



世界地理研究
World Regional Studies
ISSN 1004-9479, CN 31-1626/P

《世界地理研究》网络首发论文

题目: 黄河流域PM_{2.5}时空演变特征及其影响因素分析
作者: 李衡, 韩燕
网络首发日期: 2020-07-20
引用格式: 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. 世界地理研究.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1626.P.20200720.1538.006.html>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式 (包括网络呈现版式) 排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊 (光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊 (网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊 (网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物 (ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

黄河流域 PM_{2.5} 时空演变特征及其影响因素分析

李 衡¹ 韩 燕^{1,2}

(1. 兰州交通大学 经济管理学院, 甘肃兰州, 730070 ; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所 经济地理与区域发展研究室, 北京, 100101)

摘要：研究黄河流域 PM_{2.5} 污染情况，对于打赢大气污染防治攻坚战、推动黄河流域生态文明建设和高质量发展具有重要意义。选取 2000-2017 年大气 PM_{2.5} 遥感反演数据集，综合运用标准差椭圆及地理探测器等方法，揭示了黄河流域 PM_{2.5} 的时空演变特征及其影响因素。结果表明：①2000-2017 年黄河流域 PM_{2.5} 年均浓度整体呈现先快速增加后又波动变化的演变趋势，空气污染状况不容乐观。②黄河流域 PM_{2.5} 空间集聚性明显，低值区稳定分布在内蒙古中部和西南部高原地区；高值区一方面分布在自然条件较差的西北内陆，另一方面集中在人类活动强度较高的地带。③黄河流域 PM_{2.5} 污染总体呈现出“西北—东南”方向的分布格局，其浓度在地理空间上呈现分散化的趋势，即污染的主要范围有所扩大。④人口密度、工业化水平、外商投资以及科技支出等经济社会因素对 PM_{2.5} 浓度存在显著影响，但其作用强度及方向存在差异。

关键词：PM_{2.5}；雾霾污染；时空演变；地理探测器；黄河流域

中图分类号：F222；P95

文献标志码：A

0 引言

改革开放以来，伴随着市场经济的快速发展，中国城镇化水平由 1978 年的 17.92% 飞速提升至 2017 年 58.52%，与此同时，中国工业化发展也取得显著成就。但是，如此长期不完善的发展模式给生态环境带来了巨大的压力，由此产生了一系列环境恶化问题，而由细颗粒物造成的大气污染问题尤为突出并成为社会舆论和学术研究的热点。已有研究发现，PM_{2.5} 是加剧雾霾污染的首要污染物^[1]，它既可以降低能见度^[2]，又能够影响气候^[3]，此外还能危害人类身心健康并阻碍经济社会的可持续发展^[4]。由此可见，PM_{2.5} 不仅是未来中国大气污染防治的重点，而且也是国际空气治理研究的热门主题。

近年来，学者针对 PM_{2.5} 相关问题开展了诸多探讨，研究成果逐渐丰富。研究主题主要包括 PM_{2.5} 的来源及化学构成解析^[5]、健康影响^[6]、时空特征^[7]以及影响因素^[8]等方面。特别的，在影响因素方面，现有研究指出 PM_{2.5} 污染的成因既包括气温^[9]、降水^[10]、沙尘^[11]及地形^[12]等自然地理因素，又包括人口集聚^[13]、产业结构^[14]、汽车尾气^[15]等经济社会因素，但也有研究证实经济社会因素对我国 PM_{2.5} 污染的影响更大^[16]。从研究尺度上来看，目前主要以全国^[7,13,15,17]、城市群^[18]、省份^[19]以及单一城市^[20]为主，其中关于长江流域的研究较为丰富^[21-22]。研究方法主要涉及灰色关联模型^[19]、OLS 回归^[15]、地理加权回归^[22]等，近年来，基于 STARS、ArcGIS、MATLAB 等可视化及空间计量方法，探索性时空数据分析，如 Moran's I、Geary's C 及 Getis-Ord G 指数等，更多的被应用于 PM_{2.5} 演变的时空特征以及影响因素的分析和鉴别中^[17-18,21]。

黄河流域横跨我国中东西部，在生态保护和经济社会发展等方面都具有极其重要的地位^[23]。2019 年 9 月，在河南省郑州市举办的座谈会上，习近平总书记明确提出将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略，然而推动黄河流域生态保护和高质量发展并非易

基金项目：教育部人文社会科学研究项目（18YJCZH044）；国家自然科学基金（41401653）。

作者简介：李衡（1995-），男，硕士研究生，主要研究方向为区域经济学和产业经济学，Email: henough@163.com。

通讯作者：韩燕（1984-），女，硕士生导师，中科院地理所博士后，副教授，主要从事区域经济、资源环境经济学方面的研究，Email: yingyuh@163.com。

事。黄河流域因农耕文明历史悠久的具备稠密的人口和较高的城镇化水平,此外它因能源丰富而拥有较高的工业化水平,加之开发强度较高,最终促使黄河流域的空气质量长期处于较为严峻的状态,而且相关研究也已佐证黄河流域雾霾污染严重的事实^[24-25]。因此,对黄河流域 $PM_{2.5}$ 污染情况进行分析,对于打赢大气污染防治攻坚战、推动黄河流域生态文明建设和高质量发展具有重要意义。

综上所述, $PM_{2.5}$ 研究更多的集中在全国尺度以及长江经济带等典型区域,而且长时间序列的系统分析相对不多,黄河流域作为承载着生态保护和高质量发展重大国家战略的特殊地带,目前尚未有针对性的研究成果。已有研究在方法上多着重使用空间自相关聚焦 $PM_{2.5}$ 污染的相关性问题,而在一定程度上缺少从全局视角出发的对空间格局的整体性、方向性的研究成果。此外,地理探测器因其独特优势而在众多领域得到应用^[26],但缺少应用在 $PM_{2.5}$ 相关问题上的实例。鉴于此,本文基于 2000-2017 年黄河流域的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据,在进行时序和空间特征分析的基础上,运用标准差椭圆方法探讨流域大气污染的时空演变格局,最后结合地理探测器进行影响因素分析,以期在一定程度上弥补现有研究的不足,并在习近平总书记提出的“黄河流域必须下大气力进行大保护、大治理,走生态保护和高质量发展的路子”的要求下,为黄河流域大气污染精准防控、推进《黄河保护法》立法进程、促进黄河流域生态环境格局空间优化、合理划定生态环境保护分区以及实现上中下游、不同空间格局因地制宜治理黄河生态的目标提供理论解释和决策支撑。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源

