

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2021.04.007

华北平原地区 PM_{2.5} 浓度时空变化特征及其影响因素研究

宋方旭¹, 孙希华¹, 王欣瑶¹, 徐发昭²

(1. 山东师范大学 地理与环境学院, 山东 济南 250358;

2. 西北师范大学 地理与环境科学学院, 甘肃 兰州 730070)

摘要: 为揭示华北平原地区 PM_{2.5} 污染的总体情况, 并为华北平原地区大气污染防治提供有效依据, 采用标准差椭圆和局部空间自相关等方法, 运用 2000—2018 年华北平原地区 PM_{2.5} 浓度遥感反演数据, 分析华北平原 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征, 并使用地理探测器对其浓度变化的影响因素进行研究。结果表明: ①华北平原地区的 PM_{2.5} 浓度分布在时间上呈现出先增加后减少的趋势, 在空间上呈现出先扩散后收缩的趋势; ②PM_{2.5} 污染在空间上集中分布于河南、河北南部和山东西部, 形成了一整片的高污染区域, 并且向外围地区逐渐减弱; ③降水、人口密度、风速、规模以上工业企业个数及人均公园绿地面积对 PM_{2.5} 浓度的影响程度较大, 且各因子之间存在相互增强的交互作用。

关键词: PM_{2.5} 浓度; 时空变化; 地理探测器; 华北平原

中图分类号: X513

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2021)04-0507-10

Spatio-temporal variation characteristics of PM_{2.5} concentration and its influencing factors in North China Plain area

SONG Fangxu¹, SUN Xihua¹, WANG Xinyao¹, XU Fazhao²

(1. College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250358, China;

2. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: In order to reveal the overall situation of PM_{2.5} pollution in the North China Plain and provide an effective basis for the prevention and control of atmospheric environmental pollution in the North China Plain, the standard deviation ellipse and local spatial autocorrelation methods are used to analyze the spatio-temporal variation characteristics of PM_{2.5} concentration in the North China Plain by using the remote sensing inversion data of PM_{2.5} concentration in the North China Plain from 2000 to 2018, with the influencing factors of its concentration change studied by using geographic detector. The results show that: ①the distribution of PM_{2.5} concentration in North China Plain shows a trend of first increasing and then decreasing in time, and a trend of first diffusion and then the contraction in space; ②PM_{2.5} pollution is spatially concentrated in Henan, southern Hebei and western Shandong, forming a whole high pollution area and gradually weakening to the peripheral areas; ③precipitation, population density, wind speed, number of industrial enterprises above the designated size and per capita park green space area have a great impact on PM_{2.5} concentration, with mutually reinforcing interactions being among various factors.

Key words: PM_{2.5} concentration; spatio-temporal variation; geographic detector; North China Plain

收稿日期: 2021-01-19; 网络出版日期: 2021-07-19

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1294.N.20210719.1510.002.html>

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41871121)

第一作者: 宋方旭, 男, 硕士生, 研究方向为 GIS 应用与环境可持续发展。E-mail: 1019907536@qq.com

通信作者: 孙希华, 男, 硕士, 教授, 硕导, 研究方向为 GIS 应用与水土保持。E-mail: 471572553@qq.com

改革开放以来,我国经济总量快速增长,但初期粗放的发展模式势必会造成严重的环境污染问题,其中大气污染尤为突出^[1]。随着 2018 年《打赢蓝天保卫战三年行动计划》的实施,我国的大气污染状况有所好转,但仍面临许多挑战^[2],而大气 PM_{2.5} 的污染防治问题就是其重要内容之一。PM_{2.5} 作为主要的致癌物质之一,会严重影响人们的身体健康^[3],甚至影响社会的整体运转^[4]。因此,分析大气 PM_{2.5} 的污染浓度空间格局演化特征对促进城市可持续发展和加强大气污染治理具有重要意义。

目前,国内外学者采用不同的方法,在不同视角和不同尺度上对 PM_{2.5} 进行了研究。在研究尺度上,不同的学者在全球^[5,6]、国家^[7-9]、城市群^[10,11]、单个城市^[12,13] 等尺度上进行了研究;在研究视角上,有关 PM_{2.5} 的研究涉及时空变化特征^[14,15]、影响因素^[16-18]、化学成分^[19,20]、健康风险^[21,22]、扩散与输送^[23,24]、浓度反演^[25,26] 等方面;在研究方法上,标准差椭圆、空间自相关、局部空间自相关、地理探测器、变异函数法、正交经验分解法等是研究 PM_{2.5} 时空变化特征的常用方法。本研究将综合各方法的优缺点,选用标准差椭圆和局部空间自相关来分析 PM_{2.5} 的时空

变化,并使用地理探测器分析其浓度影响因素。

尽管有关 PM_{2.5} 的研究已经十分丰富,但大部分研究都是以不连续的地面站点数据作为基础数据,这便导致其数据精度易受站点地理位置及空间插值的影响。此外,针对人口、城市高密度聚集和工业发达的华北平原地区的研究较少,并且缺乏长时间序列的研究。因此,本研究拟运用遥感反演的 PM_{2.5} 数据,对华北平原地区 2000—2018 年的 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征进行研究。

1 研究区域与数据源

1.1 研究区域

华北平原是中国第二大平原,位于黄河下游区域,西起太行山脉和豫西山,东至黄海、渤海和山东丘陵,北起燕山山脉,西南至桐柏山和大别山,东南至苏、皖北部,与长江中下游平原相连,跨越黄河、海河、淮河等流域,属于温带季风气候,四季变化明显。华北平原是中国人口、城市聚集和工农业较为发达的地区,也是中国 PM_{2.5} 污染较为严重的区域。本研究以华北平原涉及的北京市、天津市、山东省、河北省、河南省、安徽省、江苏省作为研究区域,如图 1 所示。

