

京津冀地区 PM_{2.5} 的时空效应研究*

温佳薇¹ 贺军亮² 赵 晴² 孔露露² 马晓倩³ 赵旭阳^{2*}

(1. 河北师范大学资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050024;

2. 石家庄学院资源与环境科学学院, 河北 石家庄 050035;

3. 河北省科学院地理科学研究所, 河北 石家庄 050000)

摘要 PM_{2.5} 污染已成为当前经济发展中亟待解决的难题。从年、季、日变化及周末效应 4 个时间尺度和空间自相关分析研究了京津冀地区 PM_{2.5} 的时空效应, 并构建空间回归模型量化分析相关社会经济因素对 PM_{2.5} 的影响。结果显示: (1) 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 污染整体呈下降趋势, 但污染程度依然很高, 基本都没有达到《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 二级标准 (35 μg/m³)。四季的达标天数夏季>春季>秋季>冬季。中南部的石家庄、保定、衡水、邢台、邯郸为 PM_{2.5} 浓度高值区, 日变化曲线为单峰型, 受工业企业生产排放的影响较大; 北部的张家口、承德、秦皇岛为 PM_{2.5} 浓度低值区, 中东部的天津、北京、沧州、唐山、廊坊为 PM_{2.5} 浓度中值区, 日变化曲线均为双峰型, 受机动车尾气排放的影响较大。石家庄、北京的周末效应表现为白天 PM_{2.5} 浓度工作日高于周末, 晚上周末高于工作日。(2) 京津冀地区 PM_{2.5} 存在显著的空间正相关性, 2013—2016 年石家庄、衡水、邢台、邯郸始终表现出高-高集聚特征, 张家口、承德、秦皇岛始终保持低-低集聚特征。汽车尾气排放是京津冀地区 PM_{2.5} 污染的重要影响因素, 而能源消耗的影响不显著。

关键词 京津冀地区 PM_{2.5} 时空效应 空间自相关

DOI: 10.15985/j.cnki.1001-3865.2018.09.016

Study on time-space effects of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region WEN Jiawei¹, HE Junliang², ZHAO Qing², KONG Lulu², MA Xiaoli³, ZHAO Xuyang². (1. College of Resources and Environmental Sciences, Hebei Normal University, Shijiazhuang Hebei 050024; 2. College of Resources and Environmental Sciences, Shijiazhuang University, Shijiazhuang Hebei 050035; 3. Institute of Geographical Sciences, Hebei Academy of Sciences, Shijiazhuang Hebei 050000)

Abstract: PM_{2.5} pollution has become an urgent problem to be solved in the process of economic development. Time effects were analyzed from 4 scales of annual, seasonal, diurnal variations and weekend effects in Beijing-Tianjin-Hebei region. Space effects were analyzed using spatial autocorrelation analysis. Besides, a spatial regression model was constructed to quantify the impact of socio-economic factors on PM_{2.5}. Results showed that PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region generally went down from 2013 to 2016. However, almost all the cities exceeded the second grade (35 μg/m³) of "Ambient air quality standards" (GB 3095-2012). Standard days in 4 seasons were summer>spring>autumn>winter. PM_{2.5} high area with single peak a day located in the south and centre including Shijiazhuang, Baoding, Hengshui, Xingtai and Handan, mainly affected by industrial companies emission. PM_{2.5} medium area located in the east and centre including Tianjin, Beijing, Cangzhou, Tangshan and Langfang while PM_{2.5} low area in the north including Zhangjiakou, Chengde and Qinghuangdao. Both PM_{2.5} medium area and PM_{2.5} low area were mainly affected by vehicle exhaust emission with double peaks a day. Weekend effects in Shijiazhuang and Beijing showed that daytime PM_{2.5} concentrations was higher in workdays than in weekends, but night opposite. PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei region had obvious spatial positive relationship from 2013 to 2016, Shijiazhuang, Hengshui, Xingtai and Handan always high-high assembling, and Zhangjiakou, Chengde and Qinghuangdao always low-low assembling. Vehicle exhaust emission had significant effect on PM_{2.5} pollution in the Beijing-Tianjin-Hebei region while energy consuming not.