数据来源主要分为两部分:① $PM_{2.5}$ 浓度数据。本文使用加拿大达尔豪斯大学大气成分分析小组 (Atmospheric Composition Analysis Group) 提供的 2000-2017 年大气 $PM_{2.5}$ 遥感反演数据集 (V4.CH.02), 下载网址为 http://fizz.phys.dal.ca/~atmos/martin/?page_id=140。与现有研究中使用地面监测点提供的点源数据相比,卫星监测数据具有时间跨度长、分辨率高、受人为干扰程度较低的优点,因此使用该数据集可以更好的反映地区 $PM_{2.5}$ 浓度的真实情况。鉴于此,本文在 ArcGIS 中以黄河流域行政区划界线矢量数据作为掩膜,对精度为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ 的栅格数据进行分区统计,最终提取出黄河流域 90 个地区^①的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据 (ug/m^3)。②经济社会数据。相关文献已表明地区空气质量受自然地理因素以及经济社会因素的影响,但考虑到文章侧重点不同以及自然因素是“缺乏弹性”的^[27],因此本文在时空演变分析过程中对受自然条件影响较大的典型区域进行概述,在实证分析部分则侧重对人文因素进行分析。基于 IPAT 模型和 EKC 假说,通过梳理已有研究^[13-22]并在数据可获得的基础上,最终选取人均 GDP (元)、工业化水平 (亿元)、外商投资 (百万美元)、科技支出 (%)、人口密度 (人/平方公里)、建成区面积 (平方公里)、公共交通 (辆) 以及植被指数 (NDVI) 作为影响因素。其中,工业化水平指规模以上工业总产值,科技支出用科学支出占财政支出的比重来衡量,公共交通是指年末实有公共汽 (电) 车营运车辆数。以上数据来自 CEIC 数据库、《中国城市统计年鉴》以及中国科学院资源环境科学数据中心。

1.2 研究方法

1.2.1 时空特征分析方法

^① 黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上提到的黄河流域包括黄河流经的青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省以及山东省,但 2014 年发布的《国务院关于依托黄金水道推动长江经济带发展的指导意见》已明确把四川省划入长江经济带,而且黄河仅流经四川省的阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州,这两个自治州对黄河流域经济社会发展格局的影响较小。内蒙古自治区的蒙东地区,虽然地理上属于黄河流域,但它不是黄河自然流经地区以及重要经济社会文化关联地区,而且也早已划至“东北振兴”的地理范围。鉴于此,本研究中黄河流域不包括四川省以及蒙东地区。

探究 PM_{2.5} 浓度的时空特征需要一系列不仅可以反映时序规律，而且还能反映空间格局的测度方法^[17]。鉴于此，本文主要采用均值来解析 PM_{2.5} 浓度的时序变化特征，并使用可视化来分析其空间分布特征。

1.2.2 标准差椭圆

标准差椭圆最早由 Lefever 于 1926 年提出，现多用于从全局和空间角度揭示地理要素的多方面特征^[28]，它是一种通过空间分布范围、中心、长轴、短轴、方位角等基本参数定量描述要素空间分布的中心性、方向性、展布性等特征，揭示地理要素的空间分布及时空演化过程的空间统计方法，具体测算公式见文献^[28]。

其中，标准差椭圆的分布范围即某要素（本文中指 PM_{2.5} 浓度）空间分布的主要范围；椭圆的平均中心即要素在空间分布上的重心；方位角表示其分布的主趋势方向；长轴上的标准差可以反映出要素在主趋势方向上的离散程度，椭圆的长轴方向代表要素空间分布较多的方向，短轴则相反，长短轴之间的差值越大，表明该要素的方向性越强。

1.2.3 地理探测器

地理探测器是一种用来探测空间分异性，揭示其背后驱动因子的一种新的统计学方法，该法优势之一是保证了对多个自变量共线性的免疫。若某个自变量对某个因变量有重要影响，那么自变量和因变量的空间分布应该具有相似性^[26]，从而能够探测变量之间的因果关系。地理探测器主要包括四个探测器，本文主要通过因子探测器和风险探测器识别 PM_{2.5} 污染的主要驱动因素并检验各因子的空间异质性。

因子探测器主要用来探测因变量 y 在各影响因子 x 的地理层上的空间异质性以及影响因子 x 对因变量 y 的解释程度，用 q 度量，计算公式为：

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

式中， h 为变量 y 或因子 x 的分层数，在本文中变量的分类为 6 类； N 和 N_h 分别为全域和某一层的单元数，在本文中分别表示黄河流域全域单元数和每一类中地市单元数； σ^2 和 σ_h^2 分别是全域和层 h 的 y 值的方差； q 的值域为 $[0,1]$ ， q 值越大说明因变量 y 的空间分异性越明显，如果空间分异性是由自变量 x 形成的，那么 q 值越大说明该变量对 PM_{2.5} 浓度的解释力越强，反之越弱。

风险探测器可用于判断两个子区域间的属性均值是否有显著的差别，用 t 统计量来检验：

$$t_{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}} = \frac{\bar{y}_{h=1}-\bar{y}_{h=2}}{\left[\frac{Var(\bar{y}_{h=1})}{n_{h=1}} + \frac{Var(\bar{y}_{h=2})}{n_{h=2}} \right]^{\frac{1}{2}}} \quad (2)$$

式中： $\bar{y}_h$ 表示子区域 h 内的属性均值，本文指代 PM_{2.5} 浓度； n_h 为子区域 h 内样本数量； Var 表示方差。如果在置信水平 α 下拒绝原假设，则认为两个子区域间的属性均值存在着明显的差异。

2 黄河流域 PM_{2.5} 时空特征分析

2.1 时序特征

由图 1 可知，2000-2017 年黄河流域 PM_{2.5} 浓度总体呈现出波动增长的演变趋势，PM_{2.5} 年均浓度从 2000 年的 42.65 ug/m³ 波动增加到 2017 年的 50.06 ug/m³，增长率达 17.37%。此外，参考《环境空气质量标准》(GB3095-2012)^[29]中 PM_{2.5} 年均浓度限值 (35 ug/m³) 可知，研究期间内黄河流域 PM_{2.5} 浓度年均值均高于年均限值，空气污染状况不容乐观。

具体而言，2000-2007 年可视为 PM_{2.5} 年均浓度的增长阶段，特别是 2004 年至 2006 年。该时期工业发展推动能源消耗剧增，经济发展过程中出现了一系列环境问题，PM_{2.5} 浓度持续增长，增幅接近 30%。2006 年后 PM_{2.5} 年均浓度显著增长的趋势在一定程度上得到抑制，并于 2007 年达到研究期间的最高值，该结论与徐超等人^[30]的研究以及 2007 年中国环保部

所公布文件一致，同时也与中国经济发展速度和理念变化相匹配，即 2000-2006 年中国经济经过高速发展之后，2007 年开始出现“稳政策、调结构”的宏观调控特点，同时中国也越来越重视经济的“又快又好”发展，并在中国共产党第十七次全国代表大会上首次提出建设生态文明的战略要求。2008-2017 年间，黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度总体处于波动变化之中，2008-2010 年期间受金融危机、可持续发展观与“资源节约型、环境友好型”的发展理念以及后续相关政策文件的影响下， $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值明显下降，后在“四万亿计划”的刺激下，中国实体经济逐渐实现软着陆， $\text{PM}_{2.5}$ 浓度值再次回升。2013 年雾霾“席卷”中国 25 个省份、100 多个大中型城市，已经严重影响了中国的经济发展质量、大众身心健康以及政府形象，但由于国务院大力落实《重点区域大气污染防治“十二五”规划》、《大气污染防治行动计划》等政策文件， $\text{PM}_{2.5}$ 又呈现出持续下降的特征，然而 2017 年雾霾再次袭城，环保部和工信部甚至发布了史上最严“停工令”，黄河流域中的山东省、河南省以及山西省中的多数城市都位列其中。