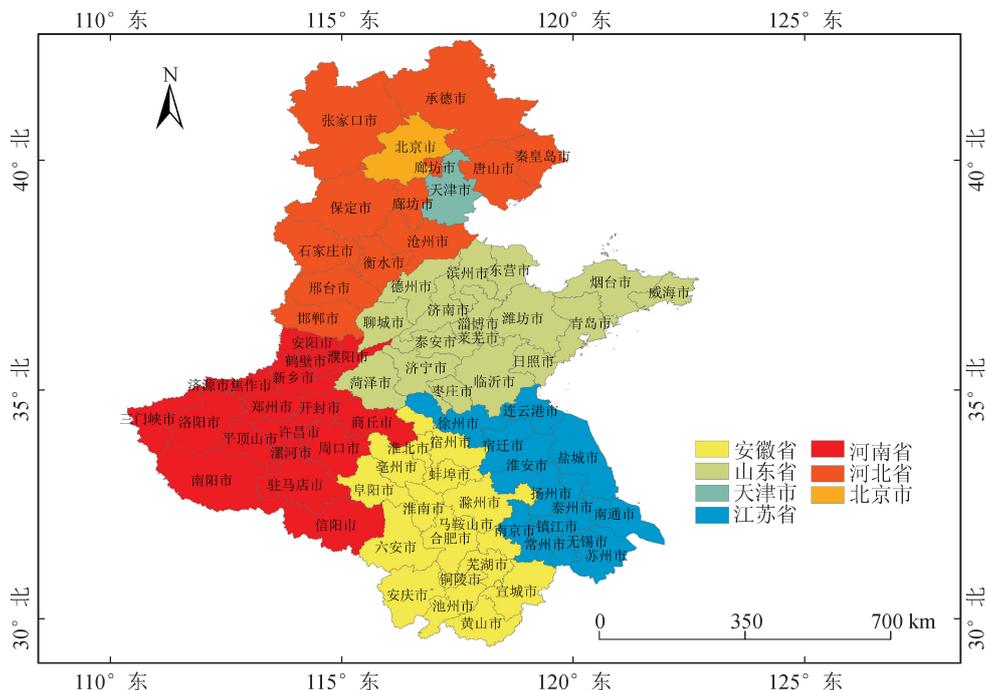


图 1 研究区域概况

Fig. 1 Overview of the study area

1.2 数据源

本研究以华北平原地区的两市、五省作为研究对象,研究时段为 2000—2018 年,从中截取 2000 年、2006 年、2012 年、2018 年四个时间断面进行详细分析。研究使用的 PM_{2.5} 数据来自加拿大达尔豪斯大

学大气成分分析小组(Atmospheric Composition Analysis Group)提供的 2000—2018 年大气 PM_{2.5} 遥感反演数据集(V4. CH. 03),该数据集是以 0.01°×0.01° 的栅格数据为基准,在获得每个栅格的 PM_{2.5} 年均浓度数值后,再采用 ArcGIS 软件中的分区统计功

能获得每个城市的 PM_{2.5} 年均浓度值。

本研究的影响因素分为自然因素和社会经济因素两类。自然因素包括温度(°C)、降水(mm)、风速(knots),均采用平均值,数据来自中国气象数据网提供的华北平原 54 个气象站点 2000—2018 年的逐日气象观测资料。社会经济因素主要选择人均 GDP(元/人)、人口密度(人/km²)、人均公园绿地面积(m²/人)、公共交通(辆)、城市建成区面积(km²)、工业用电(万 kW·h)、规模以上工业企业数量。以上数据均来自 CEIC 数据库和《中国城市统计年鉴》,并以各地市的统计年鉴对部分缺失数据进行了插补。

2 研究方法

2.1 标准差椭圆

标准差椭圆(standard deviation ellipse, SDE),是分析空间要素分布方向性特征的经典方法之一^[27]。该方法可获得椭圆的长短半轴长度、方位角、椭圆面积和中心位置等参数。椭圆空间分布范围表示要素(本文为 PM_{2.5} 浓度)在空间分布的主体区域,中心表示其分布的重心位置,长半轴表示其在主趋势方向的分布特征,短半轴则表示其分布的离散化程度^[28]。长半轴越长,表示其方向性分布越明显;短半轴越长,说明其离散化程度越明显。由于该公式较为复杂,此处不再赘述,详情参见文献^[27]、^[28]。

2.2 局部空间自相关

本文采用局部空间自相关进行空间自相关分析,局部空间自相关(local indicators of spatial association, LISA)指数可以反映某一区域单元的属性值与其周围单元同一属性的相关程度^[29],可以识别变量的空间聚类和异常值情况。其聚集类型共有四类:HH(高高聚集)、LL(低低聚集)、HL(高低聚集)和 LH(低高聚集)。常用的局部空间分析指标是莫兰指数^[30],用以度量某空间单元的观测值与其相邻区域观测值之间的空间相关程度,并识别其空间聚集类型。公式如下:

$$I = Z_i \sum_{j=1}^n w_{ij} Z_j \quad (1)$$

式中: n 为研究区包含空间单元(本文为地级市)的数量; Z_i 与 Z_j 分别表示空间单元 i 与 j 的 PM_{2.5} 年均浓度的标准化值; w_{ij} 为空间权重系数,若空间单元 i 与 j 存在空间邻近关系,则 $w_{ij}=1$,否则 $w_{ij}=0$ 。

2.3 地理探测器

地理探测器是探测空间分异性并揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法^[31],其基本思想是:

假设研究区分为若干子区域,如果子区域的方差之和小于区域总方差,则存在空间分异性;如果两变量的空间分布趋于一致,则两者存在统计关联性。地理探测器共有四个子探测器,本文仅对因子探测器和交互探测器的结果进行分析。

因子探测器:探索 Y 的空间分异性,并探测因子 X 对 Y 空间分异的解释程度^[31]。用 q 值度量,其表达式为:

$$q = 1 - \frac{\sum_{h=1}^L N_h \sigma_h^2}{N \sigma^2} \quad (2)$$

式中: $h=1,2,3,\dots,L$ 为变量 Y 或因子 X 的分层,本文中变量分为五类; N_h 和 N 分别为层 h 和全区的单元数,本文中分别表示华北平原全地区单元数和每类中地级市的单元数; σ_h^2 和 σ^2 分别是层 h 和全区的 Y 值的方差。

交互探测器:用来判断不同影响因子之间的相互作用。两个自变量之间交互作用的类型分为非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强。