Keywords: Beijing-Tianjin-Hebei region; PM_{2.5}; time-space effects; spatial autocorrelation

PM_{2.5} 是雾霾形成的主要元凶。近年来, 我国持续性雾霾天气逐渐增多, 尤其是京津冀地区。根据

2013—2015 年的“中国环境状况公报”, 空气质量综合指数排名最差的 10 个城市中有 7 个属于京津冀

第一作者: 温佳薇, 女, 1993 年生, 硕士研究生, 主要从事区域可持续发展研究。* 通讯作者。

* 河北省自然科学基金资助项目 (No. 2016106013)。

地区。PM_{2.5}携带的有毒有害物质对人体健康造成威胁^[1]。因此,自2013年国家开始发布PM_{2.5}监测数据以来,PM_{2.5}的研究引起了各个领域学者的广泛关注。

目前,PM_{2.5}相关研究最集中的主要有两个方面:(1)不同时空尺度PM_{2.5}分布特征及其变化规律,包括全国^[2-3]、典型城市^[4-5]、城市群^[6-7]等空间尺度的年际变化、季节差异等,对于重大节事活动期间的PM_{2.5}变化特征也有专门分析^[8-9]。(2)PM_{2.5}的影响因素,包括自然环境因素和社会经济因素。在自然环境因素方面,有学者将PM_{2.5}与主要气象要素进行相关性分析,得出风速、相对湿度、降水、气温、气压等,都会对PM_{2.5}浓度变化产生影响^[10];此外,特殊天气过程如局地环流^[11]、沙尘^[12]等也会对PM_{2.5}浓度产生影响。在社会经济因素方面,学者们已探讨了PM_{2.5}与经济发展之间是否符合环境库兹涅茨曲线^[13-14],PM_{2.5}与社会经济要素的空间关系^[15]¹⁰⁵⁴,机动车排放^[16]²⁰¹²、煤炭消耗^[17]、城市人口规模^[18]、产业结构^[19]等对PM_{2.5}的影响机制,等等。社会经济因素的影响越来越显著,特别是能源消耗和机动车尾气排放。

本研究分析了京津冀地区PM_{2.5}的时间效应和空间效应,重点分析了空间汽车密度和能源消耗结构两个社会经济因素对京津冀地区PM_{2.5}的影响。

1 数据与方法

1.1 数据来源

研究的时空尺度为北京、天津和河北11个地级市,共13个城市。PM_{2.5}年均值数据来源于原环境保护部公布的2013—2016年“中国环境质量公报”;各城市达标天数及PM_{2.5}小时均值数据来源于中国环境监测总站,时间段为2016年3月至2017年2月,按3至5月春季、6至8月夏季、9至11月秋季、12至次年2月冬季划分4季。

本研究以煤炭消耗量占能源消耗总量比例代表能源消耗结构,民用汽车拥有量与城市土地面积的比值代表空间汽车密度。煤炭消耗量、能源消耗总量、民用汽车拥有量和城市土地面积来源于13个城市的2016年“统计年鉴”。

1.2 研究方法

1.2.1 空间自相关分析

全局空间自相关是从整体上判断京津冀地区PM_{2.5}的空间分布特征及是否存在空间聚集性,采用

全局莫兰指数来衡量,计算公式如下:

$$I = \frac{\sum_i \sum_j w_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{S^2 \sum_i \sum_j w_{ij}} \quad (i \neq j) \quad (1)$$

式中: I 为全局莫兰指数; x_i 、 x_j 为城市 i 和城市 j 的PM_{2.5}质量浓度,μg/m³; $\bar{x}$ 为所有城市的PM_{2.5}质量浓度平均值,μg/m³; S 为所有城市的PM_{2.5}质量浓度标准差,μg/m³; w_{ij} 为城市 i 和城市 j 间的空间权重,当城市 i 和城市 j 相互邻接时取1,否则取0。 I 的取值在 $[-1, 1]$ 内, $I > 0$ 表示空间分布上表现出集聚特征,且越接近于1,总体空间差异越小; $I < 0$ 表示空间分布表现出离散特征,且越接近-1,总体空间差异越大; $I = 0$ 时表示空间上表现出随机分布特征。