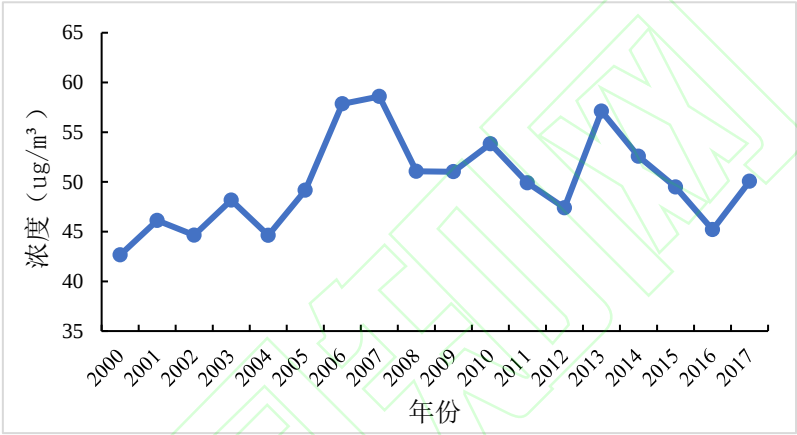


图 1 2000—2017 年黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变化趋势

Fig.1 The trend of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yellow River Basin from 2000 to 2017

2.2 空间分异特征

为了进一步探讨 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分异特征，本部分将黄河流域历年 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值进行空间聚类，综合考量后选取有代表性的 2000 年、2007 年和 2017 年进行可视化分析。在数据处理方面，考虑世界卫生组织和中国《环境空气质量标准》(GB3095-2012) 中 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度限值（表 1）以及数据的实际情况，最终将黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度值划为如图 2 所示的六个区间范围。

表 1 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度标准值

Tab.1 The standard value of $\text{PM}_{2.5}$ concentration

国家/组织	类别	年均值(ug/m³)	日均值(ug/m³)	来源
世界卫生组织	基准值	10	25	2005 年《空气质量准则》
	过渡期目标 1	35	75	
	过渡期目标 2	25	50	
	过渡期目标 3	15	37.5	
中国	基准值	35	75	2016 年《环境空气质量标准》

由图 2 所示，2000 年 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度小于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的低值区主要集中在山东半岛（威海市、烟台市以及青岛市等）、内蒙古中部（呼和浩特市、包头市以及鄂尔多斯市等）、山西省东北部（大同市、朔州市及忻州市等）以及西南部高原地带的自治州（甘南藏族自治州、

果洛藏族自治州以及玉树藏族自治州等), 而西北内陆(阿拉善盟、海西蒙古族藏族自治州等地)、黄土高原中西部地带(陕甘宁等地)、河南省多数地市以及山东中西部地区连片集中出现空气污染较为严重的现象, 部分地带的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度甚至超过了 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。后因各地经济发展较迅速, 所以 2007 年黄河流域空气污染程度明显加重, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度高值区范围不断扩散, 占比达 87%, 较 2000 年增长 20% 左右。除内蒙古中部和西南部高原地带外, 其余地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度均高于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 大力发展工业(比如天水市、酒泉市等)以及能源丰富的地区(山西省)污染开始凸显, 河南省中东部以及山东省中西部在原有基础上加重并成为流域内空气污染最为严重的地带, $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均已超过 $75 \mu\text{g}/\text{m}^3$, 开封市、菏泽市等局部地带甚至超过了 $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 。在国家逐渐重视生态文明建设并坚持可持续发展的背景下, 2017 年空气污染状况较 2007 年相比有所改善, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度小于 $35 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 的低值区数量明显增多, 除空气质量一直较好的西南部高原和内蒙古中部地区之外, 陕西省和甘肃省部分城市的空气状况也得到了改善。相对而言, 西北内陆地区、河南省和山东省的雾霾污染状况依旧不容乐观, $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度仍在 $50 \mu\text{g}/\text{m}^3$ 以上, 聊城市、新乡市等地空气污染状况最为严重。

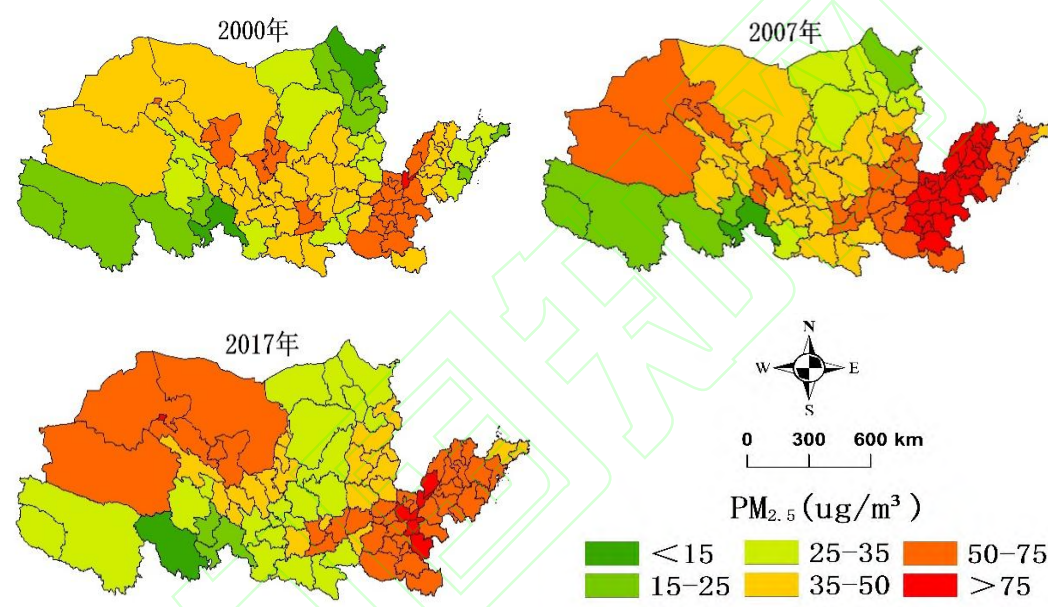


图2 黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布

Fig.2 Spatial distribution of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yellow River Basin

