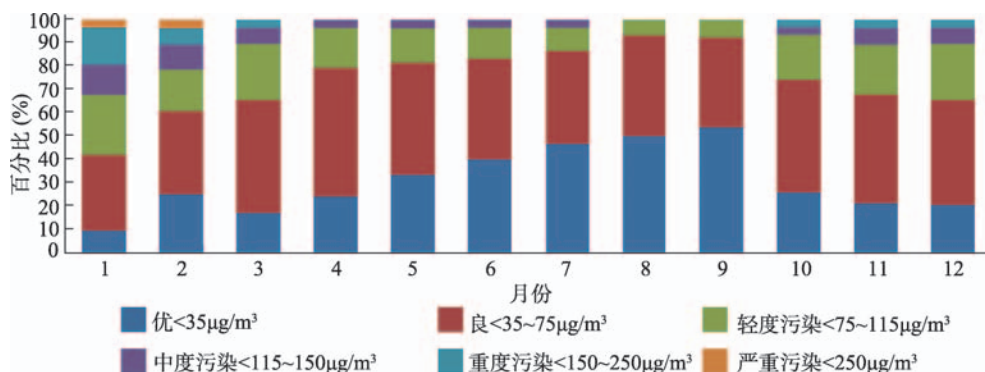


图3 2014年中国城市逐月PM<sub>2.5</sub>污染等级天数比例

Fig. 3 Monthly statistics of the proportion of days covered by PM<sub>2.5</sub> pollution in the major cities of China in 2014

污染天气主要出现在春冬季节，严重污染天气集中在1月和2月（图3）。

### 3.2 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度的空间分异规律

**3.2.1 2014年PM<sub>2.5</sub>空间分异规律** 从年均值来看，胡焕庸线和长江是中国PM<sub>2.5</sub>浓度高值区和低值区的东西和南北分界线。胡焕庸线以东和长江以北的环渤海城市群、中原城市群、长三角城市群、长江中游城市群和哈长城市群等地区是2014年PM<sub>2.5</sub>的高污染城市聚集地（图4a），年均值72 μg/m<sup>3</sup>以上的城市均在此范围内。长江以南地区和胡焕庸线以西地区（新疆中部除外）的城市PM<sub>2.5</sub>年均值均处于较低水平。

按GB 3095-2012年日均限值35 μg/m<sup>3</sup>统计，全年90%的城市PM<sub>2.5</sub>浓度超标（图4a），城市年均超标246天。44个城市超标天数大于300天，主要集中在京津冀、长三角、中原、江淮和长江中游城市群地区，其中淄博、济南、德州、济宁、菏泽、聊城和邯郸的超标天数多于340天；105个城市超标200~300天，广泛分布于长三角、山东半岛、辽东半岛、成渝、哈长、晋中、关中一天水、天山北坡等城市群地区；41个城市超标200天以下，集中在东南沿海和云藏蒙地区（图4b），只有鄂尔多斯、海口、拉萨和三亚4个城市超标100天以内。

按PM<sub>2.5</sub>浓度全年日均值超标率统计，全国城市平均超标93天。其中京津冀和鲁西北地区的邢台、石家庄、保定等10个城市日均值超标天数大于200天；70个城市超标100~200天，分布在长三角、山东半岛、中原、辽东半岛、长江中游、成渝、哈长和晋中等城市群地区；110个城市超标100天以下，集中在东部沿海、东南沿海、云藏和蒙甘宁地区。其中延安、大庆、贵阳等47个城市小于50天；福州、湛江、泉州、海口、厦门、曲靖、玉溪、昆明、三亚和拉萨10个城市超标不足10天（图4c）。

**3.2.2 2014年PM<sub>2.5</sub>季节空间变化规律** 按季节统计全国城市的PM<sub>2.5</sub>日均值超标率发现，2014年PM<sub>2.5</sub>污染范围呈现冬季最广，夏季最小，春秋居中的变化规律。冬季（88天）PM<sub>2.5</sub>日均值平均超标率为44.49%（39天）。超标率50%以上的81个高污染城市遍布整个华北和中原地区。超标30%~50%的61个城市集中在长三角、山东半岛、辽东半岛和桂贵地区；超标30%以下的49个城市分布在东南沿海和云藏蒙地区（图5d）。春季（87天）和秋季（88天）的平均超标率分别为24.43%（21天）和23.35%（20天），超标城市集中