局域空间自相关用来考察是否存在PM_{2.5}高值或低值的局域空间集聚以及对于全局空间自相关的贡献大小,一般采用局域莫兰指数来衡量,计算公式如下:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_j w_{ij} (x_j - \bar{x}) \quad (i \neq j) \quad (2)$$

式中: I_i 为城市 i 的局域莫兰指数。

1.2.2 空间回归模型分析

选取2015年的数据进行影响因素分析,通过构建空间回归模型分析空间汽车密度和能源消耗结构对京津冀地区PM_{2.5}的影响。空间回归模型是在传统的计量模型基础上考虑空间效应建立的模型,有空间滞后模型(SLM)和空间误差模型(SEM)两种^[15]¹⁰⁵³。采用最小二乘法(OLS)对两种模型进行估计,通过比较拉格朗日乘数和稳健拉格朗日乘数来选择模型。ANSELIN等^[20]提出的判别准则如下:若只有SLM的拉格朗日乘数(LM(lag))或SEM的拉格朗日乘数(LM(error))通过显著性检验,则直接选择通过显著性检验的模型;若两者均通过检验则继续考察SLM的稳健拉格朗日乘数(R-LM(lag))和SEM的稳健拉格朗日乘数(R-LM(error)),若只有R-LM(lag)或R-LM(error)显著,则选择通过显著性检验的模型,若两者均显著,则选择显著性更高的模型,若两者均不显著则需要重新设定模型。

SLM表达式为:

$$\ln x_i = \rho w_{ij} \ln x_i + \alpha_0 + \alpha_1 \ln y_i + \alpha_2 \ln z_i + \epsilon \quad (3)$$

式中: y_i 为城市 i 的空间汽车密度, 辆/km²; z_i 为城市 i 的能源消耗结构, %; $\rho, \alpha_0, \alpha_1, \alpha_2, \epsilon$ 均为待定参数。

SEM 表达式为:

$$\ln x_i = \beta_0 + \beta_1 \ln y_i + \beta_2 \ln z_i + \lambda w_{ij} \mu + \epsilon \quad (4)$$

式中: $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \lambda, \mu$ 均为待定参数。

2 结果与分析

2.1 京津冀地区 PM_{2.5} 的时间效应

2.1.1 年度变化特征

从图 1 可以看出, 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度整体呈下降趋势。分析原因, 是由于自

2013 年实施《大气污染防治行动计划》以来, 京津冀地区工业企业的废气中主要污染物排放量逐年减少。但是, 只有张家口基本达到《环境空气质量标准》(GB 3095—2012) 的二级标准 (35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$), 其余城市 PM_{2.5} 污染依然严重。其中, 石家庄出现了 PM_{2.5} 质量浓度 2016 年比 2015 年上升 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, 承德出现了 2014 年比 2013 年上升 3 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的情况。根据 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 浓度年度变化特征, 以区域统筹为原则, 结合《河北省重污染天气应急预案》的污染控制分区^[21], 将京津冀地区划分为 3 个区域: 北部, 包括张家口、承德、秦皇岛, 为 PM_{2.5}