综合而言, 黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 污染低值区稳定分布在人口稀少且生态环境较好的内蒙古中部和西南部高原地区, 高值区一方面分布在自然条件较差的西北内陆地区; 另一方面分布在人口稠密、能源需求量大、经济较发达的地带(较为典型的是山东省和河南省)。具体而言, 对于黄河流域西部地区, 尤其是胡焕庸线西北侧的青海省、甘肃省、宁夏回族自治区以及内蒙古自治区的大部分地区均处于地广人稀、经济欠发达的状况中, 此类地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染受自然因素(地形及气象条件等)的影响更大, 且相关研究^[31]已佐证了这一点。例如, 青海省的柴达木盆地、甘肃省河西走廊以及内蒙古西部的阿拉善等地区处于沙漠和戈壁滩较多的西北干旱区, 地形起伏较小, 降水较少但日照充足, 而且受季风影响较弱, 山谷盆地等地形容易对气流产生阻挡效应, 不利于污染物的扩散稀释, 相比之下西南部起伏度较大的山地和高原地区因气流运行规律简单而使得空气质量较好。近年来陕南秦岭地区、陕北高原和周边地区因地理优势以及卓有成效的生态环境保护工程(例如毛乌素沙漠的治理)等有效改善了空气质量, 而关中地区因东部和西部常年主导的偏东风和偏西风以及南北高、中间低的地形条件使其常年处于一个不利于污染物疏散的状态中。此外, 黄河流域中位于胡焕庸线东南侧地区

的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染虽然也受到自然条件的影响,但是此类地区因经济发展较好而受人类活动影响的程度更大,因此下文影响因素部分侧重证实经济社会因素的作用效果。

3 黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 时空格局演变分析

为了探究黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空格局演变特征,本文使用标准差椭圆从全局及时空角度定量解释各地区 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度时空分布的中心性、延展性、方向性和空间形态,在此仅展示 2000 年、2007 年和 2017 年的结果,详情见表 2 和图 3 所示。

表 2 黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的标准差椭圆

Tab.2 The standard deviation ellipse of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yellow River Basin

年份	2000	2007	2017
方位角/ $^{\circ}$	96.21	93.67	95.49
重心坐标	110.47 E, 36.27 N	111.52 E, 36.20 N	110.99 E, 36.42 N
重心所在地区	延安市	临汾市	临汾市
椭圆面积/ km^2	678241.62	668703.80	741952.36
长轴标准差/ km	734.39	731.39	782.40
短轴标准差/ km	294.01	291.07	301.90

从方位角变化范围来看,黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度总体呈现出“西北—东南”方向的空间分布格局,该地理空间走向大致与黄河流域的区域形态、各地人口分布以及经济实力差异相关。转角由 2000 年的 96.21° 波动缩小到 2017 年的 95.49° ,表明流域 $\text{PM}_{2.5}$ 空间分布格局存在微弱的向“正东—正西”方向偏移的趋势,这意味着大致位于黄河流域正东方向的山东省以及河南省周边地带的大气污染程度要略强于西北地带。

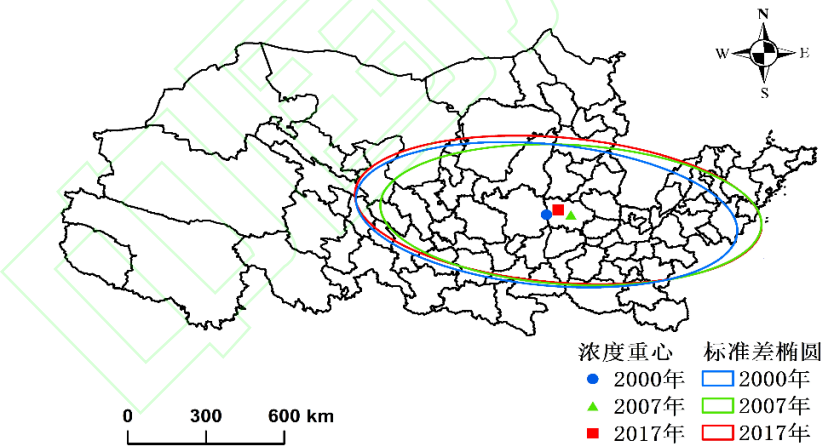


图 3 黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度分布时空格局

Fig.3 Spatial-temporal pattern of $\text{PM}_{2.5}$ concentration in the Yellow River Basin

标准差椭圆的长轴和短轴长度相差较大,由此也证实了 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的空间分布具有明显的方向性。从长轴方向来看,长半轴标准差先由 2000 年的 734.39km 降至 2010 年的 731.39km,意味着该时期黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度在主要方向即“西北—东南”方向上呈现收缩趋势,即高污染区有所集聚,但集聚程度不大;2007-2017 年,长半轴标准差由 731.39km 增加至 782.40km,表明此阶段大气污染在主要方向上出现分散趋势。从短轴方向看,短半轴标准差变化特征与长半轴标准差相似,由 2000 年的 294.01 km 波动增加至 2017 年的 301.90 km,由此可知黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度在地理空间上呈扩张分散化的趋势,空间溢出作用有所凸显。

从空间重心来看,黄河流域 $\text{PM}_{2.5}$ 年均浓度的空间分布重心由 2000 年陕西省延安市边

界地带逐渐向东南方向发生偏移并于 2007 年落于山西省临汾市境内，随后虽然又向西北方向迁移，但重心依旧落在临汾市内。山西省的煤炭保有资源占据全国第三，不合理的经济结构带来持续的环境污染，虽然近年来山西省加大环保力度，大气污染状况有所好转，但由于很多地方污染防治工作起步较晚，基础薄弱，加之重污染企业多、排放强度大，现阶段情况不容乐观。PM_{2.5} 污染重心临汾市产业结构和布局更加不合理，在不到 5000 平方公里的范围内聚集了 10 家钢铁企业、23 家焦化企业。大量高能耗、高污染企业聚集在临汾盆地，这是临汾市污染严重的最重要原因。

从椭圆覆盖范围来看，标准差椭圆的面积先由 2000 年的 67.82 万 km² 减少至 2007 年的 66.87 万 km²，后又最终增加至 2017 年的 74.20 万 km²，其分布范围虽存在波动，但最终呈现出扩张的态势，这意味着空气污染的主要范围有所扩大。此外，2017 年的标准差椭圆几乎将 2000 年和 2007 年的椭圆全部包含在内，覆盖范围从甘肃省东南部到山东省中西部，覆盖区域包含了绝大多数经济发展相对较好以及人口较稠密的地市。以上覆盖范围不仅是大气污染防治的重点区域，而且也可佐证经济社会因素（人类活动）对我国大气污染影响更大 [16,22]。

整体而言，黄河流域 PM_{2.5} 污染近年来存在扩张的趋势，空间溢出效应有所显现，大气污染正朝着区域性污染发展。究其原因，首先与一些地区长期经济发展方式粗放以及不合理的产业结构有关，其次在地形以及气象条件的辅助下，空气大范围的流动使得本地空气质量不仅受当地污染物排放的影响，而且还受到其他地区污染源的影响。结合图 2 可知，黄河流域中部分渭平原（咸阳、西安、渭南、运城、临汾及洛阳等）的区域性大气污染较为突出，而且已有研究 [32-34] 表明以上地区也是太原市、郑州市、天水市等邻近地区大气污染过程中输入污染物的重要来源之一。此外，西北方位和东南地区长期处于 PM_{2.5} 的重污染区，而近年来中间区域的大气污染状况有所改善，因此针对 PM_{2.5} 污染的自然源和人为原因采取适宜的措施，并在邻近区域内模拟 PM_{2.5} 传输路径，挖掘和规划 PM_{2.5} 流通廊道，建立起周边区域联防联控机制对控制区域性污染有着重要意义。