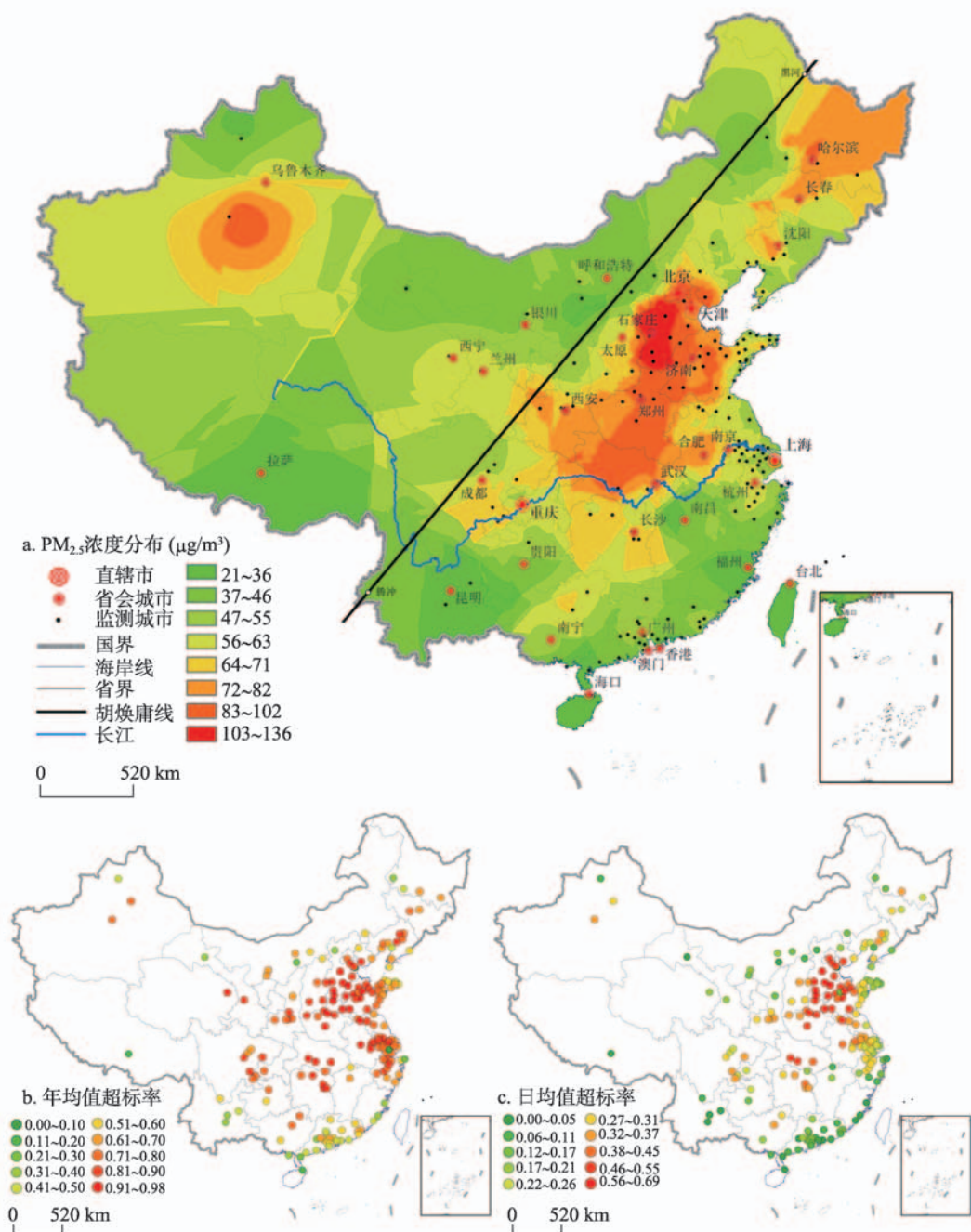


图4 2014年中国主要城市年均 $PM_{2.5}$ 浓度空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual average  $PM_{2.5}$  concentrations in the major cities of China in 2014

在华北平原地区，范围小于冬季。春季超标50%以上的21个城市分布在京津冀、鲁西北和新疆地区；超标30%~50%的46城市集中在中原地区、长三角北部和长江中游地区（图5a）；秋季超标50%以上的19个城市较春季南移，集在中河北、中原地区和鲁西北地区，30%~50%的39个城市集中在京津、中原、长江中游、哈大等城市群地区（图5c）；夏季（91天）平均超标率13.16%（12天），只有石家庄、邯郸和莱芜3个城市超标率大



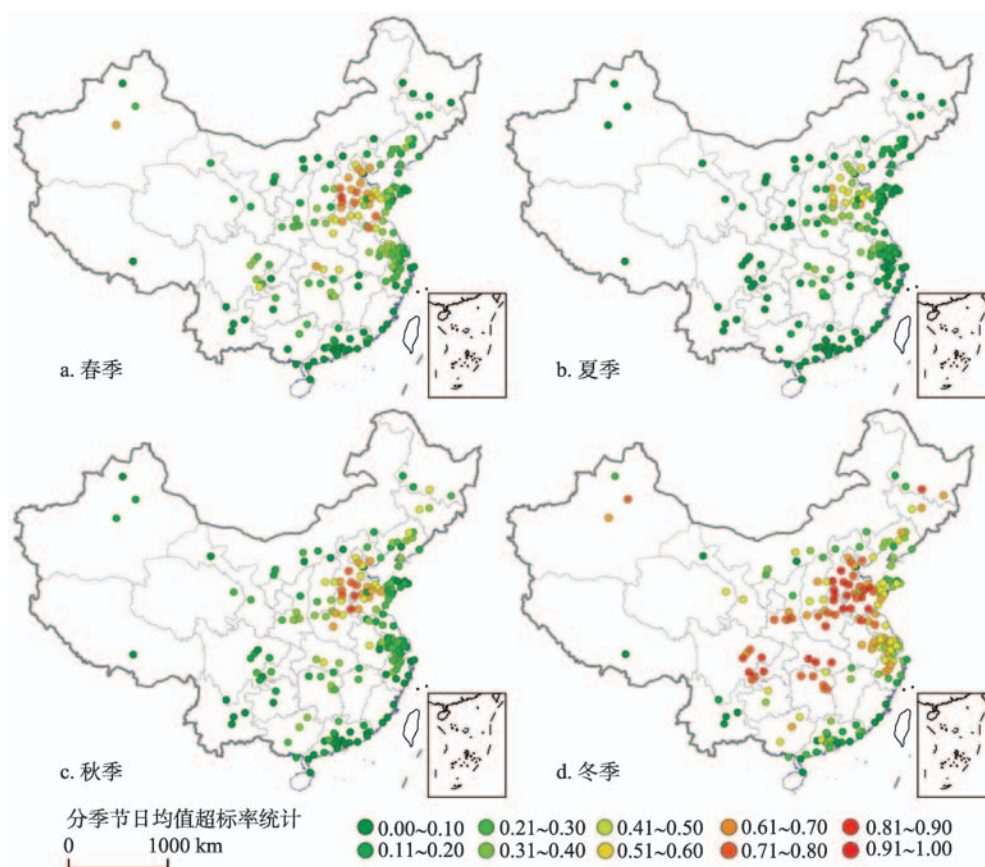


图5 2014年中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度季节性空间分布  
Fig. 5 Seasonal changes of air pollution in the major cities of China in 2014

