

华北地区颗粒物浓度时空分布特征及其因素

詹建益¹, 黄观超², 周 华³, 段文松², 吴安安², 王文洁², 李 婷²

(1. 浙江建设职业技术学院, 杭州 311231; 2. 安徽师范大学环境科学与工程学院, 芜湖 241000;

3. 安徽师范大学地理与旅游学院, 芜湖 241000)

摘要: 利用2017年华北地区各地级以上城市空气质量浓度等有关数据, 对该区域内的颗粒物浓度时空分布特征进行研究, 在此基础上进一步利用空间自相关分析方法对该区域内的颗粒物浓度的空间聚集特征进行定量描述, 并利用空间计量模型分析了影响华北地区城市颗粒物浓度的因素。结果表明: 整体上, 华北地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的污染日出现的平均频率分别为17.25%和14.23%, 需重点关注细颗粒物造成的污染。在时间分布上, 各省市的颗粒物月均浓度存在“U”型变化, 呈现出冬季>秋季~春季>夏季的规律。在空间分布上, 各地级市颗粒物年均浓度具有明显的空间聚集特性, 高聚集主要出现在河北南部, 低聚集主要出现在内蒙古。空间计量模型表明, 风速、降雨量和人均GDP对华北地区城市的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 年均浓度均具有显著的负向影响, 而第二产业占比、煤炭使用量和机动车保有量均对颗粒物浓度有正向影响, 其中煤炭消耗量的影响最大, 其次是机动车保有量。上述研究结果可为制定华北地区大气污染控制提供有效的措施和科学依据。

关键词: 华北地区; 颗粒物浓度; 时空分布; 空间自相关; 空间计量模型

近年来, 随着能源消费总量的日趋上升, 我国的大气环境急剧恶化, 空气污染问题日益受到人们的关注。大气中颗粒物(PM_{10} 和 $PM_{2.5}$)能够富集空气中的污染物质、重金属和细菌病毒, 且其在成核和吸湿过程中起着至关重要的作用, 从而会影响气候、降低城市能见度和危害人体健康^[1]。2013年秋冬季节发生在我国中部和东部地区的大范围雾霾天气, 引起了公众对城市空气污染问题的高度关注, 也迫使政府管理部门加大对大气环境的治理。在2016年, 由国务院印发的生态环境保护规划中, 明确要求各地级以上城市空气质量优良天数在“十三五”期间的比率超过80%。 PM_{10} 和 $PM_{2.5}$ 是评价空气质量好坏的重要指标, 因此, 准确描述“十三五”期间地级及以上城市颗粒物浓度时空特征, 揭示其与地理空间相关因素的相关性, 对于科学调控城市空气污染具有重要的政策和现实意义。

目前, 与大气颗粒物浓度时空异质性及其影响因素的相关研究在国内外取得了较快的进展, 主要包括基于地统计学的大气污染物浓度时空分布特征研究、构建空间分离指数模型和重心模型的大气污染物空间分离研究以及结合空间计量模型与空间自相关分析的空间效益研究等^[2-5]。影响我国大气颗粒物浓度差异的因素一直也是学者们关注的焦

收稿日期: 2019-10-13; 修订日期: 2020-05-06

基金项目: 安徽省自然科学基金项目(1608085MB45)

作者简介: 詹建益(1980-), 男, 浙江杭州人, 硕士, 讲师, 研究方向为环境治理和生态修复。

E-mail: zhanjianyi@126.com

通讯作者: 段文松(1979-), 男, 安徽芜湖人, 博士, 教授, 研究方向为水体整治与生态修复。

E-mail: dws7911@163.com

点,研究大都集中在社会经济驱动因素和气象因素上。成亚利等^[6]对上海市2014年间环境空气质量变化进行分析,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 是上海市首要污染物,而且 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有着明显季节性变化特征。这与岳玓利等^[7]关于珠三角区域空气质量的研究中有相似结果,此外,该研究还发现,2013年珠三角地区 PM_{10} 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体低于北方城市,这可能与不同地区的发展结构不同相关。Lu等^[8]分析了我国1998—2014年 $\text{PM}_{2.5}$ 的时空差异发现:经济因素导致我国部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较低,东部地区 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与人类活动关系密切,而西北地区浓度较高主要是沙尘暴影响。程龙等^[9]分析了合肥市颗粒物与气象因素的关系,发现 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度与降水、风速、气温呈现负相关性。杨勉等^[10]对长江经济带 $\text{PM}_{2.5}$ 分布的时空特征研究中,经空间回归分析表明, $\text{PM}_{2.5}$ 对长江经济带地区的污染随经济发展水平的提高呈现先上升后下降的趋势,且人口密度和公共交通运输强度对大气环境质量均有一定的影响。

现今,对大气颗粒物的研究已成为大气环境的一大热点,尤其是近年来有关 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 的各类问题越来越凸显。然而,现多是对城市群区域或一些单个大城市的颗粒物的时空变化特征进行研究,对一个大范围区域时空变化特征的研究还存在不足。同时对于影响因素的研究多集中在气象因素(比如温度、降雨、风速和相对湿度等气象条件)和社会经济驱动因素(比如人均GDP、能源结构和汽车保有量等),但大多数都是将两者分开进行充分的综合评价,也没有考虑到各因素的相对重要性。本文以华北地区共36个地级及以上城市为研究对象,应用空间自相关分析方法研究2017年间华北地区颗粒物浓度的全局聚集特性和局部聚集特性,并利用空间计量经济学方法分析华北地区重点城市颗粒物浓度与自然、社会经济因素的关系,为改善区域大气环境质量提供决策依据。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概述