4 黄河流域 PM_{2.5} 影响因素分析

为了较好的保证分析的准确性，本文首先去除了经济社会数据缺失较严重的行政单位，同时结合实际情况剔除了受人类活动影响较小而受地形、降水、风沙等恶劣天气影响较严重的地区，最终用于影响因素分析的地级市为 74 个^②；在时间节点的选择上，一方面由于早期数据缺失严重，另一方面考虑到时效性问题并综合地理探测器方法的相关特点，在此仅选取 2017 年进行深入分析；最后使用 ArcGIS 中的自然断点法将上述经济社会因素进行离散化处理，并借助 GeoDetector 软件探测各因子对黄河流域 PM_{2.5} 年均浓度的影响程度。

结果显示（表 3），除人均 GDP 和植被指数之外，其余指标均通过显著性检验，而且从 *q* 值大小来看，各影响因素对 PM_{2.5} 的作用强度由高到低分别为人口密度（0.76）、工业化水平（0.49）、外商投资（0.35）、公共交通（0.34）、建成区面积（0.34）、科技支出（0.27）。

表 3 黄河流域 PM_{2.5} 浓度的影响因素分析

Tab.3 Analysis on influencing factors of PM_{2.5} concentration in the Yellow River Basin

影响因子	人口密度	工业化水平	外商投资	公共交通	建成区面积	科技支出
<i>q</i> 值	0.76	0.49	0.35	0.34	0.34	0.27
<i>p</i> 值	0.000	0.000	0.047	0.009	0.011	0.023

此外，本文还借助风险探测器并参考 Peng W 等人 [35] 的研究分析判断 PM_{2.5} 浓度在各影

^② 因篇幅原因在此省略，如有兴趣可与作者讨论。

响因子的各子区域间的属性均值是否具有显著的差别。如表 4 所示,各经济社会影响因素均按数值从小到大分别分为 6 个子区间,每个子区间各自对应一个 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值。若某影响因子总体上随着 $\text{PM}_{2.5}$ 数值的增加而增加,则在一定程度上表明该因子与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈正相关关系;若某因子的子区间变动和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的变动存在明显的非线性关系,则意味着该因素对 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响存在异质性。

(1) 人口密度的解释力最强且对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度具有显著的增促进作用,该结果不仅与预期相符,而且与李光勤^[17]、杨冕^[21]、王少剑^[36]等人的研究相一致。较高的人口密度会明显加剧空气污染,这主要是因为人口密度越高人类活动也就更为频繁,随之对物质生活的需求也就更高,住房、交通以及其他生产生活方式的压力也随之增加,由此便加大了各类污染物的排放量,最终使得空气污染较为严重。目前虽然很多城市都在实行相应的环境保护措施,但是与人口稠密带来的环境压力(例如冬季燃煤供暖)相比仍显薄弱。结合实际情况而言,人口密度较高的地方多集中在河南省和山东省,同时两省也是流域内雾霾污染极其严重的区域。

表 4 风险探测器结果

Tab.4 The result of Risk Detector

变量\级别	1	2	3	4	5	6
人口密度	23-126	126-234	234-343	343-559	559-789	789-1326
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	33.82	38.24	45.84	55.86	67.68	66.92
工业化水平	42-1200	1200-2459	2459-3991	3991-6413	6413-10925	10925-16434
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	36.55	48.19	58.76	59.14	63.51	63.12
外商投资	0-90	90-266	266-730	730-1285	1285-4049	4049-7735
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	40.04	52.79	62.16	61.13	53.70	52.51
公共交通	82-271	271-604	604-1129	1129-1703	1703-3034	3034-7780
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	32.95	45.68	59.06	60.93	53.47	61.22
建成区面积	14-51	51-85	85-147	147-222	222-340	340-661
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	35.70	44.25	52.75	58.95	57.25	61.22
科技支出	0.2-0.5	0.5-0.8	0.8-1.2	1.2-1.8	1.8-2.9	2.9-4.3
$\text{PM}_{2.5}$ 浓度	40.75	45.68	56.29	60.00	62.21	43.76

注:数字 1-6 指各变量由低到高的级别。以人口密度为例,级别 1 对应的范围是 23-126 (人/平方公里), 33.82 (ug/m^3) 为该级别(范围)下的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度均值。

(2) 与大多数研究产业结构和环境污染关系的结论较一致,例如孙传旺等^[37],工业化是大部分地区 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的主要驱动因素,即工业化程度越强的地方空气污染越为严重。这是因为工业生产会增加能源消费量,而化石燃料大量使用所产生的排放物是城市大气污染的重要来源之一。黄河流域的能源储备较为丰富,现已形成上游水电、中游煤炭、下游石油的分布格局^[38],如何在生产生活中以较低的能源消耗和较小的环境压力带来较高的经济社会效益是流域生态文明建设和经济高质量发展的重要目标。

(3) 相对上述两因素而言,已有研究对外商投资、公共交通以及建成区面积这三个因素的影响效应多存在不同结论。例如,严雅雪^[39]认为外商投资对空气污染具有显著的增促进作用,姜磊等^[40]研究表明,FDI 对环境污染具有负面效应,即不存在“污染避难所”假说,而本文研究表明,外商投资对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响存在异质性。具体而言,对于黄河流域中上游地区,外商投资对当地空气污染多具有增促效应,其主要原因是外资引进不能合理优化当地产业结构^[41],但却扩大了当地的生产建设规模,因此外资带来的规模和结构效应的副作用加剧了相关污染物的排放^[36]。然而,对于山东半岛、郑州市及西安市等地,外商直接投资却有

利于降低城市大气污染,即存在“污染光环效应”,此类地区的政府多存在空气污染治理的压力,因此对外资的引入有着较高的环境准入门槛,环境规制使得外商投资有利于改善环境质量^[42]。此外,对于公共交通和建成区而言,王少剑^[36]、孙传旺^[37]等人也持有不同意见,本文研究结果表明两因素对黄河流域 $PM_{2.5}$ 污染总体均呈现正相关效应。已有研究证实大气污染与土地城镇化中城市扩张建设所产生的道路扬尘、建筑施工扬尘等联系紧密^[43],小型城市在原有基础上继续发展扩张,而大中型城市出现大气污染等城市病问题的形势依旧不容乐观。此外,人类活动较频繁的地区公共交通的运输压力也相对较大,相应的汽车尾气排放会直接加剧空气污染,而在尾气排放口安装净化装置或大力发展新能源汽车将有助于节能减排^[21]。