于50%，超标30%以上的27个城市集中在京津冀和长三角北部地区，东部沿海和秦岭—淮河以南的108个城市超标率均低于10%（图5b）。

**3.2.3 2014年PM<sub>2.5</sub>月度空间变化规律** 从月度分析，1月份PM<sub>2.5</sub>污染浓度最高，空间范围最大，日均值平均超标率59.41%（18天），超标率50%以上的重污染城市遍布华北地区、中部地区和西南地区，其中成渝、京津冀和长江中游城市群是重度污染地区，长三角和辽东半岛城市群次之，东南沿海和云藏蒙地区空气质量较好（图6a）。2月（图6b）、3月（图6c）、11月（图6k）和12月（图6j）污染范围仅次1月，平均超标率30%~40%之间；其中2月重污染城市集中在京津冀、长三角、中原、长江中游、成渝、关中及天山北坡城市群，3月范围向华北和长江中游地区缩小；4月至9月（图6d~6i）期间，高污染城市分布范围从中部地区向京津冀地区持续缩小。10月（图6j）、11月和12月超标率回升，分别为26.96%、34.25%和33.74%，其中12月超标率较11月减少，且重度污染范围从京津冀地区显著南移，与11月APEC会议期间北京、天津、河北、山西、内蒙古、山东等6省区市同时采取的车辆限行、石油化工等污染企业关停等环境保护措施具有直接关系。反之，城市经济月度运行稳定的情况下，城市PM<sub>2.5</sub>的出现显著的月度差异，验证了PM<sub>2.5</sub>与风速具有负相关关系的观点<sup>[26]</sup>（图6）。

### 3.3 中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度的空间集聚性规律

**3.3.1 2014年PM<sub>2.5</sub>浓度的季节空间集聚规律** 全年和春、夏、秋、冬PM<sub>2.5</sub>浓度的Z(I)指



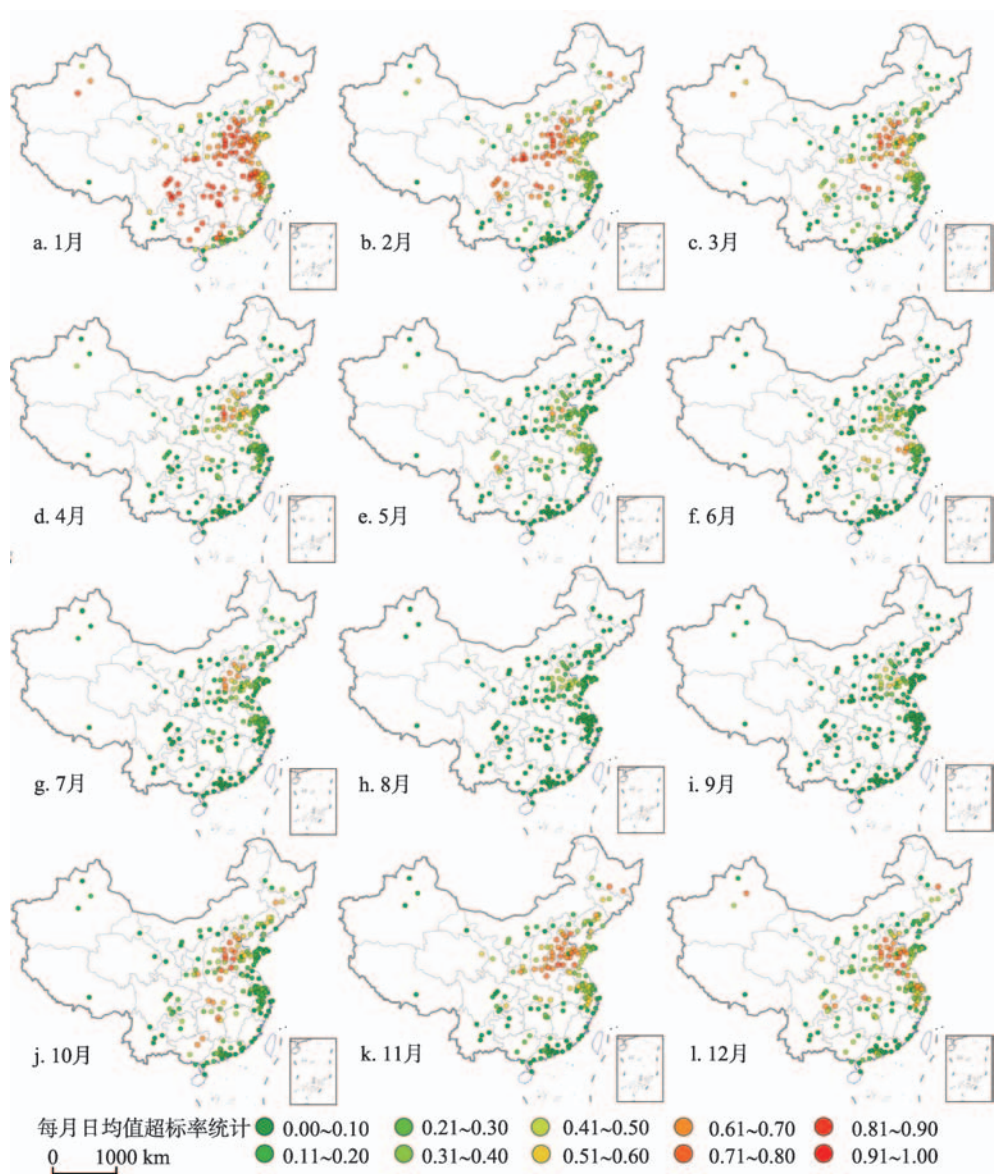


图6 2014年中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度月度空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of monthly PM<sub>2.5</sub> concentrations in the major cities of China in 2014