选取华北地区各地级及以上城市为研究对象,该地区主要包括北京市、天津市、山西省、河北省和内蒙古自治区,其中山西省和河北省各有11个地级市,内蒙古自治区包括9个地级市和3个盟(将盟等同于地级市研究)。华北地区东接大兴安岭,西及青藏高原,南邻秦淮河,北至内蒙古高原,东部临海地区相接于渤海和黄海,整体区域位于 $32^{\circ}\sim 42^{\circ}\text{N}$ 之间,属于亚热带与北温带地段。冬季低温少雨,夏季高温多雨。

1.2 数据来源

本文研究使用的华北地区36个地级及以上城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 初始数据日均浓度来源于“中国环境监测中心”网站的空气历史数据,各地级市的 $\text{PM}_{2.5}$ 和 PM_{10} 月均浓度、季均浓度和年均浓度根据相应的日均浓度计算得出。结合前人研究和华北地区实际发展情况,选取气象因素(温度、降雨量、相对湿度和风速)、经济发展因素(人均GDP、第二产业占比)、能源因素(煤炭消耗量)、城市化因素(城市化率、机动车保有量、森林覆盖率)四类作为污染因子分析,各城市的历史天气数据(温度、降雨量、相对湿度和风速)来源于国家气象数据网站,相关经济社会数据(GDP、第二产业GDP、煤炭消耗量、常住人口、城市常住人口、机动车保有量和森林覆盖率)来源于各城市相应统计网上公布的统计年鉴。

1.3 研究方法

基于上述数据来源,经整理计算后采用地理信息系统(GIS)空间自相关分析工具

分析该地区2017年颗粒物浓度时空分布特征。根据数据模型分析结果定性定量地得出华北地区大气颗粒物浓度整体及局部的分布特征,并利用空间回归模型分析华北地区各城市的颗粒物浓度与自然、社会经济因素的关系。

1.3.1 全局自相关分析

全局空间自相关用于衡量整体区域的空间关联性和空间变异性,即展示某单一输入值在研究区域整体范围内的自相关程度,通常用Moran's I 指数表示^[10]。根据全局自相关分析工具可以得出各城市之间关于该观测值在空间上的分布状态,可分为聚集分布、离散分布和随机分布。Moran's I 指数的具体表达式为^[11]:

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_i - \bar{x})^2} \quad (1)$$

式中: n 为华北地区地级及以上城市个数(个),共36个; w_{ij} 为空间邻接矩阵; x_i 和 x_j 代表不同城市对应的PM_{2.5}和PM₁₀浓度数据。Moran's I 指数的取值为 $[-1, 1]$ 。其中颗粒物浓度值的自相关系数利用Moran's I 指数的绝对值大小表示,当Moran's $I > 0$,说明城市颗粒物浓度呈正相关,Moran's $I < 0$ 为负相关。若Moran's I 值接近1,代表颗粒物浓度地在区域内呈现聚集分布;若Moran's I 值接近于-1,则表示颗粒物浓度在空间上呈现离散分布,0表示处于随机分布状态。

1.3.2 局部自相关分析

局部自相关通常用于衡量某一空间单元与其相邻单元之间的相似性与差异性,即某一城市与其相邻城市之间对于单一输入值的局部聚集分布状况。本文采用的局部空间自相关法是Local Moran's I 指数分析法。该方法可以反映局部空间自相关现象对整个空间自相关的影响程度,计算公式如下^[11]:

$$I = \frac{(x_i - \bar{x})}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}), \text{ 且 } i \neq j \quad (2)$$

根据结果可将局部空间分为五种类型:高一高聚集、低—低聚集、低—高聚集、高一低聚集和无明显聚集。

1.3.3 空间计量分析方法

空间计量分析方法在考虑自变量和因变量空间相关性的基础上,改进了一般线性回归模型(OLS),使回归估计系数更加精确。空间计量模型通常分为两种类型,即空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)。空间计量模型的一般公式如下^[12]:

$$y = \rho W_1 y + X\beta + \varepsilon \quad (3)$$

$$\varepsilon = \lambda W_2 \varepsilon + \mu \quad (4)$$

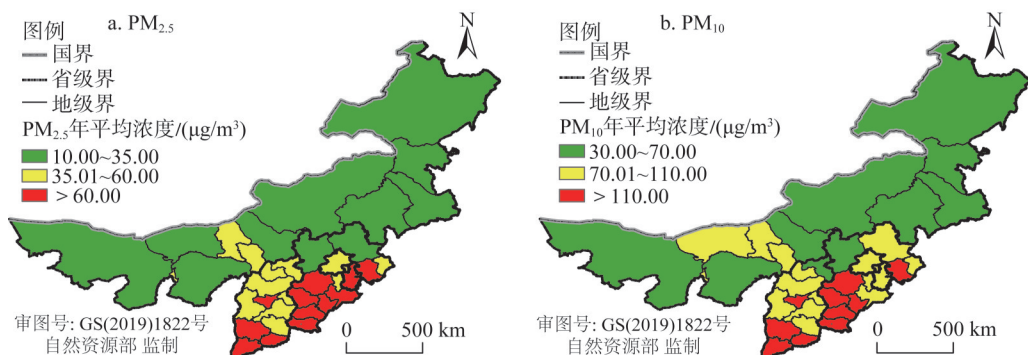
式中: y 代表2017年华北地区各地级及以上城市颗粒物浓度($\mu\text{g}/\text{m}^3$); W_1 、 W_2 为空间权重矩阵,反映颗粒物变化的空间趋势; ε 为随机误差项; μ 为正态分布的随机误差; X 和 β 分别表示解释变量(影响因素)和相应的响应系数。当 $\rho \neq 0$, $\lambda = 0$ 时,空间计量模型属于空间滞后模型(SLM),表明相邻空间物体之间存在空间集聚效应,且 ρ 的值代表空间集中强度。相反,当 $\rho = 0$, $\lambda \neq 0$ 时,空间计量模型则属于空间误差模型(SEM); λ 表示回归残差之间的空间集聚强度。