(4) 仅在少部分地区(例如胶东半岛、西安市及太原市),科技支出对 $PM_{2.5}$ 浓度存在降减作用,此类地区因研发经费投入较多而带来技术进步,从而有助于提高能源利用率以及污染治理技术水平,即在降低污染排放的同时提高了污染处理率,从而对城市大气污染具有改善作用。而流域内绝大多数地区不仅科学支出较少,而且相关技术也不够成熟,最终使得相关企业发展较为粗放,从而引起能源消耗的回弹效应^[44],最终促使 $PM_{2.5}$ 污染加重。尽管如此,但相对于人口密度以及工业化水平等因素而言,当前科学支出对 $PM_{2.5}$ 浓度的影响最为微弱。

5 结论、建议与展望

5.1 结论

作为雾霾污染的首要污染物, $PM_{2.5}$ 严重制约了黄河流域生态文明建设和高质量发展的进程。本文基于 2000-2017 年黄河流域的 $PM_{2.5}$ 年均浓度数据,在进行时序和空间特征分析的基础上,运用标准差椭圆探讨流域空气污染的时空演变格局,最后结合地理探测器进行影响因素分析,主要结论如下所示。

(1) 2000-2017 年黄河流域 $PM_{2.5}$ 年均浓度总体呈现出波动增长的演变趋势,其值从 2000 年的 $42.65 \mu g/m^3$ 波动增加到 2017 年的 $50.06 \mu g/m^3$,空气污染状况不容乐观。具体而言,2000-2007 年可视为 $PM_{2.5}$ 年均浓度的增长阶段,2008 年以后 $PM_{2.5}$ 浓度总体处于波动变化之中。结合可视化分析可知,黄河流域 $PM_{2.5}$ 浓度存在较明显的大气污染的高值和低值集聚区。其中低值区稳定分布在地广人稀且生态环境较好的内蒙古中部和西南部高原地区,近年来黄土高原中部地带的空气状况也有所改善;高值区一方面分布在自然条件较差的西北内陆地区,另一方面分布在人口稠密、能源需求量大、经济相比较发达的地带。

(2) 标准差椭圆结果显示,黄河流域 $PM_{2.5}$ 污染总体呈现出较微弱的“西北—东南”方向的空间分布格局,该地理空间走向大致与黄河流域的区域形态、各地人口分布以及经济实力差异相关,污染重心主要位于生态环境质量严峻的山西省临汾市境内。从椭圆面积来看, $PM_{2.5}$ 污染的主要范围有所扩大,覆盖区域从甘肃省东南部到山东省中西部,包含了绝大多数经济发展相对较好以及人口较稠密的地市;结合长半轴以及短半轴标准差可知,黄河流域 $PM_{2.5}$ 浓度在地理空间上呈现扩张分散化的趋势,空间溢出效应有所显现。

(3) 由地理探测器结果可知,各经济社会因素对黄河流域 $PM_{2.5}$ 污染的影响存在差异。从 q 值大小来看,各影响因素对 $PM_{2.5}$ 的作用强度由高到低分别为人口密度、工业化水平、外商投资、公共交通、建成区面积和科技支出。与多数研究较一致,人口密度和工业化水平解释力较强且对 $PM_{2.5}$ 污染具有明显的增促进作用;对黄河流域整体而言,公共交通和建成区面积的作用强度较一致且与空气污染呈现正相关效应;而外商投资和科技支出的作用效果因地区发展情况和投入不同而存在差异。

5.2 建议

根据以上分析,本文就黄河流域 $PM_{2.5}$ 污染治理工作提出如下方面的对策建议:

(1) 国家战略方针等政策因素会对大气污染产生一定冲击,其中生态文明建设和大气

污染防治的相关政策对空气质量的提升作用尤为显著。目前黄河流域以及其他地区的 $\text{PM}_{2.5}$ 污染情况仍不稳定,因此从顶层设计出发,将大气污染治理作为一个全局性、长期性的发展战略,建立从中央到地方的政策体系和治理机制,运用组织和制度资源打破行政区域的界限,以大气环境功能区域为单元,让区域内的省市之间从区域整体的需要出发,共同规划和实施大气污染控制方案,统筹安排,加强联防联控,在治理过程中形成不同省份、区域乃至城市间的通力协作机制,并推动政府、企业和居民等多元主体协同治理 $\text{PM}_{2.5}$ 污染,这将有利于实现黄河流域生态保护与高质量发展这一国家战略。

(2) 黄河流域各地 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的影响因素在作用强度和效果上存在差异,这也要求黄河流域在推动大气污染防治的进程中,对各地要采取差异化的推进策略。比如黄河流域的西北部地区因荒漠较多而在自然来源方面使得 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度较高,因此应着重加强此类地区的自然生态保护。针对产业发展加剧大气污染的问题,一方面可以从全国的角度出发,制定产业负面清单,对地区行业 and 外资引入实施严格的环保准入政策;另一方面要大力增加科技创新投入以促进产业结构优化和转型升级,从而有利于培育新业态、新动能,加速新旧动能转化进程以最终实现经济高质量发展。此外,在推动城镇化发展以及进行城市规划时,一方面应加强对绿地的管理和维护,以提高植被所带来的空气净化作用;另一方面在改善城市道路状况以及大力推进汽车使用清洁能源的同时,还可通过发展轨道交通、构建共享单车和共享汽车等方法从交通基础设施的角度为城市大气污染治理提供新的解决思路。

5.3 展望

科学判析并掌握 $\text{PM}_{2.5}$ 污染的时空规律、分布特征与影响因素是促进国家生态文明建设以及高质量发展的重要保障。本文运用 2000-2017 年大气遥感反演 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度数据进行研究,不仅对已有研究结论进行了验证和补充,更重要的是弥补了黄河流域相关研究的空白。然而由于文章结构、研究方法以及数据获取等方面的原因,本文在影响因素实证分析中仅考虑了部分经济社会因素,而在时间尺度以及自然地理因素方面并未涉及,也尚未考虑各影响因素之间的交互耦合作用。 $\text{PM}_{2.5}$ 的分析及防控工作涉及范围较广,因此在今后的研究中应注重不同学科之间的跨界交流合作,研究尺度上既可聚焦县域单元等微观尺度,也可进行不同流域间大气污染的对比分析,此外再通过深入分析 $\text{PM}_{2.5}$ 形成机理、影响机制及传播路径等,最终可为区域大气污染治理提供更好的建议和政策支持。

参考文献 (References)

- [1] Guan D, Su X, Zhang Q, et al. The socioeconomic drivers of China's primary $\text{PM}_{2.5}$ emissions. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(2): 024010.
- [2] Watson J G. Visibility: Science and regulation. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2002, 52(6): 628-713.
- [3] Grell G, Freitas S R, Stuefer M, et al. Inclusion of biomass burning in WRF-Chem: impact of wildfires on weather forecasts. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2011, 11(11).
- [4] Chen J, Zhao C S, Ma N, et al. A parameterization of low visibilities for hazy days in the North China Plain[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2011, 11(11).
- [5] Cesari D, Donato A, Conte M, et al. An inter-comparison of $\text{PM}_{2.5}$ at urban and urban background sites: Chemical characterization and source apportionment. *Atmospheric Research*, 2016, 174: 106-119.
- [6] Feng S, Gao D, Liao F, et al. The health effects of ambient $\text{PM}_{2.5}$ and potential mechanisms. *Ecotoxicology and environmental safety*, 2016, 128: 67-74.
- [7] 王振波,方创琳,许光,潘月鹏.2014 年中国城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的时空变化规律. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720-1734. [Wang Z, Fang C, Xu G, Pan Y. Spatial-temporal characteristics of the $\text{PM}_{2.5}$ in China in 2014. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(11): 1720-1734.]
- [8] 李卫东,黄霞.北京市雾霾的社会经济影响因素实证研究. *首都经济贸易大学学报*, 2018, 20 (4): 58-68. [Li