数分别为28.32、16.65、27.25、20.91和27.22，空间上具有相似的集聚特征。热点（Hot Spot）主要集中在东部沿海的环渤海地区、长三角地区、中部平原地区、关中—天水地区和内蒙古地区。另外春季新疆地区的三个监测城市出现PM<sub>2.5</sub>浓度高度集聚现象，这与春季该地区风沙多发的气候有关；冷点（Cold Spot）主要集中在东南沿海的珠三角城市群、云南和西藏地区；江淮、长江中游和成渝城市群，以及西北和东北地区分散的监测城市PM<sub>2.5</sub>空间自相关性不明显。图7表明PM<sub>2.5</sub>浓度在东部沿海的华北平原、长三角城市群和中部地区形成了较为稳定和持续的污染连片区，这些地区城市群高度发育，可见中国胡焕庸线以东和长江以北的华北和华东城市群地区是PM<sub>2.5</sub>浓度高集聚地区，而东南沿海的珠三角城市群、云南和西藏地区则是持续稳定的空气质量优良区。

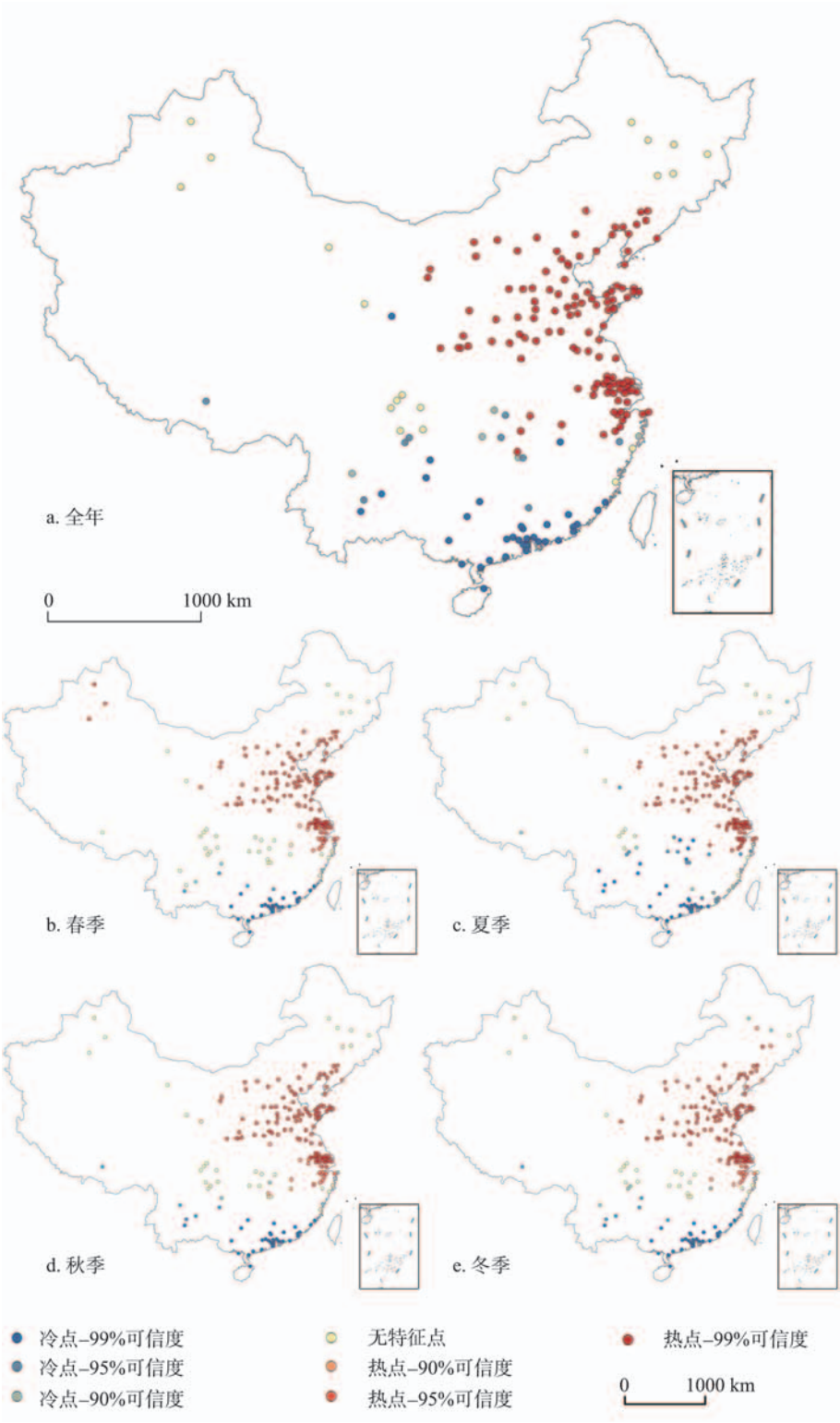


图7 2014年中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度年季空间集聚

Fig. 7 Spatial agglomeration of annual and seasonal PM<sub>2.5</sub> concentrations in the cities of China in 2014