在模型的选择上需要注意的是,如果SLM模型的拉格朗日乘子检验比SEM模型的拉格朗日乘子检验更具有统计学意义,且SLM模型的稳健性拉格朗日乘子显著而SEM模型的稳健性拉格朗日乘子不显著,则选择SLM模型,否则选择SEM模型^[13]。若两个模型均不显著,则选择OLS模型。

2 结果分析

2.1 颗粒物浓度空间分布特征分析

为分析大气颗粒物平均浓度的空间分布状况,统计了2017年华北地区各地级及以上城市PM_{2.5}和PM₁₀的年均浓度(图1)。华北地区PM_{2.5}和PM₁₀的整体年均浓度分别为50.62 μg/m³和95.10 μg/m³,年均值都超过了城市大气颗粒物二级浓度限值^[14],污染程度较重。将收集的各城市颗粒物日均浓度与《环境空气质量技术标准》(HJ 633-2012)划定的污染等级中对应的颗粒物浓度范围进行比对,结果发现:在所监测的36个城市中,PM_{2.5}的污染日出现的平均频率为17.25%,最高频率出现在石家庄,达到37.81%,其次为保定(37.53%)和邯郸(35.34%)。PM₁₀的污染日出现的平均频率为14.23%,最高频率出现在邯郸(38.08%),其次为邢台(37.81%)。从出现污染日的频率来看,华北地区PM_{2.5}造成的污染更为严重。



注:本图基于自然资源部标准地图服务系统下载的标准地图制作,底图无修改,下同。

图1 2017年华北地区PM_{2.5}和PM₁₀年均浓度分布

Fig. 1 The average annual concentration distribution of PM_{2.5} and PM₁₀ in North China in 2017

由图1a可发现,华北地区PM_{2.5}年均浓度表现出显著差异,南部的京津冀等地区的PM_{2.5}年均浓度要明显高于其他城市,其中河北省大部分城市(北京以南,如保定、石家庄、邯郸等)为大气颗粒物年均浓度最高区域,13个地级市整体PM_{2.5}均值达到65.23 μg/m³,分别是北京市和天津市的1.12倍和1.04倍。此外,通过计算还发现山西省的PM_{2.5}年均浓度仅次于京津冀地区,年均浓度达到了58.10 μg/m³。而相对于华北其他地区,内蒙古各城市的大PM_{2.5}浓度年均浓度则要低很多,年均浓度仅为31.16 μg/m³,这主要与各地的地理、气象等自然条件和经济发展因素有关^[15,16]。将图1a和图1b进行对比发现,PM₁₀的浓度空间分布特征与PM_{2.5}空间分布具有较好的一致性(南部地区较高,北部地区较低)。其中PM₁₀年均质量浓度较高的地区主要集中在河北省(115.64 μg/m³)和山西省(105.36 μg/m³)。造成山西省PM₁₀年均浓度较高的原因是山西省是煤炭型经济,粗放型增长方式造成严重的结构型污染,另外山西省与河北省毗邻,可能受到河北省大气颗粒

物输送的因素影响。总体来说,华北地区各省(市、自治区)污染程度的轻重规律为:河北省>山西省>天津市>北京市>内蒙古自治区。

2.2 颗粒物浓度时间变化特征分析

图2为2017年华北地区5个主要省(市、自治区)不同月份颗粒物浓度的变化特征。从图中可以发现各地区颗粒物浓度在一年中大体呈现“U”型变化,即1月份前后月均浓度达到全年的一个峰值,而8月份前后则达到全年的一个最低值。从变化趋势上来看,华北地区1-3月和9-12月的 $PM_{2.5}$ 浓度较高且波动范围较大,而5-8月处于较低浓度状态。造成 $PM_{2.5}$ 浓度较高主要是因为在此阶段温度较低,相对湿度升高,大气层结构较稳定,再加上华北地区正处于采暖期,燃煤排放的污染物增加。将各地区 PM_{10} 月均浓度变化曲线与 $PM_{2.5}$ 月均浓度变化曲线对比发现,3-4月份各地区 PM_{10} 月均浓度都发生了明显的上升,主要是受多次沙尘等不利气象条件影响。为进一步分析,按照气象学划分以及华北地区实际情况,把四季分为冬季(12月至次年2月)、春季(3-5月)、夏季(6-8月)和秋季(9-11月)。季节统计表明,华北地区春季 $PM_{2.5}$ 平均浓度为 $43.38 \mu g/m^3$,夏、秋、冬季分别为 $35.74 \mu g/m^3$ 、 $45.03 \mu g/m^3$ 、 $74.50 \mu g/m^3$ 。 PM_{10} 的变化形式与 $PM_{2.5}$ 类似,春季 PM_{10} 平均浓度为 $96.47 \mu g/m^3$,夏、秋、冬季分别为 $73.56 \mu g/m^3$ 、 $93.64 \mu g/m^3$ 、 $136.47 \mu g/m^3$ 。整体而言华北地区颗粒物浓度呈现冬季>秋季 \approx 春季>夏季,但也存在内蒙古大部分城市 PM_{10} 春季浓度要高于其他季节,这主要有以下几个原因:一是内蒙古春季降水少,大气中的 PM_{10} 不易被清除。二是春季大风频率的增多,将地面扬尘从裸露的地表带入到空气中。三是春季的3-4月还处于暖气供应,导致居民家庭燃煤对 PM_{10} 也有一定贡献。在分析过程中还计算了华北地区各城市 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 月均浓度质量比,发现4-9月(春季和夏季)华北大城市 $PM_{2.5}/PM_{10}$ 小于0.5,说明春秋季节是以粗颗粒物为主,这正好是华北地区沙尘暴频发的季节时段,使得 PM_{10} 的浓度上升成为首要污染物。而其他月份(秋季和冬季)各城市的 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度比值发生缓慢地上升,比值都超过了0.5,这说明秋冬季节的首要污染物为细颗粒物,主要与大量燃煤等人因素有关。