- W, Huang X. Empirical study on the social and economic influence factors of Beijing's haze. *Journal of Capital University of Economics and Business*, 2018,20 (4):58-68.]
- [9] Li L, Qian J, Ou C Q, et al. Spatial and temporal analysis of Air Pollution Index and its timescale-dependent relationship with meteorological factors in Guangzhou, China, 2001–2011. *Environmental Pollution*, 2014, 190: 75-81.
- [10] 董继元,王式功,尚可政.降水对中国部分城市空气质量的影响分析.干旱区资源与环境,2009,23(12):43-48.[Dong J, Wang S, Shang K. Influence of precipitation on air quality in several cities, China. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2009,23(12):43-48.]
- [11] 陈杰,赵素平,殷代英,屈建军.沙尘天气过程对中国北方城市空气质量的影响.中国沙漠,2015,35 (2):423-430.[Chen J, Zhao S, Yin D, Qu J. Effect of dust process on air quality in cities of northern China. *Journal of Desert Research*, 2015,35 (2):423-430.]
- [12] 李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜.中国空气污染指数变化特征及影响因素分析.环境科学,2012,33 (6):1936-1943.[Li X, Zhang M, Wang S, Zhao A, Ma Q. Variation characteristics and influencing factors of air pollution index in China. *Environmental Science*, 2012,33 (6):1936-1943.]
- [13] 周亮,周成虎,杨帆,王波,孙东琪. 2000-2011 年中国 $PM_{2.5}$ 时空演化特征及驱动因素解析.地理学报,2017,72(11):2079-2092.[Zhou L, Zhou C, Yang F, Wang B, Sun D. Spatial-temporal evolution and the influencing factors of $PM_{2.5}$ in China between 2000 and 2011. *Acta Geographica Sinica*, 2017,72(11):2079-2092.]
- [14] Lin X, Wang D. Spatiotemporal evolution of urban air quality and socioeconomic driving forces in China. *Journal of Geographical Sciences*, 2016, 26(11): 1533-1549.
- [15] 杨昆,杨玉莲,朱彦辉,李岑,孟超.中国 $PM_{2.5}$ 污染与社会经济的空间关系及成因.地理研究,2016,35 (6):1051-1060.[Yang K, Yang Y, Zhu Y, Li C, Meng C. Social and economic drivers of $PM_{2.5}$ and their spatial relationship in China. *Geographical Research*, 2016,35 (6):1051-1060.]
- [16] Yang D, Wang X, Xu J, et al. Quantifying the influence of natural and socioeconomic factors and their interactive impact on $PM_{2.5}$ pollution in China[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 241: 475-483.
- [17] 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.经济地理,2018,38 (8):11-18. [Li G, Qin J, He R. Spatial-temporal evolution and influencing factors of China's $PM_{2.5}$ Pollution. *Economic Geography*, 2018,38 (8):11-18]
- [18] 王振波,梁龙武,王旭静.中国城市群地区 $PM_{2.5}$ 时空演变格局及其影响因素.地理学报,2019,74(12):2614-2630.[Wang Z, Liang L, Wang X. Spatial-temporal evolution patterns and influencing factors of $PM_{2.5}$ in Chinese urban agglomerations. *Acta Geographica Sinica*, 2019,74(12):2614-2630.]
- [19] 贺祥,林振山,刘会玉,齐相贞.基于灰色关联模型对江苏省 $PM_{2.5}$ 浓度影响因素的分析.地理学报,2016,71 (7):1119-1129.[He X, Lin Z, Liu H, Qi X. Analysis of the driving factors of $PM_{2.5}$ in Jiangsu province based on grey correlation model. *Acta Geographica Sinica*, 2016,71 (7):1119-1129.]
- [20] 王占山,李云婷,陈添,张大伟,孙峰,潘丽波.2013 年北京市 $PM_{2.5}$ 的时空分布.地理学报,2015,70 (1):110-120.[Wang Z, Li Y, Chen T, Zhang D, Sun F, Pang L. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ in Beijing in 2013. *Acta Geographica Sinica*, 2015,70 (1):110-120.]
- [21] 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. Spatial-temporal characteristics of $PM_{2.5}$ and its influencing factors in the Yangtze River Economic Belt. *China Population, Resources and Environment*, 2017,27 (1):91-100.]
- [22] 曾浩,丁镭.长江经济带城市雾霾污染 $PM_{2.5}$ 时空格局演变及影响因素研究.华中师范大学学报(自然科学版),2019,53 (5):724-734.[Zen H, Ding L. Study on spatial-temporal pattern evolution and influencing factors of urban haze pollution $PM_{2.5}$ in the Yangtze River Economic Belt. *Journal of Central China Normal University(Natural Sciences)*, 2019,53 (5):724-734.]