3 PM_{2.5} 时空演变分析

3.1 PM_{2.5} 基本变化特征

为研究华北平原地区 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征,根据世界卫生组织和中国《环境空气质量标准》(GB 3095—2012)的 PM_{2.5} 浓度限值,将华北平原地区的 PM_{2.5} 年均浓度重新分为六类。最终获得华北平原地区 2000 年、2006 年、2012 年、2018 年的 PM_{2.5} 浓度分布图,如图 2 所示。

由图 2 可知,2000 年,华北平原地区各城市的 PM_{2.5} 浓度均未超过 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,PM_{2.5} 浓度低于 35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的区域主要集中于山东半岛(青岛市、威海市和日照市等)、河北省北部(张家口市、承德市、保定市及秦皇岛市等)、北京市、江苏省东部(盐城市、泰州市、南通市),而河南省(三门峡市、洛阳市、济源市除外)、安徽省中北部(合肥市、亳州市、宿州市等)及山东西部(枣庄市、菏泽市、聊城市等)等地区 PM_{2.5} 浓度均超过 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,形成了一整片的高污染区域。随着经济快速发展,2006 年,华北平原地区污染程度明显加重,华北平原各地市的 PM_{2.5} 浓度均有不同程度的上升。由于河南省、河北省和山东省人口密集、能源需求量大,经济发展更迅猛,故污染情况也更加严重。河南省中北部地区、河北省南部地区及山东省西部地区 PM_{2.5} 浓度均超过了 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,形成了严重污染区域,而 PM_{2.5} 浓度小于

35 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的地区仅剩河北的张家口市、承德市及山东的威海市。随着国家对环境污染的不断重视,到2012年,华北平原地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染程度开始有所下降。2012年, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在 50~75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的城市仍有48个,但其中10个城市的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度相对于2006年是下降的; $\text{PM}_{2.5}$ 浓度超过 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ 的城市主要集中于山东西部、河南北部及河北南部,与2006年相比,城市数量减少了33%。可见,2012年

华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况虽仍然严重,但已有所改善。在2014年《大气污染防治行动计划》和2018年《蓝天保卫战三年行动计划》等一系列大气污染防治措施实施后,华北平原地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染得到了有效治理。2018年,整个华北平原地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均小于 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,而河北省的张家口市和承德市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度甚至低于 15 $\mu\text{g}/\text{m}^3$,但河南省大片地区依旧是连片的高污染区域。

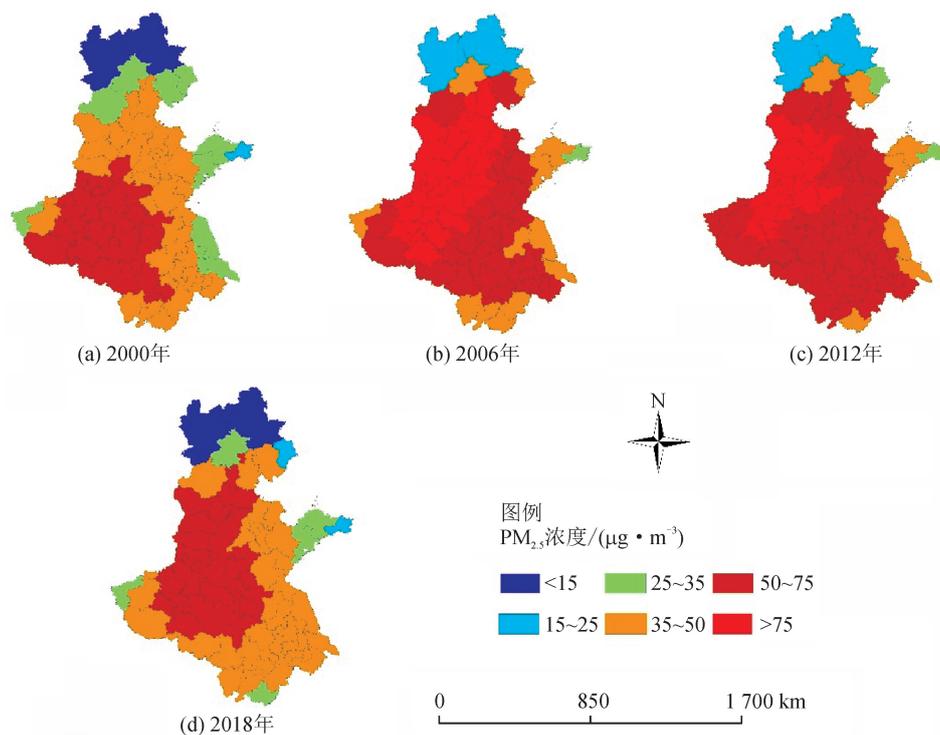


图2 2000—2018年华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度分布特征

Fig. 2 Distribution characteristics of $\text{PM}_{2.5}$ annual average concentration in North China Plain from 2000 to 2018

综上,在空间分布上,华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染较为严重的区域主要集中分布于人口密集和经济较发达的河南省、河北省南部及山东省西部, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度整体上呈现出西高东低、中部高南北低的空间分布特征;在时间分布上,华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染状况呈现出先快速加重后逐渐改善的特征,这主要是由于人们的思想观念由初期的经济优先发展逐步转