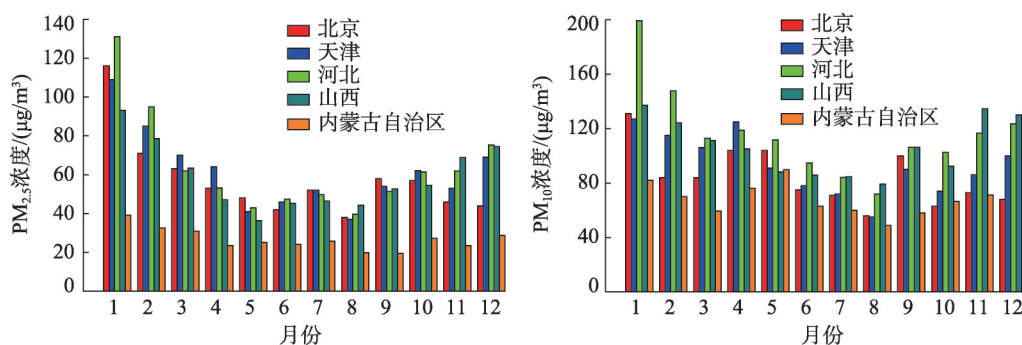


图2 2017年华北地区 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 月均浓度变化

Fig. 2 The average monthly concentration distribution of $PM_{2.5}$ and PM_{10} in North China in 2017

2.3 空间自相关分析

研究利用Moran's I 指数对华北地区各城市2017年颗粒物年均浓度进行全局自相关分析,结果显示 P 值都小于0.01,这说明该空间模型发生随机事件的可能性非常小,而当 P 值小于0.01时, z 得分小于-2.58或大于2.58则说明其具有明显的相关性。由表1可知,

PM_{2.5}和PM₁₀年均浓度具有显著的正相关性。结合 Moran's *I*指数可知, PM_{2.5}和PM₁₀年均浓度在空间分布上具有一定的集聚特性, 即高浓度城市集中在几个相邻城市中, 低浓度也聚集在几个相邻城市中。为了进一步分析, 利用GIS软件的空间统计分析工具可将收集到的大气颗粒物浓度数据结合华北地区各地级市的空间地理信息(距离和毗邻信息)得出大气颗粒物浓度集聚分布特征(图3)。由图3a可知, 高浓度PM_{2.5}主要集中在河北部分城市, 其中以河北南部城市(如保定、石家庄和衡水等)最为显著, 而低浓度地区主要为内蒙古中部和东部部分城市, 剩余城市均未呈现明显的集聚性。观察图3b发现PM₁₀年均浓度分布特征与PM_{2.5}类似, 即浓度高聚集地区集中在河北南部地区(石家庄市、邢台市、邯郸市和衡水市), 低聚集主要还是内蒙古地区。

表1 2017年华北地区颗粒物年均浓度空间自相关分析结果
Table 1 Spatial autocorrelation analysis of annual mean particulate matter concentration in North China in 2017

| 指标 | Moran's <i>I</i> | <i>z</i> 得分 | <i>P</i> 值 |
|-------------------|------------------|-------------|------------|
| PM _{2.5} | 0.36 | 8.32 | 0.00 |
| PM ₁₀ | 0.33 | 7.63 | 0.00 |

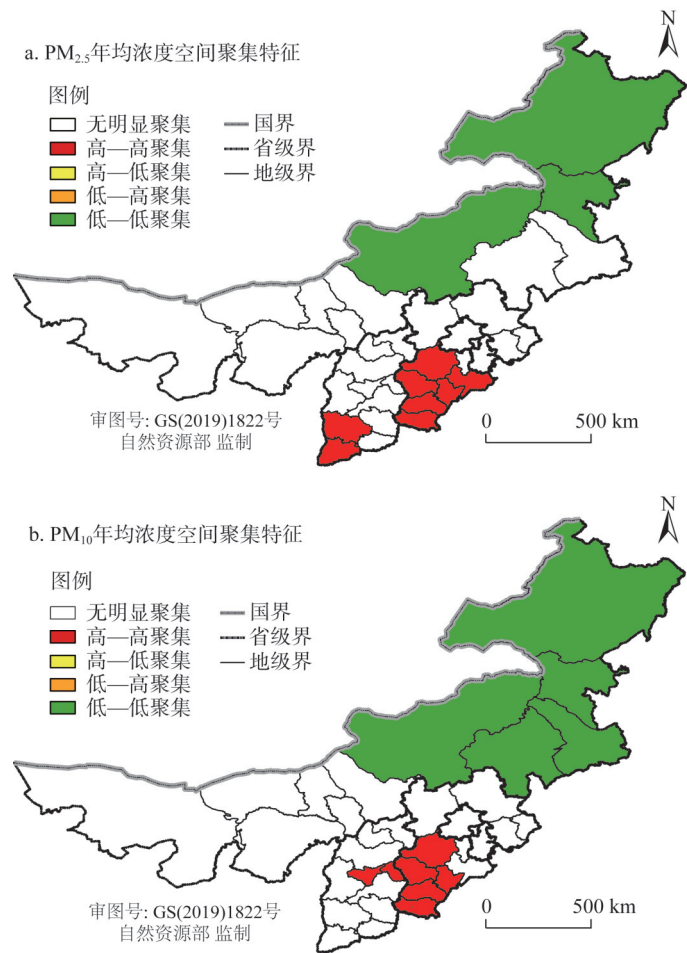


图3 2017年华北地区颗粒物年均浓度空间聚集特征
Fig. 3 Spatial aggregation characteristics of annual average particulate concentration in North China in 2017