**3.3.2 2014年PM<sub>2.5</sub>浓度的月度空间集聚与周期性循环规律** 按月份来看,中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度的空间局部相关性呈现周期性变化。1月(图8a)、2月(图8b)和3月(图8c),热点城市广泛分布于中国中部和东部沿海地区,其范围逐渐向长江以北退缩。其中1月全国以热点)和无特征点(No Significant Sopt)为主,而2、3月热点和冷点沿长江形成明显的分界线。这表明1月到3月期间,随着北方燃煤取暖逐渐停止,PM<sub>2.5</sub>污染范围逐渐从中国东南部地区向长江以北退缩,空气质量改善。4月(图8d)、5月(图8e)Z(I)指数相继缩小至全年最低,无特征点占据主导地位且由东部沿海向内陆地区扩散,表明随着春季的到来,北方地区风力增大,PM<sub>2.5</sub>污染范围向西部地区趋于消失。6(图8f)、7月(图8g)热点范围再次扩大,冷点范围在长江以南地区同时扩大,表明受季风气候影响,中国东部地区降雨量增大,对PM<sub>2.5</sub>的净化作用增强,各城市PM<sub>2.5</sub>浓度普遍下降,但

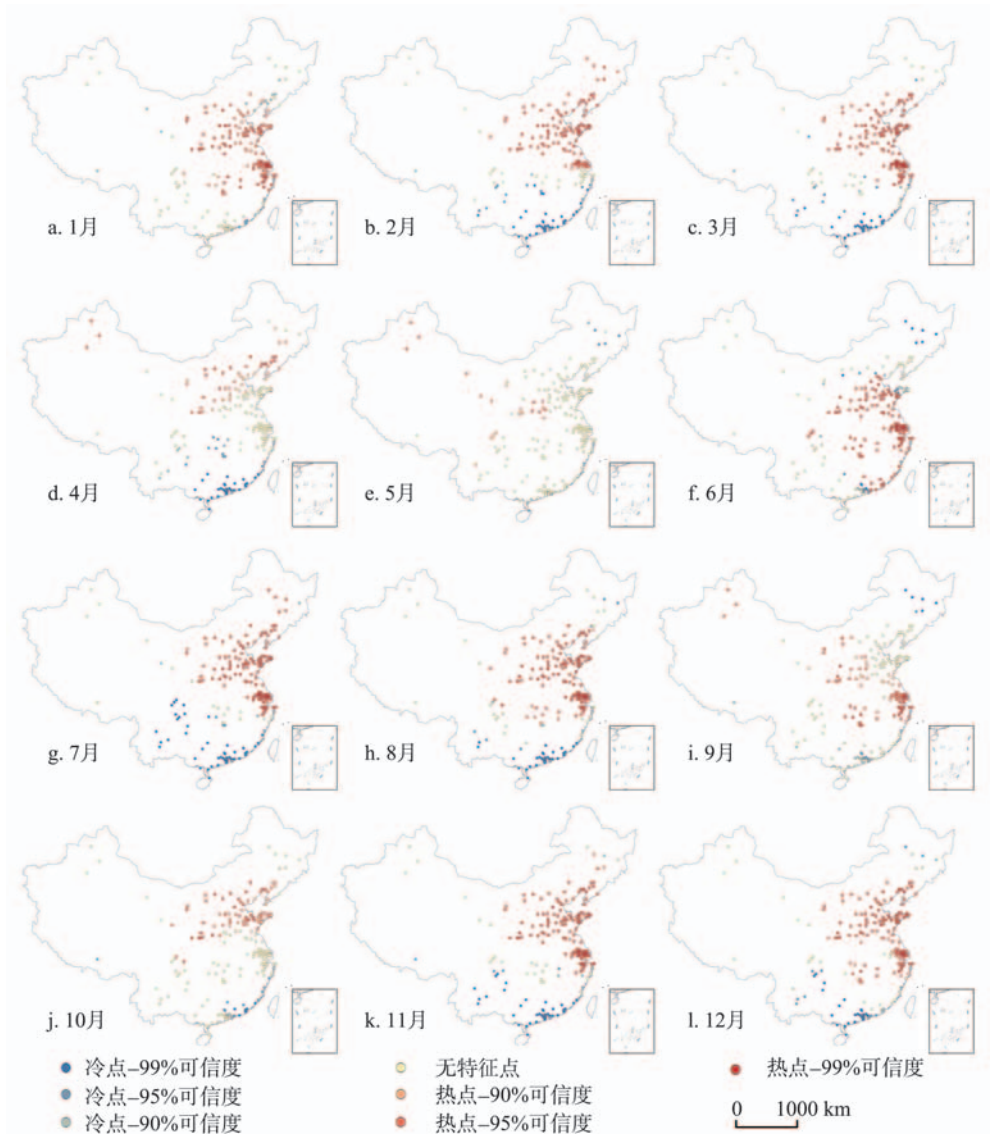


图8 2014年中国主要城市PM<sub>2.5</sub>浓度月度空间集聚

Fig. 8 Spatial agglomeration of monthly PM<sub>2.5</sub> concentrations in the major cities of China in 2014



在长三角及华北地区仍然有PM<sub>2.5</sub>高值集聚现象,这反映了这些地区产业与人口聚集对PM<sub>2.5</sub>浓度具有强有力的主导作用。8月(图8h)、9月(图8i)、10月(图8j)热点和冷点范围再次向西向北方向缩小,无特征点则从长三角和环渤海地区向内陆占据主导地位,表明PM<sub>2.5</sub>污染随之向内陆地区扩散,且于10月在华北平原地区趋于稳定。11月(图8h)、12月(图8i),随着北方燃煤取暖逐渐开展,高浓度PM<sub>2.5</sub>主导的热点范围再次遍布长江以北地区,同时优良空气质量主导的冷点范围在东南沿海地区趋于稳定。总体来看,12个月中PM<sub>2.5</sub>污染经历了由遍布中东部地区状态,逐渐向北方地区退缩,再由北方地区向遍布中东部地区的一个循环周期。全年只有4月5月和9月10月的高值集聚城市数量少,与季风明显相关性<sup>[26]</sup>。