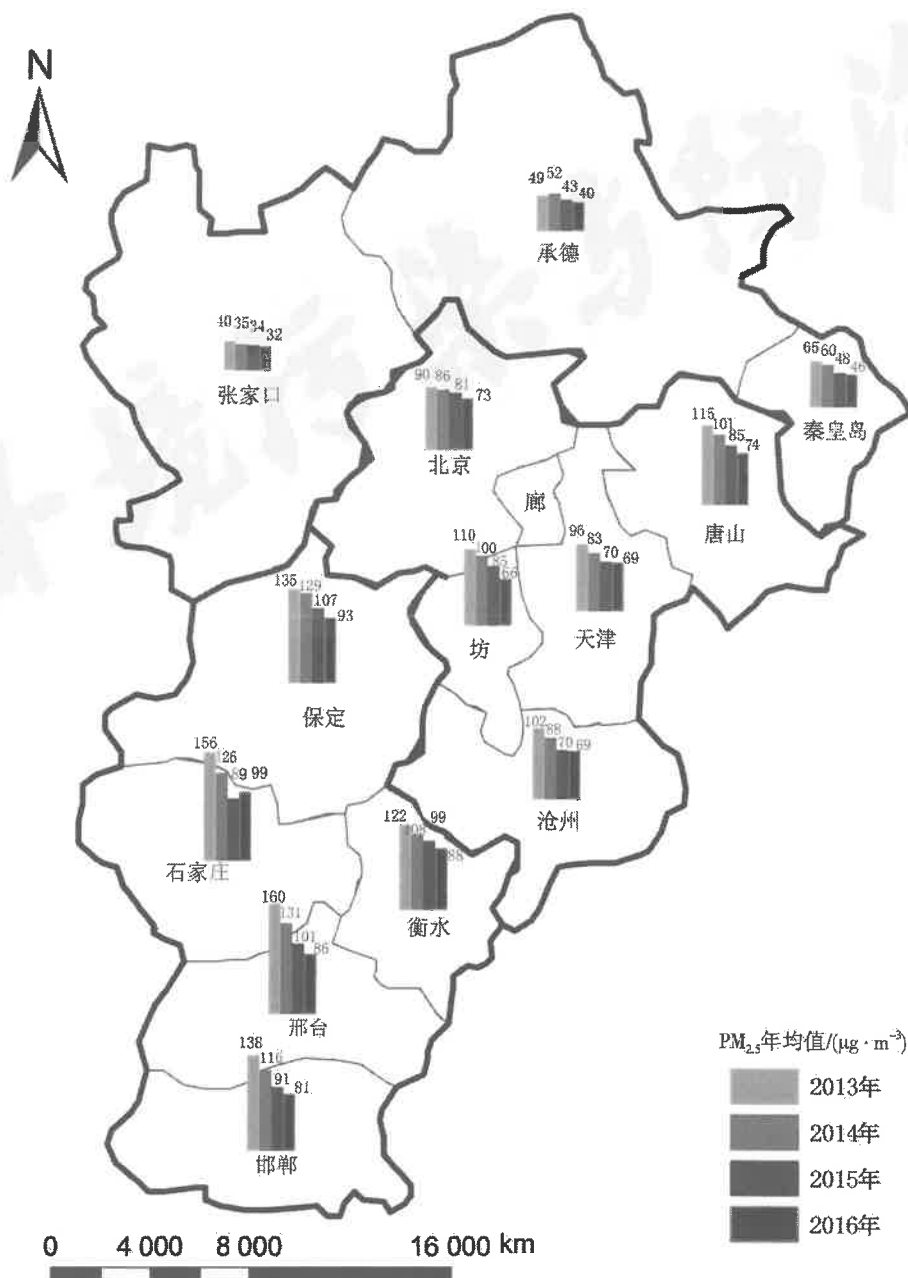


图 1 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 年度变化特征

Fig.1 The annual variation of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region from 2013 to 2016

浓度低值区;中东部,包括天津、北京、沧州、唐山、廊坊,为 $PM_{2.5}$ 浓度中值区;中南部,包括石家庄、保定、衡水、邢台、邯郸,为 $PM_{2.5}$ 浓度高值区。

2.1.2 季节变化特征

统计3个区域四季 $PM_{2.5}$ 达到 GB 3095—2012 二级标准的达标天数,结果如图2所示。四季的达标天数表现出明显的季节变化特征,达标天数夏季>春季>秋季>冬季。分析原因是由于冬季,气温低,风速小,近地面大气层处于稳定状态,逆温强度大,不利于污染物扩散,加重了 $PM_{2.5}$ 的污染^[22],同时冬季京津冀地区燃煤取暖也会加重 $PM_{2.5}$ 污染;秋季,大雾天气频率较高,大气层结构稳定,风速较小,也不利于 $PM_{2.5}$ 等污染物的迁移、扩散^[23-24];春季,日照时数增多,热力作用加强,有效破坏了地面逆温层结,大气的垂直扩散能力加强,有利于污染物的迁移和扩散^[25];夏季,降水及较强的热力作用促使大气边界层升高,使夏季大气污染物扩散、沉降条件非常好,污染程度最轻。