2.4 颗粒物空间差异的影响因素分析

已有研究表明，大气颗粒物浓度的变化受多重因素的影响，本文在前人研究的基础上，将影响因素归纳为气象因素（温度、相对湿度、风速、降雨量）、经济发展因素（人均GDP、第二产业占比）、能源因素（煤炭消耗量）、城市化因素（城市化率、机动车保有量、森林覆盖率）四类^[17-21]。通过Moran's *I*分析发现颗粒物浓度存在空间聚集效应，因此运用空间计量模型实证分析各因素对于颗粒物浓度变化的影响。在建模之前，对各因素进行显著性的分析，发现温度和相对湿度这两个变量与其余因素不具有显著性关系，故在普通最小二乘法（OLS）回归模型中删除了温度和相对湿度两个变量，删除变量后模型中的解释变量均具有较好的显著性关系。

表2和表3分别为PM_{2.5}和PM₁₀与各因素拟合的模型结果，模型1代表的是一般线性回归分析，该回归方程模型均显著。PM_{2.5}的OLS模型系数表明，除降雨量和森林覆盖率外，其余影响因素均显著。其中风速、降雨量、人均GDP、城市化率和森林覆盖率对PM_{2.5}浓度具有负效应，而第二产业占比、煤炭消耗量以及机动车保有量均具有正向影响。PM₁₀的OLS模型系数表明，风速、人均GDP和城市化率三个变量对PM₁₀浓度具有显著负影响，而第二产业占比、机动车保有量和煤炭用量对PM₁₀浓度具有正向驱动。

表2 影响2017年华北地区PM_{2.5}浓度差异的因素

Table 2 Factors influencing the difference of PM_{2.5} concentration in North China in 2017

| 变量 | 模型1: OLS | | | 模型2: SLM | | |
|-----------------------|----------|--------------|------------|----------|--------------|------------|
| | <i>B</i> | <i>T</i> 统计量 | <i>P</i> 值 | <i>B</i> | <i>Z</i> 统计量 | <i>P</i> 值 |
| 风速 | -9.08* | -2.31 | 0.03 | -6.45* | -2.11 | 0.04 |
| 降雨量 | -0.06 | -2.02 | 0.05 | -0.05** | -2.63 | 0.01 |
| 人均GDP (ln) | -10.97* | -2.71 | 0.01 | -7.95* | -2.52 | 0.01 |
| 工业产业占比 | 0.61* | 2.49 | 0.02 | 0.47* | 2.54 | 0.01 |
| 城市化率 | -0.29* | -2.72 | 0.03 | -0.06 | -0.60 | 0.49 |
| 森林覆盖率 | -0.21 | -0.89 | 0.38 | -0.18 | -0.99 | 0.32 |
| 机动车保有量 (ln) | 10.29** | 3.16 | 0.00 | 8.20** | 3.24 | 0.00 |
| 煤炭消耗量 (ln) | 9.61* | 2.47 | 0.02 | 8.92** | 2.99 | 0.00 |
| 常数 | 82.90 | 1.88 | 0.07 | 17.03 | 0.47 | 0.64 |
| <i>R</i> ² | | 0.66 | | | 0.85 | |
| Log likelihood | | — | | | -128.97 | |

注：*、**分别表示 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 。

模型2代表的空间回归分析，由于一般线性回归模型并没有考虑各城市之间颗粒物浓度的空间相关性，因此可能存在偏差，所以需要OLS模型进行检验以确定选择何种空间模型，检验结果如表4所示。从表4中可以看出SLM的拉格朗日乘子比SEM的拉格朗日乘子显著，所以模型应该采用SLM进行估计。从拟合结果可以发现，无论是PM_{2.5}还是PM₁₀的模型拟合的决定系数（*R*²）均上升，说明SLM模型要显著优于OLS模型。PM_{2.5}的SLM模型拟合表明：降雨量、汽车保有量和煤炭消耗量三个自变量满足显著性水平（ $\alpha=0.01$ ），风速、人均GDP和第二产业占比三个自变量满足显著性水平（ $\alpha=0.05$ ），而城市化率和森林覆盖率两个变量不显著。在PM₁₀的SLM模型拟合中，仅有森林化率一个变量不显著，其余变量均显著。