## 4 结论与讨论

### 4.1 结论

(1) 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度具有显著的“U”形月均变化规律和周期性脉冲型逐日变化规律。2014年中国190个监测城市PM<sub>2.5</sub>年均浓度为61 μg/m<sup>3</sup>,全国城市平均达标天数为274天,年均值达标城市17个,达标天数夏季最多,秋春次之,冬季最少;其中6-8月空气达标率均在80%以上,4、5和10月在60%~70%之间,2、3、11、12月在50%~60%之间,1月最低为42%;污染天气春冬多,夏秋少,1、2、3、11和12月的污染天气比例均超过30%,严重污染天气集中在1月和2月。

(2) 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度具有显著的空间分异规律,胡焕庸线和长江是中国PM<sub>2.5</sub>浓度高值区和低值区的东西和南北分界线。胡焕庸线以东和长江以北的环渤海城市群、中原城市群、长三角城市群、长江中游城市群和哈长城市群等地区是2014年PM<sub>2.5</sub>的高污染城市聚集地,此范围内的城市PM<sub>2.5</sub>年均值在72 μg/m<sup>3</sup>以上;长江以南以及胡焕庸线以西(新疆中部除外)地区城市处于较低水平。PM<sub>2.5</sub>污染具有季节性空间差异,污染范围冬季最广,夏季最小,春秋居中;PM<sub>2.5</sub>污染具有月度空间变化规律,1月污染范围最大,9月最小,其间污染范围从整个华北地区、中部地区和西南地区向京津冀地区集中,10月份再次扩大。

(3) 中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度具有显著的空间集聚规律,北方城市群是PM<sub>2.5</sub>核心集聚区。华北平原和长三角地区是全年主要的PM<sub>2.5</sub>集聚地区,东南沿海地区则是持续稳定的空气质量优良区。中国城市PM<sub>2.5</sub>浓度按月份呈现周期性变化。1-3月PM<sub>2.5</sub>集聚区覆盖中国中东部地区,污染范围开始从长江以来向长江以北退缩;4-5月PM<sub>2.5</sub>污染范围向西部地区趋于消失。6-7月范围再次向华北平原地区扩大,8-9月随之向内陆地区扩散,且于10月在华北平原地区趋于稳定,11-12月污染范围向北方地区继续扩大,形成一个完整周期。4-5月和9-10月的高值集聚范围缩小,与季风同期。

### 4.2 讨论

关于污染城市排名的讨论。2014年初,国家环保部针对PM<sub>2.5</sub>、PM<sub>10</sub>、NO<sub>2</sub>、CO、O<sub>3</sub>等多种污染物综合排名,发布2014年重点区域和74个城市空气质量状况显示,空气质量相对较差的前10位城市分别是保定、邢台、石家庄、唐山、邯郸、衡水、济南、廊坊、郑州和天津<sup>[27]</sup>。本文只针对PM<sub>2.5</sub>浓度进行城市排名,得出PM<sub>2.5</sub>年均值最高的10座城市分别为邢台、保定、石家庄、邯郸、衡水、德州、菏泽、唐山、聊城、廊坊。因研究对象不同,故排名结果有所差异。

关于中国PM<sub>2.5</sub>时空分布规律的讨论。2013年,徐虹等基于已发表文献中的PM<sub>2.5</sub>离



子数据,探讨中国 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空变化特征,得出中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重的结论。空间上看,西北地区历史统计平均值最高,其次是华北、西南和华东地区,华南地区最低;季节上看, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体冬季最高,春季最低,但各组分的季节变化特征各异<sup>[28]</sup>。该研究与本文关于中国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重的结论一致,但本文采用的监测数据在准确性方面较文献数据更具说服力,在空间上得出了华北、华东地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,华南地区较低的结论,在季节上认为冬季全国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度最高,春秋次之,夏季最低。但前文对 $\text{PM}_{2.5}$ 各组分的时空规律特征研究为本文提供了思路借鉴。2014年,Gang Lin等运用MODIS反演数据探讨了2001-2010年全国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度时空演变规律,认为以京津冀为主的华北地区,以山东、安徽和江苏为主的华东地区,以及河南与四川是中国 $\text{PM}_{2.5}$ 的主要集聚区<sup>[29]</sup>。这一结论与本文得出的空间规律基本相似,但该数据无法揭示中国和城市逐月和逐日的时间规律。2014年,Jianlin Hu基于夏季的监测数据研究了华北平原地区和长三角地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 时空规律,认为华北平原的污染程度高于长三角,并且 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在250 km范围内具有显著的时间关联性<sup>[26]</sup>,这一结论与本文 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间格局特征与空间自相关集聚特征规律相吻合。整体来看,目前尚无基于监测数据的全国 $\text{PM}_{2.5}$ 时空规律研究,本文得出的时空变化规律可以在更广的空间范围与连续季节一月份序列方面弥补和佐证之前的研究结论。

关于东南沿海地区为稳定的空气质量优良区的讨论。京津冀、长三角和珠三角三大经济发达区域是中国 $\text{PM}_{2.5}$ 的重点监测与关注地区,诸多研究认为珠三角是中国 $\text{PM}_{2.5}$ 的重点污染地区<sup>[17]</sup>。随着国家对空气污染治理投入的不断加大,全国各地的空气质量均得以改善,但在2015年2月2日环保部公布的74个重点城市2014年空气质量状况中,仍有九成城市空气质量不达标。2014年,珠三角区域空气质量平均达标天数(298天)高于全国监测城市平均值(241天)23.65%,重污染天数比例也远低于全国平均水平。并且超标天数的污染物中以 $\text{O}_3$ 为首要污染物天数最多,而非 $\text{PM}_{2.5}$ 。另外,根据《中国空气质量在线监测分析平台》显示,2014年珠三角城市 $\text{PM}_{2.5}$ 年均值均位于 $30\sim 53\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 之间,低于全国平均水平 $61\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。而京津冀和长三角2014年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分别为 $93\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 和 $57\ \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在2014年 $\text{PM}_{2.5}$ 达到全国二级标准的12个城市中,6个城市位于珠三角地区<sup>[30]</sup>。所以,在全国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染整体较为严重的背景下,本文关于珠三角城市群属于环境质量较为稳定的空气质量优良区这一结论具有可信性。