变为可持续发展,且国家对大气污染治理越发重视所致。

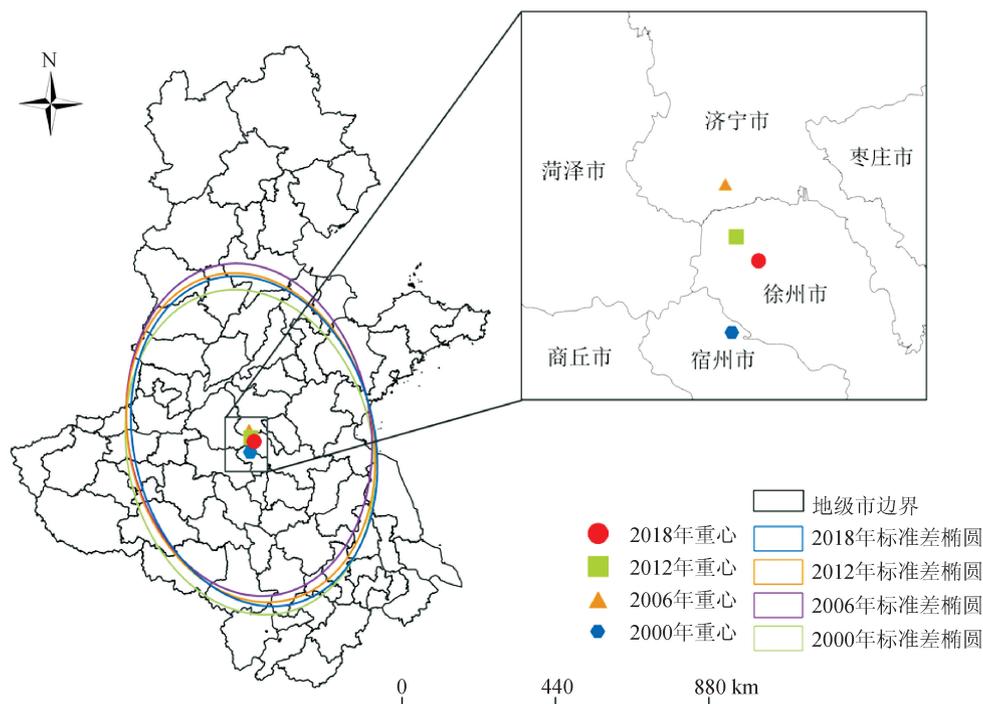
3.2 标准差椭圆分析

基于标准差椭圆对2000年、2006年、2012年、2018年的 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度进行分析,解释华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度时空分布的空间形态、中心性、方向性及延展性,详细信息如表1和图3所示。

表1 2000—2018年华北平原地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度标准差椭圆参数

Tab. 1 Elliptic parameters of standard deviation of $\text{PM}_{2.5}$ average annual concentration in North China Plain from 2000 to 2018

年份	2000	2006	2012	2018
方位角/ $^{\circ}$	167.24	170.37	166.95	166.13
中心坐标	116.52 $^{\circ}$ E, 34.47 $^{\circ}$ N	116.49 $^{\circ}$ E, 34.94 $^{\circ}$ N	116.53 $^{\circ}$ E, 34.78 $^{\circ}$ N	116.62 $^{\circ}$ E, 34.70 $^{\circ}$ N
中心所在城市	宿州市	济宁市	徐州市	徐州市
长半轴长度/km	465.46	474.56	472.08	474.39
短半轴长度/km	351.53	348.69	350.27	344.94
椭圆面积/ km^2	514 013	519 884	519 460	514 132

图3 2000—2018年华北平原地区PM_{2.5}年均浓度标准差椭圆分析Fig. 3 Ellipse analysis of standard deviation of PM_{2.5} average annual concentration in North China Plain from 2000 to 2018

从方位角及长短半轴长度来看,华北平原地区PM_{2.5}浓度分布呈现出明显的“西北-东南”方向分布格局。椭圆方位角由2000年的167.24°波动减少到2018年的166.13°,说明其PM_{2.5}浓度空间分布格局正在向“正北-正南”方向缓慢偏移;2000—2018年,长半轴长度由465.46 km波动增长至474.39 km,说明华北平原地区PM_{2.5}年均浓度在主方向上呈现出扩张态势,而短半轴长度则先由2000年的351.53 km缩短为2006年的348.69 km,2012年又增加到350.27 km,随后2018年又缩短至344.94 km,呈现“缩短-增加-再缩短”的变化过程。由此可知,2000—2018年,华北平原地区PM_{2.5}浓度在地理空间上呈现出“聚集-扩散-聚集”的演变过程。

从标准差椭圆面积来看,椭圆面积先由2000年的51.40万km²增加至2006年的51.99万km²,后又略微减少至2012年的51.95万km²,最终减少至2018年的51.41万km²,体现了华北平原地区PM_{2.5}污染范围先扩大后减小的过程;从标准差椭圆的覆盖范围来看,其范围主要包括河南省东部及北部、山东省西部、河北省南部、江苏省及安徽省北部的部分地区,这些地区均是PM_{2.5}污染较为严重的区域,也是未来PM_{2.5}污染防治的主要对象。

从重心转移情况来看,华北平原地区PM_{2.5}浓度重心由2000年安徽省宿州市向北转移至2006年

山东省济宁市境内,在2012年又向南转移至江苏省徐州市,随后PM_{2.5}浓度重心便保持在江苏省徐州市境内。徐州市能源富集,是江苏省唯一的煤炭产地,作为典型的资源型及老工业城市,产业结构不合理和初期粗放的经济发展模式是其PM_{2.5}污染严重的主要原因。

3.3 局部空间自相关分析

本研究采用莫兰指数的局部空间自相关分析,分别得到2000年、2006年、2012年、2018年华北平原地区PM_{2.5}年均浓度的聚集情况,如图4所示。

由图4可知,分析结果未出现HL(高低)和LH(低高)的聚集现象,说明PM_{2.5}浓度分布具有明显的分异性。2000年,华北平原地区HH(高高)聚集区域主要分布在河南省境内及其周边城市(山东菏泽市、江苏阜阳市),而LL(低低)聚集区域主要分布在华北平原地区北部和东部的部分沿海城市(山东青岛、江苏盐城等);2006年,HH聚集区域明显向北移动,河南省南部城市污染状况减弱,而河北省南部及山东省西部的部分城市成为新的HH聚集区域,LL聚集区域分布位置基本不变,且在安徽省南部形成了一个新的LL聚集区域;2012年,位于HH聚集区域的城市较2006年减少了3个,HH聚集区域处于收缩状态,而华北地区北部的北京市、秦皇岛市重新加入了LL聚集区域;与2012年相比,2018