从自然因素角度分析看，模型中的风速和降雨量均与PM_{2.5}和PM₁₀浓度呈现显著的负

表3 影响2017年华北地区PM₁₀浓度差异的因素

Table 3 Factors influencing the difference of PM₁₀ concentration in North China in 2017

| 变量 | 模型1: OLS | | | 模型2: SLM | | |
|----------------|----------|-------|------|----------|---------|------|
| | B | T统计量 | P值 | B | Z统计量 | P值 |
| 风速 | -9.89* | -2.26 | 0.03 | -6.06* | -1.95 | 0.03 |
| 降雨量 | -0.07 | -1.95 | 0.06 | -0.08** | -3.12 | 0.00 |
| 人均GDP (ln) | -15.94** | -3.17 | 0.00 | -13.18** | -3.18 | 0.00 |
| 工业产业占比 | 1.07*** | 3.92 | 0.00 | 1.06*** | 4.67 | 0.00 |
| 城市化率 | -0.58* | -2.43 | 0.02 | -0.47* | -2.30 | 0.02 |
| 森林覆盖率 | -0.32 | -0.95 | 0.40 | -0.21 | -1.02 | 0.39 |
| 机动车保有量 (ln) | 8.99* | 2.38 | 0.02 | 8.61** | 2.74 | 0.01 |
| 煤炭消耗量 (ln) | 11.09* | 2.26 | 0.03 | 9.73* | 2.36 | 0.02 |
| 常数 | 15.43 | 0.41 | 0.68 | -55.59 | -1.37 | 0.17 |
| R ² | | 0.68 | | | 0.88 | |
| Log likelihood | | — | | | -141.01 | |

注：*、**、***分别表示P<0.05、P<0.01、P<0.001。

表4 基于OLS回归的拉格朗日乘子检验

Table 4 Lagrange multiplier test based on OLS regression

| 检验 | PM _{2.5} | | PM ₁₀ | |
|---------------|-------------------|------|------------------|------|
| | 统计值 | P值 | 统计值 | P值 |
| 拉格朗日乘子（滞后） | 16.80 | 0.00 | 6.07 | 0.01 |
| 稳健性拉格朗日乘子（滞后） | 17.21 | 0.00 | 9.07 | 0.00 |
| 拉格朗日乘子（误差） | 1.78 | 0.18 | 0.00 | 0.95 |
| 稳健性拉格朗日乘子（误差） | 2.19 | 0.14 | 3.00 | 0.08 |

相关，这与前人的研究结果是一致的^[22]。风速既可以起到输送作用，还具有稀释扩散的作用，从而可以降低大气中颗粒物的浓度。从模型系数大小看，风速每增加1 m/s，PM_{2.5}和PM₁₀颗粒物平均浓度分别降低6.45 μg/m³和6.06 μg/m³，也就是风速对于PM_{2.5}的影响更为显著，这主要与PM_{2.5}自身性质有关，颗粒物粒径越小，越容易受到风速扩散的影响，同时风速的增加，可能将一部分地区地表的灰尘代入大气中，造成二次扬尘，从而可能造成大气中PM₁₀浓度的相对增加。总的来说，风速与地区颗粒物浓度呈现负相关。降雨量对颗粒物浓度的影响一般具有季节性，降雨量越大，空气中PM₁₀和PM_{2.5}浓度越低，这是因为雨水在降落过程中对空气中气溶胶粒子有淋洗冲刷和吸附的作用^[23]。从模型系数大小来看，降水对于PM₁₀的清除作用更为明显。

从经济发展因素角度分析看，模型拟合结果显示华北地区第二产业占比对于大气中PM_{2.5}和PM₁₀具有显著的正向效应，第二产业占比每增加1%，大气中PM_{2.5}和PM₁₀年均浓度值分别增加0.47 μg/m³和1.06 μg/m³。经济的快速很大程度上依托于第二产业的贡献。按照产业分类，第二产业主要是指制造业、采矿业和建筑业等工业产业，这些产业在生产过程中会产生大量的粉尘颗粒物，是大气污染物的重要来源。再加上一大批高耗能的重工业企业，其中以河北省和山西省为主，消耗大量的煤炭，使得颗粒物上升。而人均GDP拟合结果显示，华北地区颗粒物浓度与人均GDP呈现负相关，这与前人研究结果相反^[19]。通常将人均GDP作为一个地区发达程度的重要指标，依据库兹涅茨倒U曲线，当

地区的发达程度超过一定水平后,环境污染与人均GDP之间呈现负相关。目前华北地区的发达程度较高,处于库兹涅茨曲线右侧。一方面是我国经济体量的上升,另一方面是我国环境经济政策所导致的。

从能源因素分析,华北地区煤炭使用量每增加1%对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 的贡献增长分别为 $8.92 \mu g/m^3$ 和 $9.73 \mu g/m^3$,这说明煤炭是造成华北颗粒物浓度较高的主要原因之一。煤炭作为一种不清洁的化石燃料之一,产生同等的热量,要比石油、天然气排放更多的颗粒物、氮氧化物、硫氧化物、重金属等大气污染物。而华北地区煤炭资源丰富,煤炭消耗量占到能源的60%以上,冬季居使用煤炭取暖,使得华北地区冬季大气污染进一步恶化。

从城市化因素角度分析,三个因素中仅有汽车保有量与 $PM_{2.5}$ 浓度呈现显著的正相关,而 PM_{10} 与城市化率和汽车保有量均呈现显著相关性,其中城市化率呈现负相关,这与前人的研究呈现出现相反的趋势^[24]。城市化率的增加,一方面可以减少对于高污染煤炭的使用,调整能源结构的变化,另一方可以带动产业结构的调整,从而降低大气的污染。城市化升高的同时,也会带来一些弊端,造成城市机动车保有量的增加。从模型拟合结果发现,机动车保有量每增加1%,就会使大气中 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 浓度分别上升 $8.20 \mu g/m^3$ 和 $8.61 \mu g/m^3$,这也是大气颗粒物污染的一个重要来源。机动车在行驶过程中会产生大量的尾气,尾气中含有固体悬浮颗粒物、硫氧化物和重金属等多种有害物质,排入到空气中的尾气难以沉降。森林覆盖率与大气颗粒物之前的关系并不显著,但从系数大小来看,森林覆盖率的增加在一定程度上会降低颗粒物浓度。