另外,本文揭示的 $\text{PM}_{2.5}$ 逐月时空规律中,12月超标天数明显少于11月,且重度污染范围从京津冀地区显著南移,与11月APEC会议期间京津冀晋蒙鲁等6省市区同时采取的车辆限行、石油化工等污染企业关停等环境保护措施具有直接关系。这一结论印证了刘彦随等在《Nature》发文所得出的“区域联防联控与管制在控制污染物排放、改善大气环境质量中具有重大意义和作用”之结论<sup>[31]</sup>。综合考虑中国 $\text{PM}_{2.5}$ 的国内外研究成果,目前尚停留在对 $\text{PM}_{2.5}$ 的组分、来源和时空现象的分析阶段,基于长时间监测数据讨论 $\text{PM}_{2.5}$ 各组分的时空规律、影响因素,及其与快速城市化过程的交互耦合关系是未来研究的重要内容。

## 参考文献(References)

- [1] Tian S, Pan Y, Liu Z, et al. Size-resolved aerosol chemical analysis of extreme haze pollution events during early 2013 in urban Beijing, China. *Journal of Hazardous Materials*, 2014, 279: 452-460.
- [2] Wang Y, Yao L, Wang L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57: 14-25.
- [3] Kan H, Chen R, Tong S. Ambient air pollution, climate change, and population health in China. *Environment International*, 2012, 42: 10-19.

- [4] Guan D B, Su X, Zhang Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary PM<sub>2.5</sub> emissions. *Environmental Research Letters*, 2014, 9: 1-9.
- [5] Pan Yuepeng, Jia Lin, Tian Shili, et al. Potential effects of haze pollution on agriculture in China. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(11): 2279-2280. [潘月鹏, 贾琳, 田世丽, 等. 大气霾污染对农业生产的可能影响. *农业环境科学学报*, 2014, 33(11): 2279-2280.]
- [6] Hu M, Jia L, Wang J, et al. Spatial and temporal characteristics of particulate matter in Beijing, China using the Empirical Mode Decomposition method. *Science of the Total Environment*, 2013, 458-460: 70-80.
- [7] Ho K F, Engling G, Ho S S H, et al. Seasonal variations of anhydrosugars in PM<sub>2.5</sub> in the Pearl River Delta Region, China. *Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology*, 2014, 66: 22577.
- [8] Li L, Chen C H, Fu J S, et al. Air quality and emissions in the Yangtze River Delta, China, *Atmos. Chem. Phys.*, 2011, 11: 1621-1639.
- [9] Zhao P S, Dong F, He D, et al. Characteristics of concentrations and chemical compositions for PM<sub>2.5</sub> in the region of Beijing, Tianjin, and Hebei, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2013, 13: 4631-4644.
- [10] Liu Y, Paciorek C J, Koutrakis P. Estimating Regional Spatial and Temporal Variability of PM<sub>2.5</sub> Concentrations Using Satellite Data, Meteorology, and Land Use Information. *Environmental health perspectives*, 2009, 117: 886-892.
- [11] Wang J, Christopher S A. Intercomparison between satellite- derived aerosol optical thickness and PM<sub>2.5</sub> mass: Implications for air quality studies. *Geophysical Research Letters*, 2003, 30(21): Art. No. 2095.
- [12] Paciorek C J, Liu Y. Limitations of remotely-sensed aerosol as a spatial proxy for fine particulate matter. *Environ Health Perspect*, 2009, 117: 904-909.
- [13] Ministry of environmental protection of the People's Republic of China. Ambient Air Quality Standards (on trial). National Environmental Protection Standards of the People's Republic of China (GB3095-2012), 2012-02-29. [国家环境保护部. 环境空气质量标准(试行). 中华人民共和国国家环境保护标准(GB3095-2012), 2012-02-29.]
- [14] Wang Zhanshan, Li Yunting, Chen Tian, et al. Spatial- temporal characteristics of PM<sub>2.5</sub> in Beijing in 2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(1): 110-120. [王占山, 李云婷, 陈添, 等. 2013年北京市PM<sub>2.5</sub>的时空分布. *地理学报*, 2015, 70(1): 110-120.]
- [15] Seung-Jae L, Marc L S, Aaron V D, et al. Comparison of geostatistical interpolation and remote sensing techniques for estimating long- term exposure to ambient PM<sub>2.5</sub> concentrations across the continental United States. *Environmental Health Perspectives*, 2012, 120(12): 1727-1732.
- [16] Zhang A, Qi Q, Jiang L, et al. Population Exposure to PM<sub>2.5</sub> in the Urban Area of Beijing. *PLOS ONE*, 2013, 8(5): 1-9.
- [17] Pan Jinghu, Zhang Wen, Li Junfeng, et al. Spatial distribution characteristics of air pollutants in major cities in China during the period of wide range haze pollution. *Chinese Journal of Ecology*, 2014, 33(12): 3423-3431. [潘竞虎, 张文, 李俊峰, 等. 中国大范围雾霾期间主要城市空气污染物分布特征. *生态学杂志*, 2014, 33(12): 3423-3431.]
- [18] Tobler W A. A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic Geography*, 1970, 46: 234-240.
- [19] Moran P A. The interpretation of statistical maps. *Journal of the Royal Statistical Society B*, 1948, 37: 243-251.
- [20] Geary R C. The contiguity ratio and statistical mapping. *The Incorporated Statistician*, 1954, 5: 115-145.
- [21] Wu J S, Li J C, Peng J, et al. Applying land use regression model to estimate spatial variation of PM<sub>2.5</sub> in Beijing, China. *Environmental science and pollution research international*, 2015, 22(9): 7045-7061.
- [22] Chen Gangqiang, Li Xun, Xu Xueqiang. Spatial agglomeration and evolution of urban population in China. *Acta Geographica Sinica*, 2008, 63(10): 1045-1054. [陈刚强, 李郇, 许学强. 中国城市人口的空间集聚特征与规律分析. *地理学报*, 2008, 63(10): 1045-1054.]
- [23] Zhou Tianmo, Fu Qiang, Chu Yunqiang, et al. Research on the application of spatial autocorrelation method in environmental pollution. *Bulletin of Surveying and Mapping*, 2013(1): 53-56. [周天墨, 付强, 诸云强, 等. 空间自相关方法及其在环境污染领域的应用分析. *测绘通报*, 2013(1): 53-56.]
- [24] Xu Weijia, He Fangfang, Li Hongxia, et al. Spatial and temporal variations of PM<sub>2.5</sub> in the Pearl River Delta. *Research of Environmental Sciences*, 2014, 27(9): 951-957. [徐伟嘉, 何芳芳, 李红霞, 等. 珠三角区域PM<sub>2.5</sub>时空变异特征. *环境科学研究*, 2014, 27(9): 951-957.]
- [25] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. Technical Regulation on Ambient Air Quality Index (on trial). National Environmental Protection Standards of the People's Republic of China (HJ 633-2012), 2012-02-29. [国家环境保护部. 环境空气质量指数(AQ)技术规定(试行). 中华人民共和国国家环境保护标准(HJ 633-2012), 2012-02-29.]
- [26] Hu J L, Wang Y G, Ying Q, et al. Spatial and temporal variability of PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub> over the North China Plain and the