年 HH 聚集区域的城市数目不变,但河南部分地区退出了 HH 聚集区域(郑州、焦作、安阳市等),而河南省东部、安徽省部分城市(宿州、淮北、亳州市)及

江苏省徐州市加入了 HH 聚集区域,HH 聚集区域向华北平原地区的中心位置移动。

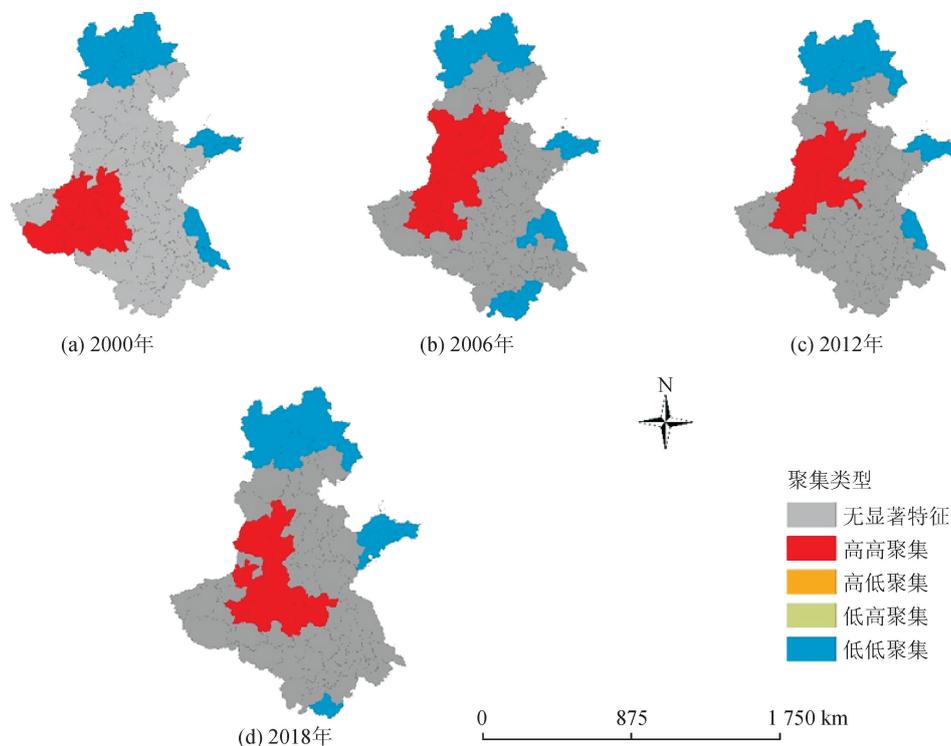


图 4 2000—2018 年华北平原地区 $PM_{2.5}$ 年均浓度局部空间自相关分析结果
Fig. 4 Local spatial autocorrelation analysis of $PM_{2.5}$ annual average concentration in North China Plain from 2000 to 2018

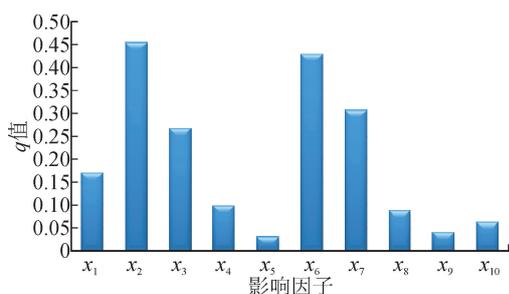
总之,华北平原地区的 HH 聚集区域主要分布于河南省、河北省南部、山东省西部的平原地带,因为平原地带是人口高度聚集及工业发达的区域,这些地区经济发展速度普遍较快,能源与资源消耗量大、消耗速度快,故污染物排放量较多,而平原地区地势开阔,没有山脉阻挡,所以 $PM_{2.5}$ 的区域传输较为容易,易形成连片的污染区域,导致 $PM_{2.5}$ 污染问题较难治理;而 LL 聚集区域主要分布于东部沿海城市及华北平原北部,其分布主要受空间地理位置的影响,东部 LL 聚集区域的形成主要是由于海风的扩散作用及海水的吸附作用,北部 LL 聚集区域的形成则主要是由于北部山谷的狭管效应及南部太行山脉阻挡了 $PM_{2.5}$ 由南向北的传播路径,并且为了推动京津冀协同发展,张家口市和承德市牺牲了重工业的发展,转而发展其旅游业,所以其本身的 $PM_{2.5}$ 排放量较少^[32]。 $PM_{2.5}$ 浓度分布的异质性说明,华北平原地区的大气污染具有区域性,因此,在制定 $PM_{2.5}$ 污染防治措施时,河南、河北及山东三省应该统筹兼顾、联防联控,因地制宜地制定统筹防治措施,周边城市应在完善自身 $PM_{2.5}$ 防治措施的基础上,防范由中心污染区域带来的污染传输扩散危害。

3.4 华北平原地区 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素分析

本研究以华北平原地区 77 个地级市行政区为研究单元,以 2018 年为时间断面;考虑的自然和社会经济因素共 10 个,分别为温度(x_1)、降水(x_2)、风速(x_3)、人均 GDP(x_4)、公共交通(x_5)、人口密度(x_6)、人均公园绿地面积(x_7)、城市建成区面积(x_8)、工业用电(x_9)、规模以上工业企业数量(x_{10})。由于地理探测器处理的数据为离散化数据,因此在 GeoDa 软件中采用 K-means 聚类方法将各因子离散化并分为 5 类,将聚类后的数据导入地理探测器中进行分析。

3.4.1 因子探测结果

地理探测器中,因子探测器的结果是以 q 值来体现, q 值越高,说明该因子对其因变量的影响程度越大。由因子探测器结果图 5 可知,各因子的 q 值由大到小依次为降水(0.45)、人口密度(0.42)、人均公园绿地面积(0.30)、风速(0.26)、温度(0.16)、人均 GDP(0.09)、城市建成区面积(0.08)、规模以上工业企业数量(0.06)、工业用电(0.04)、公共交通(0.03),其中降水、人口密度、人均公园绿地面积及风速对 $PM_{2.5}$ 浓度的解释力较大。

图5 PM_{2.5}浓度影响因子的 q 值Fig. 5 q values of each influencing factor of PM_{2.5} concentration