3 结论

根据以上对2017年华北地区颗粒浓度分布特征及成因分析,得出以下结论:

(1) 华北地区颗粒物浓度大小存在差异。根据颗粒物年均浓度大小,可以发现华北地区各省(市、自治区)污染程度的轻重规律:河北省>山西省>天津市>北京市>内蒙古自治区。从时间分布上看, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 月均浓度在1、2月份前后达到高值,在7、8月份前后达到低值。此外,季节性统计表明, $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 大小基本呈现冬季>秋季~春季>夏季。

(2) 从空间分布上看,华北地区大气颗粒物高高聚集状况主要出现河北南部城市(如保定、石家庄和衡水等),而低低聚集现象主要集中在内蒙古地区。同时还发现华北地区颗粒物浓度呈现显著的南北差异,相比于京津冀地区,内蒙古地区的空气质量较好。

(3) 空间计量模型表明,华北地区颗粒物浓度受到自然因素、社会经济因素、城市化等因素的综合影响,其中风速、降雨量和人均GDP对 $PM_{2.5}$ 和 PM_{10} 年均浓度均具有显著的负向影响;而第二产业占比、煤炭使用量和机动车保有量均对颗粒物浓度有正向影响,其中煤炭消耗量的影响最大,其次是机动车保有量。因此,要推进清洁能源来降低煤炭在能源的使用比例,适当限制机动车数量快速增长,加快区域城市产业结构升级和技术创新来调整产业结构,加快城市化率等手段来解决华北地区颗粒物污染。

参考文献(References):

- [1] 殷永文,程金平,段玉森,等.上海市霾期间 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 污染与呼吸科、儿呼吸科门诊人数的相关分析.环境科学,2011,32(7): 1894-1898. [YIN Y W, CHENG J P, DUAN Y S, et al. Analysis of the correlation between $PM_{2.5}$ and PM_{10} pollution and the number of outpatients in respiratory and pediatric respiratory departments during haze in Shanghai. En-

- vironmental Science, 2011, 32(7): 1894-1898.]
- [2] MYRNA M T, DICK J J. Spatial and temporal variation in endotoxin and PM_{10} concentrations in ambient air in alive-stock dense area. *Environment Research*, 2017, 153(12): 161-170.
- [3] 杨帆, 周亮, 林蔚, 等. 2001—2010年非洲大气 $PM_{2.5}$ 污染浓度空间格局演化. *世界地理研究*, 2016, 25(3): 30-39. [YANG F, ZHOU L, LIN W, et al. Evolution of spatial pattern of $PM_{2.5}$ pollution concentration in Africa from 2001 to 2010. *World Regional Studies*, 2016, 25(3): 30-39.]
- [4] 杨冕, 王银. 长江经济带 $PM_{2.5}$ 时空特征及影响因素研究. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(1): 91-100. [YANG M, WANG Y. Spatio-temporal characteristics and influencing factors of $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Zone. *China Population, Resources and Environment*, 2017, 27(1): 91-100.]
- [5] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $PM_{2.5}$ 浓度的影响. *生态学报*, 2016, 36(16): 5049-5057. [ZHANG S P, HAN L J, ZHOU W Q, et al. The effect of urban scale on the concentration of NO_2 and $PM_{2.5}$ in the atmosphere. *Acta Ecologica Sinica*, 2016, 36(16): 5049-5057.]
- [6] 成亚利, 王波. 上海市 $PM_{2.5}$ 的时空分布特征及污染评估. *计算机与应用化学*, 2014, 31(10): 1189-1192. [CHENG Y L, WANG B. Spatial and temporal distribution characteristics and pollution assessment of $PM_{2.5}$ in Shanghai. *Computers and Applied Chemistry*, 2014, 31(10): 1189-1192.]
- [7] 岳玓利, 谢敏, 周炎. 环境空气质量新标准对珠三角区域站空气质量评价的影响. *中国环境监测*, 2013, 29(5): 38-42. [YUE J L, XIE M, ZHOU Y. Impact of the new environmental air quality standards on air quality assessment at the Pearl River Delta Regional Station. *Environmental Monitoring in China*, 2013, 29(5): 38-42.]
- [8] LU D, XU J, YANG D, et al. Spatio-temporal variation and influence factors of $PM_{2.5}$ concentrations in China from 1998 to 2014. *Atmospheric Pollution Research*, 2017, 8(6): 1151-1159.
- [9] 程龙, 季冕, 耿天召. 合肥市颗粒物时空分布特征及其气象成因研究. *中国环境管理干部学院学报*, 2017, 27(5): 11-15. [CHENG L, JI M, GENG T Z. Spatial-temporal distribution characteristics of particulate matter and its meteorological causes in Hefei. *Journal of Environmental Management College of China*, 2017, 27(5): 11-15.]
- [10] GETIS A. Spatial autocorrelation and spatial association by the use of distance statistics. *Geographical Analysis*, 1992, 24: 93-116.
- [11] 王永, 沈毅. 空间自相关方法及其主要应用现状. *中国卫生统计*, 2008, 25(4): 443-445. [WANG Y, SHEN Y. Spatial autocorrelation methods and their main applications. *Chinese Journal of Health Statistics*, 2008, 25(4): 443-445.]
- [12] 胡安俊, 孙久文. 空间计量: 模型、方法与趋势. *世界经济文汇*, 2014, (6): 111-120. [HU A J, SUN J W. Spatial econometrics: Models, methods and trends. *World Economic Papers*, 2014, (6): 111-120.]
- [13] ANSELIN L. Local indicators of spatial association (LISA). *Geographical Analysis*, 1995, 27: 93-115.
- [14] HJ 633-2012, 环境空气质量指数(AQI)技术规定. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SCSD000006260743&DbName=SCSD>, 2012-02-29. [HJ 633-2012, Technical regulation on ambient air quality index. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/detail.aspx?FileName=SCSD000006260743&DbName=SCSD>, 2012-02-29.]
- [15] 马敏劲, 杨秀梅, 丁凡. 中国南北方大气污染的时空分布特征. *环境科学与技术*, 2018, 41(5): 187-197. [MA M J, YANG X M, DING F. Spatial and temporal distribution characteristics of air pollution in North and South China. *Environmental Science & Technology*, 2018, 41(5): 187-197.]
- [16] 王立平, 陈俊. 中国雾霾污染的社会经济影响因素: 基于空间面板数据EBA模型实证研究. *环境科学学报*, 2016, 36(10): 3833-3839. [WANG L P, CHEN J. Socio-economic influencing factors of haze pollution in China: Empirical study of EBA Model based on spatial panel data. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(10): 3833-3839.]
- [17] 康恒元, 刘玉莲, 李涛. 黑龙江省重点城市AQI指数特征及其与气象要素之关系. *自然资源学报*, 2017, 32(4): 692-703. [KANG H Y, LIU Y L, LI T. AQI index characteristics of key cities in Heilongjiang province and its relationship with meteorological factors. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32(4): 692-703.]
- [18] WANG J H, OGAWA S. Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentrations in Nagasaki, Japan. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2015, 12(8): 9089-9101.
- [19] SUN Z, ZHAN D S, JIN F J. Spatio-temporal characteristics and geographical determinants of air quality in cities at the prefecture level and above in China. *Chinese Geographical Science*, 2019, 29(2): 316-324.
- [20] 南国卫, 孙虎, 朱一梅. 陕西省 $PM_{2.5}$ 时空分布规律及其影响因素. *环境科学研究*, 2018, 31(5): 834-843. [NAN G W, SUN H, ZHU Y M. Spatial and temporal distribution of $PM_{2.5}$ in Shaanxi province and its influencing factors. *Research of Environmental Sciences*, 2018, 31(5): 834-843.]
- [21] 徐成龙, 程钰. 新常态下山东省环境规制对工业结构调整及其大气环境效应研究. *自然资源学报*, 2016, 31(10): 1662-1674. [XU C L, CHENG Y. Study on industrial structure adjustment and atmospheric environment effect of environ-