- Yangtze River Delta, China. *Atmos Environ*, 2014, 95: 598-609.
- [27] Environmental Protection Department. The air quality condition of key area and 74 cities in China in 2014. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201502/t20150202\\_295333.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201502/t20150202_295333.htm). 2015-02-02. [环境保护部. 2014年重点区域和74个城市空气质量状况. [http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201502/t20150202\\_295333.htm](http://www.zhb.gov.cn/gkml/hbb/qt/201502/t20150202_295333.htm). 2015-02-02.]
- [28] Xu Hong, Zhang Xiaoyong, Bi Xiaohui, et al. Spatial and seasonal distribution characteristics of sulfate and nitrate in PM<sub>2.5</sub> China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Nankaiensis*, 2013, 46(6): 32-40. [徐虹, 张晓勇, 毕晓辉, 等. 中国PM<sub>2.5</sub>中水溶性硫酸盐和硝酸盐的时空变化特征. *南开大学学报(自然科学版)*, 2013, 46(6): 32-40.]
- [29] Lin G, Fu J, Jiang D, et al. Spatio-temporal variation of PM<sub>2.5</sub> concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2014, 11(1): 173-186.
- [30] China National Environmental Monitoring Centre. Air Quality On-Line Monitoring and Analysing System of China. <http://www.aqistudy.cn/>, 2015-08-02. [中国环境监测总站. 中国空气质量在线监测分析平台. <http://www.aqistudy.cn/>, 2015-08-02.]
- [31] Liu Y, Li Y, Chen C. Pollution: Build on success in China. *Nature*, 2015, 517(8): 145-145.

## Spatial-temporal characteristics of the PM<sub>2.5</sub> in China in 2014

WANG Zhenbo<sup>1,2</sup>, FANG Chuanglin<sup>1,2</sup>, XU Guang<sup>1</sup>, PAN Yuepeng<sup>3</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. Key Laboratory of Regional Sustainable Development Modeling, CAS, Beijing 100101, China;

3. Institute of Atmospheric Physics, CAS, Beijing 100029, China)

**Abstract:** Haze pollution in China has become a severe environmental problem for people's daily life as well as their health, among which PM<sub>2.5</sub> makes significant contribution to poor air quality. Satellite observations played a leading role in the recognition in the spatio-temporal variation of PM<sub>2.5</sub> nationally. However, based on the information and data obtained by satellites, the inversion method has limitations to truly reflect the spatio-temporal variation of PM<sub>2.5</sub> concentrations near ground level. Based on the observed PM<sub>2.5</sub> concentration data from 945 newly set-up air monitoring sites in 2014, our research reveals the spatio-temporal variations of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China by using spatial statistical model. The results show that (1) in 2014, the average PM<sub>2.5</sub> concentration in China was 61  $\mu\text{g}/\text{m}^3$ . It had a periodical U-impulse type daily variation as well as a U-shaped monthly variation with a higher level in autumn and winter while a lower one in spring and summer. (2) Concentration of PM<sub>2.5</sub> in urban China shows a significant spatial differentiation and clustering pattern with spatial-periodic occurrences in north and south China. (3) The Hu-line (Hu Population Line) and Yangtze River are respectively the east-west and north-south boundaries which separate the high-value zone and the low-value zone of PM<sub>2.5</sub> concentrations in China. In 2014, the highly polluted cities by PM<sub>2.5</sub> were mainly distributed in the urban agglomerations (Central Henan, Harbin-Changchun, the Bohai Rim Region, the Yangtze River Delta, and the Middle Yangtze River), east of the Hu-line and north of the Yangtze River. The Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration was the most severely polluted region all the year round. The southeast coastal region centered on the Pearl River Delta had good air quality in a stable manner.

**Keywords:** PM<sub>2.5</sub>; spatial-temporal characteristics; monitoring data; China