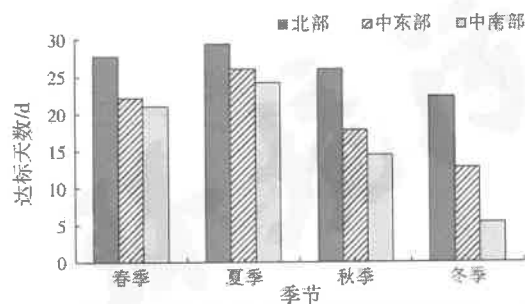


图2 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 四季达标天数
Fig.2 $PM_{2.5}$ standard days of Beijing-Tianjin-Hebei region for 4 seasons

2.1.3 日变化特征及周末效应

(1) 日变化特征

基于京津冀地区北部、中东部、中南部3个区域各城市的 $PM_{2.5}$ 全年小时均值数据分析日变化特征,如图3所示。中南部 $PM_{2.5}$ 日变化曲线为单峰型,峰值出现在1:00,谷值出现在15:00;北部和中东部 $PM_{2.5}$ 日变化曲线均为双峰型,峰值都出现在

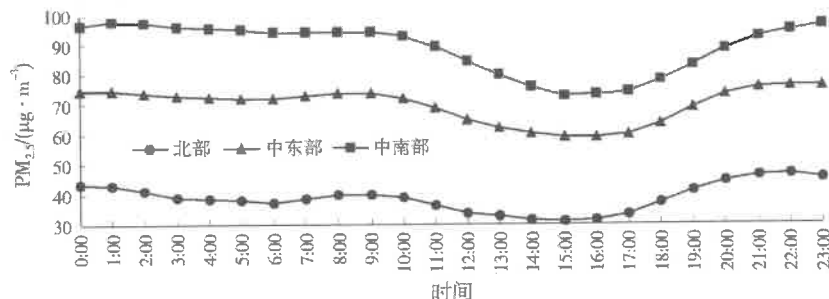


图3 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 日变化特征
Fig.3 The diurnal variation of $PM_{2.5}$ in Beijing-Tianjin-Hebei region

9:00和22:00,谷值出现在5:00~6:00和15:00~16:00。中东部和北部在9:00出现峰值,是由于此时段为交通早高峰期,机动车尾气排放量增多,而且机动车行驶扰动路面积尘形成道路扬尘^[26-28];午后,大气层对流增强,机动车尾气排放量减少, $PM_{2.5}$ 浓度处于下降状态;傍晚之后,交通晚高峰期导致 $PM_{2.5}$ 排放量又增多,而且夜间行驶的车辆又多为污染物排量大的柴油车^[16]^[20],加上工业电价在午夜前后进入收费低谷阶段,京津冀地区很多企业会选择这段时间加大生产^[29],3者叠加导致22:00又出现峰值。中南部 $PM_{2.5}$ 本底较高, $PM_{2.5}$ 的来源主要是工业企业生产排放,特别是工业电价收费低谷阶段,而机动车排放的影响很小,因此中南部 $PM_{2.5}$ 日变化曲线为单峰型,且夜间峰值推迟到了1:00。

(2) 周末效应

周末效应是指污染物浓度在周末和工作日有显著差异^[30-31]。雷瑜等^[32]、沈利娟等^[33]研究证实 $PM_{2.5}$ 具有周末效应, $PM_{2.5}$ 浓度周末低于工作日。因此,对京津冀地区 $PM_{2.5}$ 是否具有周末效应进行探究,由于数据量较多,仅以北京、石家庄为例进行研究。

从图4可以看出,石家庄和北京 $PM_{2.5}$ 浓度具有周末效应,表现出白天 $PM_{2.5}$ 浓度工作日高于周末,晚上周末高于工作日,石家庄交通早高峰周末(10:00)相对于工作日(8:00)推迟了2 h,这可能是人们周末与工作日活动时间不同导致的。