- [23] 习近平.在黄河流域生态保护和高质量发展座谈会上的讲话.奋斗,2019(20):4-10.[Xi J. Speech at the symposium on ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin. Fen Dou,2019(20):4-10.]
- [24] Guo J P, Zhang X Y, Wu Y R, et al. Spatial-temporal variation trends of satellite-based aerosol optical depth in China during 1980–2008. *Atmospheric Environment*, 2011, 45(37): 6802-6811.
- [25] Wu D. Hazy weather research in China in the last decade: A review. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, 32(2): 257-269.
- [26] 王劲峰,徐成东.地理探测器:原理与展望.地理学报,2017,72 (1):116-134.[Wang J, Xu C. Geodetector: Principle and prospective. *Acta Geographica Sinica*,2017,72 (1):116-134.]
- [27] 刘海猛,方创琳,黄解军,朱向东,周艺,王振波,张蕾.京津冀城市群大气污染的时空特征与影响因素解析.地理学报,2018,73 (1):177-191.[Liu H, Fang C, Hung J, Zhu X, Zhou Y, Wang Z, Zhang Q. The spatial-temporal characteristics and influencing factors of air pollution in Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration. *Acta Geographica Sinica*, 2018,73 (1):177-191.]
- [28] Lefever D W. Measuring geographic concentration by means of the standard deviational ellipse. *The American Journal of Sociology*, 1926, (1): 88-94.
- [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.[State Ministry of Environmental Protection. Environmental air quality standards (for trial implementation). National environmental protection standards of the People's Republic of China(GB3095-2012), 2012-02-29.]
- [30] 徐超,王云鹏,黎丽莉.中国 1998—2012 年 PM_{2.5} 时空分布与能源消耗总量关系研究.生态科学,2018,37 (1):108-120.[Xu C, Wang Y, Li L. Study on spatiotemporal distribution of PM_{2.5} in China and its relationship to energy consumption based the remote sensing data from 1998 to 2012. *Ecological Science*, 2018,37 (1):108-120.]
- [31] 刘昕,辛存林.陕甘宁地区城市空气质量特征及影响因素分析.环境科学研究,2019,32(12):2065-207.[Liu X, Xin C. Analysis of urban air quality characteristics and influencing factors in Shanxi-Gansu-Ningxia region. *Research of Environmental Sciences*, 2019,32(12):2065-207.]
- [32] 闫世明,王雁,郭伟,李莹,张逢生.太原市秋冬季大气污染特征和输送路径及潜在源区分析.环境科学,2019,40(11):4801-4809.[Yan S, Wang Y, Guo W, Li Y, Zhang F. Characteristics, transportation, pathways, and potential sources of air pollution during autumn and winter in Taiyuan. *Environmental Science*, 2019,40(11):4801-4809.]
- [33] 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹.郑州市冬季大气 PM_{2.5} 传输路径和潜在源分析.环境科学,2019,40 (1):86-93.[Duan S, Jiang N, Yang L, Zhang R. Transport pathways and potential sources of PM_{2.5} during the winter in Zhengzhou. *Environmental Science* ,2019,40 (1):86-93.]
- [34] 王芳龙,李忠勤,尤晓妮,刘峰,周茜,全纪龙,张昕,汪芳琳,马珊,张添姿.2015—2017 年天水市大气污染物变化特征及来源分析.环境科学学报,2018,38(12):4592-4604.[Wang F, Li Z, You X, Li F, Zhou X, Tong J, Zhang X, Wang F, Ma S, Zhang T. Variation characteristics and source analysis of atmospheric pollutants in Tianshui from 2015 to 2017. *Acta Scientiae Circumstantiae*,2018,38(12):4592-4604.]
- [35] Peng W, Kuang T, Tao S. Quantifying influences of natural factors on vegetation NDVI changes based on geographical detector in Sichuan, western China. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 233: 353-367.
- [36] 王少剑,高爽,陈静.基于 GWR 模型的中国城市雾霾污染影响因素的空间异质性研究.地理研究,2020,39 (3):651-668.[Wang S, Gao S, Chen J. Spatial heterogeneity of driving factors of urban haze pollution in China based on GWR model. *Geographical Research*,2020,39 (3):651-668.]
- [37] 孙传旺,罗源,姚昕.交通基础设施与城市空气污染——来自中国的经验证据.经济研究,2019,54 (8):136-151.[Sun C, Luo Y, Yao X. The Effects of transportation infrastructure on air quality: evidence from empirical analysis in China. *Economic Research Journal*, 2019,54 (8):136-151.]

- [38] 关伟,许淑婷,郭岫垚.黄河流域能源综合效率的时空演变与驱动因素.资源科学,2020,42 (1):150-158.[Guan W, Xu X, Guo X. Spatial-temporal change and driving factors of comprehensive energy efficiency in the Yellow River Basin. Resources Science, 2020,42 (1):150-158.]
- [39] 严雅雪,齐绍洲.外商直接投资对中国城市雾霾(PM_{2.5})污染的时空效应检验.中国人口·资源与环境,2017,27 (4):68-77. [Yan Y, Qi S. Time-space effect test on foreign direct investment and PM_{2.5} pollution at city level. China Population, Resources and Environment, 2017,27 (4):68-77.]
- [40] 姜磊,周海峰,柏玲.外商直接投资对空气污染影响的空间异质性分析——以中国 150 个城市空气质量指数(AQI)为例.地理科学,2018,38 (3):351-360.[Jiang L, Zhou H, Bai L. Spatial heterogeneity analysis of the influence of foreign direct investment on air pollution -- A case study of air quality index (AQI) in 150 Chinese cities. Scientia Geographica Sinica,2018,38 (3):351-360.]
- [41] 康乾.外商直接投资对中国环境污染的影响.商务部国际贸易经济合作研究院,2018.[Kang Q. The impact of foreign direct investment on environmental pollution in China. Academy of International Trade and Economic Cooperation, Ministry of Commerce,2018]
- [42] 张倩倩,张瑞,张亦冰.环境规制下外商直接投资对环境质量的影响——基于不同行业组的比较研究.商业研究,2019 (5):61-68.[Zhang Q, Zhang R, Zhang Y. The influence mechanism of foreign direct investment on environmental quality under environmental regulation: a comparative study based on different industry groups. Commercial Research, 2019 (5):61-68.]
- [43] Qiao X, Jaffe D, Tang Y, et al. Evaluation of air quality in Chengdu, Sichuan Basin, China: are China's air quality standards sufficient yet?. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(5): 250.
- [44] 程中华,刘军,李廉水.产业结构调整与技术进步对雾霾减排的影响效应研究.中国软科学,2019 (1):146-154.[Chen Z, Liu J, Li L. Research on the effects of industrial structure adjustment and technical progress on haze reduction. China Soft Science, 2019 (1):146-154.]

Analysis on the Spatial-temporal Evolution Characteristics of PM_{2.5} and Its Influencing Factors in the Yellow River Basin

Li Heng¹ Han Yan^{1,2}

(1.School of Economics and Management, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou, 730070;

2. Laboratory of Economic Geography and Regional Development, Institute of Geographic Sciences and Resources, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100101)

Abstract: Studying PM_{2.5} pollution in the Yellow River Basin is of great significance for winning the battle against air pollution and promoting ecological progress and high-quality development in the Yellow River Basin. Taking the remote sensing inversion data of PM_{2.5} from 2000 to 2017, this paper analyzes the spatial-temporal evolution characteristics and influencing factors of PM_{2.5} in the Yellow River Basin by using the methods of standard deviation ellipse and geographical detector. The major results were showed as follows. ① From 2000 to 2017, PM_{2.5} concentration in the Yellow River Basin showed a trend of rapid increase and then fluctuated, so the situation of air pollution is not optimistic. ② The spatial aggregation of PM_{2.5} in the Yellow River Basin is significant, and the low value areas are stably distributed in the central Inner Mongolia and the southwest plateau. On the one hand, the high value areas are distributed in the northwest inland with poor natural conditions, on the other hand, they are concentrated in the areas with high intensity of human activities. ③ The results show that PM_{2.5} pollution in the Yellow River Basin generally presents a distribution pattern in the direction of "northwest to southeast", and its concentration tends to be dispersed in geographical space, that is, the main scope of pollution has been expanded. ④ Population density, industrialization level, foreign investment, scientific research expenditure and

other economic social factors have significant influence on $PM_{2.5}$ concentration, but their intensity and direction of action are different.

Key words: $PM_{2.5}$; haze pollution; spatial-temporal evolution; geographic detector; the Yellow River Basin