- mental regulation in Shandong province under the new normal. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(10): 1662-1674.]
- [22] 马格, 田国行, 李永华, 等. 郑州市气象因子对大气颗粒物浓度的影响研究. *气象与环境科学*, 2018, 41(3): 29-38. [MA G, TIAN G X, LI Y H, et al. Study on the influence of meteorological factors on atmospheric particulate matter concentration in Zhengzhou. *Meteorological and Environmental Sciences*, 2018, 41(3): 29-38.]
- [23] 于彩霞, 邓学良, 石春娥, 等. 降水和风对大气PM_{2.5}、PM₁₀的清除作用分析. *环境科学学报*, 2018, 38(12): 4620-4629. [YU C X, DENG X L, SHI C Y, et al. Analysis of the removal of PM_{2.5} and PM₁₀ by precipitation and wind. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, 38(12): 4620-4629.]
- [24] 苏良缘, 沈然. 京津冀区域城市化程度与颗粒物污染的相关性研究. *北京城市学院学报*, 2015, (2): 7-12. [SU L Y, SHEN R. Study on the correlation between urbanization degree and particulate matter pollution in Beijing, Tianjin and Hebei. *Journal of Beijing City University*, 2015, (2): 7-12.]

Spatial and temporal distribution characteristics and factors of particulate matter concentration in North China

ZHAN Jian-yi¹, HUANG Guan-chao², ZHOU Hua³, DUAN Wen-song²,
WU An-an², WANG Wen-jie², LI Ting²

(1. Zhejiang College of Construction, Hangzhou 311231, China; 2. School of Environmental Science and Engineering, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China; 3. School of Geography and Tourism, Anhui Normal University, Wuhu 241000, Anhui, China)

Abstract: Based on the data of air quality concentration of cities in North China in 2017, the spatial and temporal distribution characteristics of particle concentration in this region are studied. On this basis, the spatial autocorrelation analysis method is used to quantitatively describe the spatial aggregation characteristics of particle concentration in the region, and the spatial measurement model is used to analyze the particle concentration affected cities in North China. The results show that: on the whole, the average frequency of PM_{2.5} and PM₁₀ pollution is 17.25% and 14.23% respectively in the study area. In terms of temporal distribution, there is a "U"-shaped change in the monthly average concentration of particulate matter in all provinces and cities, the average concentration has obvious seasonal changes, showing a pattern of winter > autumn ≈ spring > summer. In terms of spatial distribution, the annual average concentration of particulate matter in different prefecture-level cities has obvious aggregation characteristics. The high concentration mainly occurs in the south of Hebei province, while the low concentration mainly appears in Inner Mongolia. The spatial econometric model shows that wind speed, rainfall and GDP per capita have a significant negative impact on the average annual concentration of PM_{2.5} and PM₁₀ of cities in North China, while the proportion of secondary industry, coal use and the number of vehicles have a positive impact on the concentration of particulate matter, among which coal consumption has the largest impact, followed by the number of vehicles. The above results can provide scientific basis for formulating policies for air pollution control in North China.

Keywords: North China; particulate matter concentration; spatial and temporal distribution; spatial autocorrelation; spatial econometric model