从自然影响因子来看,温度、降水、风速的 q 值均大于 0.15,故其对华北平原地区的 PM_{2.5} 浓度影响较大。PM_{2.5} 作为一种大气污染物,必然受到各种气象因素的影响^[33]。温度通过对大气环流产生影响,间接地对大气中 PM_{2.5} 的分布产生影响;降水对 PM_{2.5} 等大气污染物具有一定的清除作用,在降雨过程中,大气中的 PM_{2.5} 被大气水成物清除并降落到地面;风在 PM_{2.5} 扩散、传输的过程中起到了重要作用,风向和风速影响着 PM_{2.5} 的传输方向和速度,对 PM_{2.5} 的分布具有直接影响。

从社会经济影响因子来看,人口密度和人均公园绿地面积对 PM_{2.5} 的浓度有较大的解释力,而其他因子的影响程度较小,公共交通和工业用电的 q

值甚至小于 0.05。人口密度与 PM_{2.5} 浓度有较高的相关性,该结果与李衡^[34]、李光勤^[35] 等人的研究结论相符。人类在满足自身需求时,必然会对环境造成污染,人口密度越高,人类对物质生活的需求就越大,进而给周边环境造成的压力也就越大,最终可能导致严重的环境污染。同时,人均公园绿地面积对 PM_{2.5} 浓度的解释力也较大。人均公园绿地面积代表城市内的植被覆盖情况。植物可以覆盖地表,减少 PM_{2.5} 的来源,植物叶面可以吸附并捕获 PM_{2.5},起到滞尘作用,此外,高大的树木还可以降低风速,促进 PM_{2.5} 的沉降。综上,植物对大气中的 PM_{2.5} 浓度具有一定的消减作用。

3.4.2 交互探测结果

由交互探测器探测各因子的交互结果,如表 2 所示。探测结果表明,华北平原地区 PM_{2.5} 浓度的影响因子之间的交互作用均为增强,任何两种影响因子交互作用的 q 值均大于原本的单一因子的 q 值。其中,人均 GDP 和人口密度交互作用后的 q 值达到了 0.75,对 PM_{2.5} 浓度的影响程度最大,而温度和降水交互作用后的 q 值为 0.69,远大于温度因子的 q 值 0.16;此外,相较于其他影响因子的交互作用,城市建成区面积与规模以上工业企业数量交互作用的 q 值最小,仅为 0.15。

表2 PM_{2.5}浓度影响因子的交互探测结果Tab. 2 Interactive detection results of PM_{2.5} concentration influence factors

因子	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6	x_7	x_8	x_9	x_{10}
x_1	0.169 22									
x_2	0.686 70	0.454 70								
x_3	0.420 09	0.579 99	0.266 70							
x_4	0.269 88	0.687 13	0.443 00	0.098 64						
x_5	0.266 11	0.487 75	0.355 20	0.176 44	0.031 60					
x_6	0.594 73	0.643 88	0.595 26	0.753 31	0.603 21	0.428 41				
x_7	0.489 07	0.543 98	0.383 22	0.484 23	0.406 00	0.668 76	0.306 49			
x_8	0.271 44	0.592 35	0.469 23	0.274 55	0.181 61	0.663 19	0.486 34	0.087 83		
x_9	0.262 62	0.505 34	0.319 29	0.234 18	0.180 90	0.543 98	0.402 41	0.212 30	0.040 86	
x_{10}	0.244 24	0.582 63	0.489 85	0.235 84	0.149 85	0.572 68	0.401 07	0.148 95	0.192 86	0.062 46

4 结论与讨论

4.1 结论

1) 由 PM_{2.5} 浓度的时空分布格局及演化趋势可知,华北平原地区的 PM_{2.5} 浓度在 2000—2006 年间迅速增加,2012 年后得到有效控制,到 2018 年,

PM_{2.5} 浓度基本恢复到 2000 年的状态。

2) 由标准差椭圆分析结果可知,PM_{2.5} 浓度的分布方向为“西北-东南”,并且正朝着“正北-正南”方向移动;PM_{2.5} 浓度的重心先向北方移动后又南移,并最终稳定在徐州境内;由椭圆面积可知,PM_{2.5} 浓度的影响范围是先增加后减少。

3) 由局部空间自相关分析结果可知,PM_{2.5} 大气污染的分布具有明显的地域性。HH 聚集区域主要分布在山东、河南、河北三省的交界部分,而 LL 聚集区域主要分布于东部沿海地区及华北平原北部。

4) 由因子探测结果可知,降水、人口密度、人均公园绿地面积、风速 4 个因子对 PM_{2.5} 浓度的解释力(q 值)较大;由交互探测结果可知,影响因子之间的交互作用均为增强。

4.2 建议

目前,我国大气污染尤其是 PM_{2.5} 污染状况虽整体上得到了控制,但在华北平原等经济发达地区,其污染形势仍非常严峻,严重的空气污染事件时有发生。对于 PM_{2.5} 的污染防治,河南、河北及山东三省既要统筹兼顾、联防联控,又要对症下药、因地制宜地制定污染防治措施;周边污染较轻的城市应在完善自身 PM_{2.5} 防治措施的基础上,防范由中心污染区域带来的污染传输扩散危害。此外,各级政府应积极响应党中央提出的“要加快推动绿色低碳发展,持续改善环境质量,提升生态系统质量和稳定性,全面提高资源利用效率”的要求,大力发展绿色低碳经济,加快新旧动能转换步伐,打好 2021 年“蓝天保卫战”的收官之战。

4.3 讨论

本文采用 PM_{2.5} 浓度遥感反演数据,对 2000—2018 年华北平原地区 PM_{2.5} 浓度的时空变化特征及其影响因素进行了研究,可在一定程度上为华北平原地区的大气污染防治提供参考。但受研究数据及方法所限,本文未对短期内 PM_{2.5} 浓度的时空特征进行分析,对其影响因素之间的交互作用机制也未深入研究。此外,本文还缺少对 PM_{2.5} 浓度影响因子的综合分析,这将是下一步研究的主要方向。

参考文献:

[1] AMANN M, KIESEWETTER G, SCHPP W, et al. Reducing global air pollution: the scope for further policy interventions[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 2020, 378(2183): 20190331.

[2] 王韵杰, 张少君, 郝吉明. 中国大气污染治理: 进展·挑战·路径[J]. *环境科学研究*, 2019, 32(10): 1755-1762.