2.2 京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的空间效应

2.2.1 全局空间自相关

利用 OpenGeoDa 软件计算2013—2016年京津冀地区 $PM_{2.5}$ 全局莫兰指数。表1结果显示,全局莫兰指数均为正值且均通过了伴随概率为0.05的显著性检验,说明京津冀地区 $PM_{2.5}$ 存在着显著的空间正相关性。2013—2016年,全局莫兰指数除2016年有回升外基本呈现出小幅下降的趋势,这意味着京津冀地区 $PM_{2.5}$ 的集聚效应有减弱的趋势。

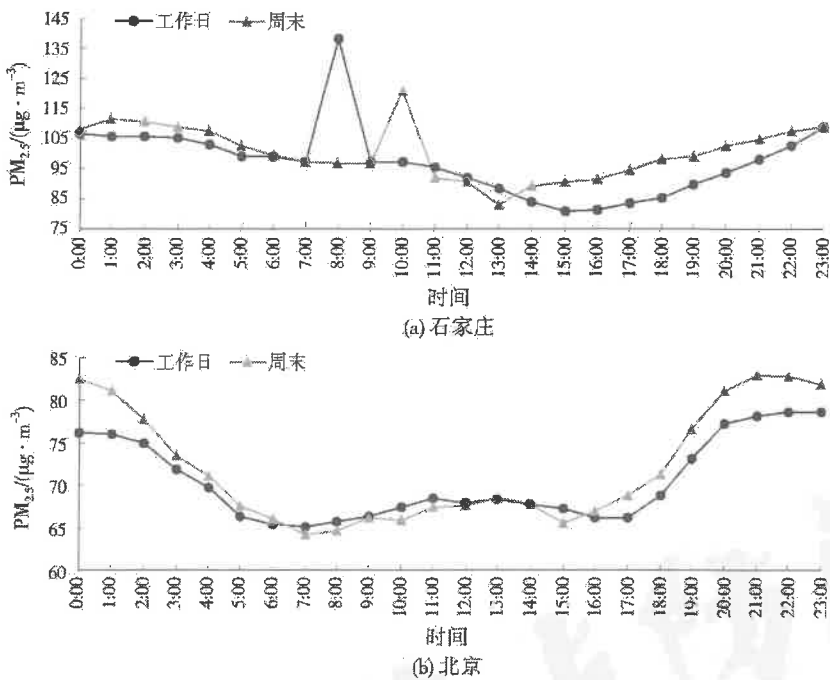


图 4 石家庄和北京的周末效应
Fig.4 Weekend effects of Shijiazhuang and Beijing

表 1 京津冀地区 PM_{2.5} 全局莫兰指数
Table 1 Global Moran Index of PM_{2.5} in Beijing-Tianjin-Hebei region

年份	全局莫兰指数	检验值	伴随概率
2013	0.328 0	3.200 6	0.003
2014	0.413 4	2.696 7	0.007
2015	0.301 1	2.059 1	0.023
2016	0.397 2	2.561 6	0.008

2.2.2 局域空间自相关

运用 OpenGeoDa 软件绘制 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 局域莫兰指数的莫兰散点图,对每个城市的象限分布统计结果如表 2 所示。绝大多数城市位于第一、三象限,表明京津冀地区各城市间 PM_{2.5} 存在空间正相关性,与全局空间自相关分析一致;位于第二、四象限的城市只有 4~5 个,表明这些城市空间差异程度较大。总体而言,2013—2016 年,各城市象限分布基本保持稳定:中南部的石家庄、衡水、邢台、邯郸始终位于第一象限,表现出高-高集聚特征;沧州始终位于第二象限,呈现低-高集聚特征;北部的张家口、承德、秦皇岛始终位于第三象限,保持低-低集聚特征;唐山始终位于第四象限,