WANG Yunjie, ZHANG Shaojun, HAO Jiming. Air pollution control in China: progress, challenges and future pathways[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2019, 32(10): 1755-1762.

[3] 黄虹, 万雪莹, 陈廷涛, 等. PM_{2.5} 的健康危害、毒理效

应与作用机制的研究[J]. *地球环境学报*, 2020, 11(2): 125-142.

HUANG Hong, WAN Xueying, CHEN Tingtao, et al. Update on the toxicological effects and mechanism of PM_{2.5}[J]. *Journal of Earth Environment*, 2020, 11(2): 125-142.

[4] 朱广奎. 徐州市 PM_{2.5} 污染对医院门诊量的影响[J]. *中国校医*, 2020, 34(11): 812-813, 822.

ZHU Guangkui. Impact of PM_{2.5} air pollution on daily outpatient volume in Xuzhou City[J]. *Chinese Journal of School Doctor*, 2020, 34(11): 812-813, 822.

[5] FU Zhaoyang, LI Rui. The contributions of socioeconomic indicators to global PM_{2.5} based on the hybrid method of spatial econometric model and geographical and temporal weighted regression[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135481.

[6] 杨冬冬, 赵树云, 张华, 等. 未来全球 PM_{2.5} 浓度时空变化特征的模拟[J]. *中国环境科学*, 2017, 37(4): 1201-1212.

YANG Dongdong, ZHAO Shuyun, ZHANG Hua, et al. Simulation of global distribution of temporal and spatial variation of PM_{2.5} concentration in the future[J]. *China Environmental Science*, 2017, 37(4): 1201-1212.

[7] 夏晓圣, 汪军红, 宋伟东, 等. 2000~2019 年中国 PM_{2.5} 时空演化特征[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 4832-4843.

XIA Xiaosheng, WANG Junhong, SONG Weidong, et al. Spatio-temporal evolution of PM_{2.5} concentration during 2000-2019 in China[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4832-4843.

[8] BALASUBRAMANIAN R, QIAN W B, DECESARI S, et al. Comprehensive characterization of PM_{2.5} aerosols in Singapore[J]. *Journal of Geophysical Research D: Atmospheres*, 2003, 108(16): AAC 7-1.

[9] 杜震洪, 吴森森, 王中一, 等. 基于地理神经网络加权回归的中国 PM_{2.5} 浓度空间分布估算方法[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(1): 122-135.

DU Zhenhong, WU Sensen, WANG Zhongyi, et al. Estimating ground-level PM_{2.5} concentrations across China using geographically neural network weighted regression[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2020, 22(1): 122-135.

[10] 安海岗, 李佳培, 张翠芝, 等. 京津冀及周边城市 PM_{2.5} 污染空间关联网络及季节演化研究[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(7): 1377-1386.

AN Haigang, LI Jiapei, ZHANG Cui zhi, et al. Spatial correlation network and season evolution of PM_{2.5} pollution in Beijing-Tianjin-Hebei and surrounding cit-

- ies[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(7):1377-1386.
- [11] 王昭, 严小兵. 长江三角洲城市群 PM_{2.5}时空演变及影响因素[J]. *长江流域资源与环境*, 2020, 29(7): 1497-1506.
- WANG Zhao, YAN Xiaobing. Temporal-spatial evolution of PM_{2.5} and driving factors in Yangtze River Delta urban agglomeration[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2020, 29(7):1497-1506.
- [12] 依再提古丽·外力, 王明力, 杨建军, 等. 2015—2018年乌鲁木齐市 PM_{2.5}及 PM₁₀时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(8): 1749-1757.
- YIZAITIGULI Waili, WANG Mingli, YANG Jianjun, et al. Spatial and temporal characteristics of PM_{2.5} and PM₁₀ in Urumqi City from 2015 to 2018[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(8): 1749-1757.
- [13] 王晓军, 陈倩, 董韶妮, 等. 烟台市 PM_{2.5}空间分布特征与来源解析[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(4): 53-60.
- WANG Xiaojun, CHEN Qian, DONG Shaoni, et al. Spatial distribution characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Yantai City[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2020, 36(4): 53-60.
- [14] 樊建勇, 黄玲, 李翔翔. 2015—2018年江西省 PM_{2.5}污染时空变化特征及气象成因分析[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6): 1165-1172.
- FAN Jianyong, HUANG Ling, LI Xiangxiang. Analysis of the characteristics of the spatial-temporal variations of PM_{2.5} pollution and the meteorological causes in Jiangxi Province from 2015 to 2018[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(6): 1165-1172.
- [15] 康博, 刘强, 赵强. 基于 2015~2018 年实时监测数据对关中平原城市群 PM_{2.5}时空变化规律的研究[J]. *地球与环境*, 2020, 48(2): 161-170.
- KANG Bo, LIU Qiang, ZHAO Qiang. Spatiotemporal variations of PM_{2.5} in the urban agglomeration of the Guanzhong Plain based on real-time monitoring data during 2015-2018 [J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(2): 161-170.
- [16] 王欣瑶, 孙希华, 王林林, 等. 黄河三角洲 PM_{2.5}时空分布及其影响因子分析[J]. *西安理工大学学报*, 2021, 37(1): 32-42.
- WANG Xinyao, SUN Xihua, WANG Linlin, et al. Temporal and spatial distribution and impact factors of PM_{2.5} in the Yellow River Delta[J]. *Journal of Xi'an University of Technology*, 2021, 37(1): 32-42.
- [17] 周敏丹, 匡耀求, 云国梁. 基于地理探测器的广州市大气 PM_{2.5}浓度驱动因素分析[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(2): 271-279.
- ZHOU Mindan, KUANG Yaoqiu, YUN Guoliang. Analysis of driving factors of atmospheric PM_{2.5} concentration in Guangzhou City based on geo-detector [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(2): 271-279.
- [18] 曾元梓, 陈奕汝, 郭慧娟, 等. 城市湖泊湿地建成环境对 PM₁₀、PM_{2.5}浓度影响因子分析——以武汉市为例[J]. *中国园林*, 2018, 34(7):104-109.
- ZENG Yuanzi, CHEN Yiru, GUO Huijuan, et al. Influencing factors of urban lake wetland of built environment on air PM₁₀/PM_{2.5} concentration: a case of Wuhan[J]. *Chinese Landscape Architecture*, 2018, 34(7): 104-109.
- [19] 张剑飞, 姜楠, 段时光, 等. 郑州市 PM_{2.5}化学组分的季节变化特征及来源解析[J]. *环境科学*, 2020, 41(11): 4813-4824.
- ZHANG Jianfei, JIANG Nan, DUAN Shiguang, et al. Seasonal chemical composition characteristics and source apportionment of PM_{2.5} in Zhengzhou[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(11): 4813-4824.
- [20] 周杨, 罗彬, 杨文文, 等. 基于 2012—2018 年内江市 PM_{2.5}化学组分变化对《大气污染防治行动计划》实施效果的评估[J]. *环境科学研究*, 2020, 33(3):563-571.
- ZHOU Yang, LUO Bin, YANG Wenwen, et al. Evaluation of effects of air pollution prevention and control action plan based on variations of chemical components in PM_{2.5} during 2012-2018 in Neijiang City [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2020, 33(3): 563-571.
- [21] 肖捷颖, 朱欢欢, 秦伟, 等. 石家庄市采暖季道路降尘 PM_{2.5}重金属元素健康风险评估[J]. *安全与环境学报*, 2020, 20(2): 741-746.
- XIAO Jieying, ZHU Huanhuan, QIN Wei, et al. Health risk assessment of heavy metal contaminants in road dust PM_{2.5} from urban areas of Shijiazhuang during heating seasons [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2020, 20(2): 741-746.
- [22] 李晓宝, 赵红, 曾波, 等. 高速公路 PM_{2.5}中重金属季节变化特征及健康风险评估[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(4): 827-833.
- LI Xiaobao, ZHAO Hong, ZENG Bo, et al. Seasonal change characteristic and health risk assessment of heavy metals in PM_{2.5} near highway[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(4):827-833.
- [23] 李培荣, 肖天贵. 成都地区秋冬季污染天气形势下 PM_{2.5}的扩散与输送[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(1): 63-75.
- LI Peirong, XIAO Tianguai. The diffusion and trans-