为高-低集聚特征。

运用 OpenGeoDa 软件对 2013—2016 年京津冀地区 PM_{2.5} 局域莫兰指数统计量进行显著性检验(显著性水平大于 0.05),并制得局域 LISA 集聚图,如图 5 所示。高-高集聚类型主要分布在石家庄、衡水和邢台,表现出很强的空间联动性,且溢出效应明显,这 3 个城市钢铁、建材石化、电力等高污染、高能耗行业集中,产业结构、能源结构不合理,机动车保有量大,污染物排放巨大,加上地理条件不利于污染物扩散,因此污染严重;低-低集聚类型只有承德,空间结构比较稳定,因为承德海拔高,风力大,大气污染物容易扩散,而且人口密度小,经济活动、工厂分布相对零散;高-低集聚类型主要在唐山,这是因为唐山自身工业发达,排污量大,但其对周围城市的影响并不显著。

2.2.3 空间效应的影响因素

运用 stata 软件进行相关性分析,PM_{2.5} 与空间汽车密度的相关系数为 0.532 3、PM_{2.5} 与能源消耗结构的相关系数为 0.103 7、能源消耗结构与空间汽

表 2 各城市莫兰散点图象限分布
Table 2 Quadrant distribution of the cities in Moran scatter diagram

年份	第一象限	第二象限	第三象限	第四象限
2013	石家庄、衡水、邢台、邯郸	沧州	张家口、承德、北京、天津、秦皇岛	保定、廊坊、唐山
2014	廊坊、石家庄、衡水、邢台、邯郸	天津、沧州	张家口、承德、北京、秦皇岛	保定、唐山
2015	廊坊、石家庄、衡水、邢台、邯郸	天津、沧州	张家口、承德、秦皇岛	北京、保定、唐山
2016	保定、石家庄、衡水、邢台、邯郸	廊坊、沧州	张家口、承德、秦皇岛	北京、天津、唐山

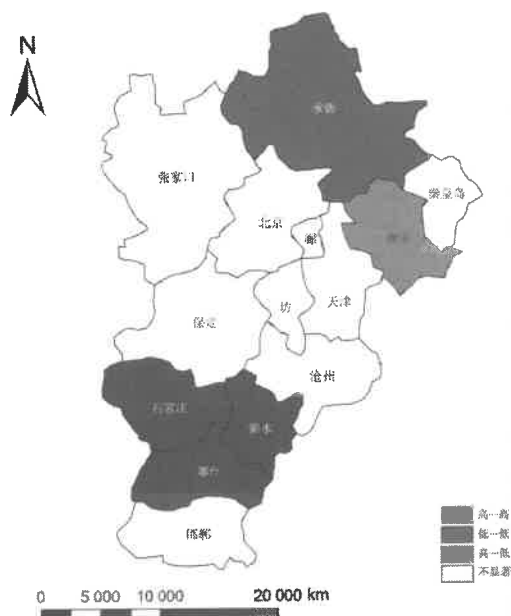


图5 各城市LISA集聚图

Fig.5 LISA cluster diagram of the cities

车密度的相关系数为-0.353 1,相关性均小于0.8,且方差膨胀因子表明,模型不存在多重共线性问题。利用OpenGeoDa软件进行OLS估计发现,LM(lag)与LM(error)均通过显著性检验,继续考察R-LM(lag)与R-LM(error),发现也均显著但R-LM(lag)更显著,因此采用SLM,待定系数计算结果见表3。空间汽车密度与PM_{2.5}在0.05显著性水平下显著正相关,表明汽车尾气排放是导致京津冀地区PM_{2.5}污染的重要影响因素,应加大对汽车尾气的治理,而且应加强京津冀地区区域合作,一体化发展。能源消耗对PM_{2.5}的影响不显著,说明京津冀地区煤炭使用对雾霾的影响并不是最主要的。

表3 空间回归模型结果¹⁾

Table 3 Results of spatial regression model

项目	系数值	Z
α_1	0.220	2.519
α_2	0.116	0.633
相关系数	0.473	

注:¹⁾Z为显著性检验值,在95%的置信水平下,|Z| > 1.96,表示显著相关。

3 结论

(1) 2013—2016年京津冀地区PM_{2.5}污染整体呈下降趋势,但污染程度依然很高,基本都没有达到GB 3095—2012二级标准(35 μg/m³)。四季的达标天数夏季>春季>秋季>冬季。中南部的石家庄、保定、衡水、邢台、邯郸为PM_{2.5}浓度高值区,日变化曲线为单峰型,受工业企业生产排放的影响较大;北部的张家口、承德、秦皇岛为PM_{2.5}浓度低值区,中东部的天津、北京、沧州、唐山、廊坊为PM_{2.5}浓度中