- port of $PM_{2.5}$ under the polluted weather conditions during autumn and winter seasons in Chengdu[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(1):63-75.
- [24] 胡玉筱, 段显明. 基于高斯烟羽和多元线性回归模型的 $PM_{2.5}$ 扩散和预测研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2015, 29(6): 86-92.
- HU Yuxiao, DUAN Xianming. $PM_{2.5}$ dispersion prediction based on Gaussian plume model and multiple linear regression model[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2015, 29(6): 86-92.
- [25] 刘林钰, 张永军, 李彦胜, 等. 基于深度学习的华东地区 $PM_{2.5}$ 浓度遥感反演[J]. *环境科学*, 2020, 41(4): 1513-1519.
- LIU Linyu, ZHANG Yongjun, LI Yansheng, et al. $PM_{2.5}$ inversion using remote sensing data in eastern China based on deep learning[J]. *Environmental Science*, 2020, 41(4):1513-1519.
- [26] 邵琦, 陈云浩, 李京. 基于卫星遥感和气象再分析资料的北京市 $PM_{2.5}$ 浓度反演研究[J]. *地理与地理信息科学*, 2018, 34(3): 32-38.
- SHAO Qi, CHEN Yunhao, LI Jing. Inversion of $PM_{2.5}$ concentration in Beijing based on satellite remote sensing and meteorological reanalysis data[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2018, 34(3):32-38.
- [27] LEFEVER D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse[J]. *American Journal of Sociology*, 1926 (1): 88-94.
- [28] 赵璐, 赵作权. 基于特征椭圆的中国经济空间分异研究[J]. *地理科学*, 2014, 34(8): 979-986.
- ZHAO Lu, ZHAO Zuoquan. Projecting the spatial variation of economic based on the specific ellipses in China[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(8): 979-986.
- [29] Nguyen Tien Thanh, 刘修国, 任泽. 局部空间自相关及其在勘探地球化学中的空间聚集研究[J]. *物探与化探*, 2014, 38(2): 370-376.
- Nguyen Tien Thanh, LIU Xiuguo, REN Ze. A study of geochemical exploration spatial cluster identification based on local spatial autocorrelation[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2014, 38(2):370-376.
- [30] ANSELIN L. Local indicators of spatial association—LISA[J]. *Geographical Analysis*, 1995, 27(2): 93-115.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器:原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- WANG Jinfeng, XU Chengdong. Geodetector: principle and prospective [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1):116-134.
- [32] 黎雅婷, 周景坤. 河北省雾霾天气的成因及防治[J]. *中国经贸导刊(中)*, 2020(7):133-135.
- [33] 姚青, 蔡子颖, 刘敬乐, 等. 气象条件对 2009—2018 年天津地区 $PM_{2.5}$ 质量浓度的影响[J]. *环境科学学报*, 2020, 40(1): 65-75.
- YAO Qing, CAI Ziyang, LIU Jingle, et al. Effects of meteorological conditions on $PM_{2.5}$ concentration in Tianjin from 2009 to 2018[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2020, 40(1): 65-75.
- [34] 李衡, 韩燕. 黄河流域 $PM_{2.5}$ 时空演变特征及其影响因素分析[J/OL]. *世界地理研究*, [2020-07-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20200720.1538.006.html>.
- LI Heng, HAN Yan. Analysis on the spatial-temporal evolution characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in the Yellow River Basin[J/OL]. *World Regional Studies*, [2020-07-20]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20200720.1538.006.html>.
- [35] 李光勤, 秦佳虹, 何仁伟. 中国大气 $PM_{2.5}$ 污染演变及其影响因素[J]. *经济地理*, 2018, 38(8): 11-18.
- LI Guangqin, QIN Jiahong, HE Renwei. Spatial-temporal evolution and influencing factors of China's $PM_{2.5}$ pollution[J]. *Economic Geography*, 2018, 38(8):11-18.

(责任编辑 周 蓓)