值区,日变化曲线均为双峰型,受机动车尾气排放的影响较大。石家庄、北京的周末效应表现为白天PM_{2.5}浓度工作日高于周末,晚上周末高于工作日。

(2) 京津冀地区PM_{2.5}存在显著的空间正相关性,2013—2016年石家庄、衡水、邢台、邯郸始终表现出高-高集聚特征,张家口、承德、秦皇岛始终保持低-低集聚特征。汽车尾气排放是京津冀地区PM_{2.5}污染的重要影响因素,而能源消耗的影响不显著。

参考文献:

- [1] 曲晓黎,付桂琴,贾俊妹,等.2005—2009年石家庄市空气质量分布特征及其与气象条件的关系[J].气象与环境学报,2011,27(3):29-32.
- [2] FANG C L, WANG Z B, XU G. Spatial-temporal characteristics of PM_{2.5} in China: a city-level perspective analysis[J]. Journal of Geographical Sciences, 2016, 26(11): 1519-1532.
- [3] 熊欢欢,梁龙武,曾赠,等.中国城市PM_{2.5}时空分布的动态比较分析[J].资源科学,2017,39(1):136-146.
- [4] 王占山,李云婷,陈添,等.2013年北京市PM_{2.5}的时空分布[J].地理学报,2015,70(1):110-120.
- [5] 鹿利燕,暴谢盛.太原市PM_{2.5}和PM₁₀质量浓度的变化特征[J].环境与可持续发展,2017,42(1):58-61.
- [6] 马晓倩,刘征,赵旭阳,等.京津冀雾霾时空分布特征及其相关性研究[J].地域研究与开发,2016,35(2):134-138.
- [7] 毛婉柳,徐建华,卢德彬,等.2015年长三角地区城市PM_{2.5}时空格局及影响因素分析[J].长江流域资源与环境,2017,26(2):264-272.
- [8] 晶晶亮,余洪,罗伟伟,等.长株潭城市群PM_{2.5}污染的节假日效应[J].生态与农村环境学报,2016,32(5):724-728.
- [9] 李佳乐,吴立新,任传斌,等. APEC区域减排对北京PM_{2.5}浓度时空变化的影响分析[J].地理与地理信息科学,2016,32(3):110-115.
- [10] 周一敏,赵昕奕.北京地区PM_{2.5}浓度与气象要素的相关分析[J].北京大学学报(自然科学版),2017,53(1):111-124.
- [11] 杨洋.局地环流对京津冀地区大气污染影响研究[D].南京:南京信息工程大学,2014.
- [12] 徐文帅,张大伟,李云婷,等.北京两次沙尘污染过程中PM_{2.5}浓度变化特征[J].气候与环境研究,2016,21(1):78-86.
- [13] DONG S C, LI F, LI Z H, et al. The Environment Kuznets Curve and spatial pattern of environment-economy in China: evidence from a panel cointegration test[J]. Journal of Resources and Ecology, 2010, 1(2): 169-176.
- [14] 何枫,马栋栋,祝丽云.中国雾霾污染的环境库兹涅茨曲线研究——基于2001—2012年中国30个省市面板数据的分析[J].软科学,2016,30(4):37-40.
- [15] 杨昆,杨玉莲,朱彦辉,等.中国PM_{2.5}污染与社会经济的空间关系及成因[J].地理研究,2016,35(6):.
- [16] 欧阳,赵文吉,郑晓霞,等.机动车排放对PM_{2.5}空间分布的影响研究[J].生态环境学报,2015,24(12):.
- [17] 余江,张凤青.煤炭消费对中国PM_{2.5}污染影响的实证分析[J].生态经济,2016,32(7):163-167.
- [18] 张淑平,韩立建,周伟奇,等.城市规模对大气污染物NO₂和PM_{2.5}浓度的影响[J].生态学报,2016,36(16):5049-5057.

(下转第1043页)