



信阳师范学院学报(自然科学版)

Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)

ISSN 1003-0972,CN 41-1107/N

《信阳师范学院学报(自然科学版)》网络首发论文

题目: 中国空气质量空间格局影响因素研究
作者: 张向敏, 罗燊, 李卓凡, 贾琳, 翟慧敏, 王黎明
收稿日期: 2019-04-30
网络首发日期: 2019-11-21
引用格式: 张向敏, 罗燊, 李卓凡, 贾琳, 翟慧敏, 王黎明. 中国空气质量空间格局影响因素研究[J/OL]. 信阳师范学院学报(自然科学版).
<http://kns.cnki.net/kcms/detail/41.1107.N.20191121.1352.002.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。

中国空气质量空间格局影响因素研究

张向敏^{1,2*}, 罗 燊¹, 李卓凡¹, 贾 琳¹, 翟慧敏², 王黎明²

(1.华中师范大学 地理过程分析与模拟湖北省重点实验室,湖北 武汉 430079;

2.信阳师范学院 地理科学学院,河南 信阳 464000)

摘 要:以行政区划中的地区为最小空间单元,利用 2015 年中国 343 个地区逐日空气质量指数(AQI)数据,分析了中国空气污染的空间格局,并利用地理探测器模型定量评价了驱动因素的影响强度。结果表明:①中国的空气污染具有“双中心”的空间集聚特征,分别存在华北区和西北区两个高值中心与华南区和东北区两个低值中心。②影响我国 AQI 分布的自然因素比较复杂,需要具体问题具体分析;影响我国 AQI 分布的社会经济因素可分为人口、工业、生活消费和环境维护 4 种类型。该研究结果对区域大气环境综合治理有一定科学参考价值。

关键词:空气质量指数;空间格局;影响因素;地理探测器

中图分类号:K901.8

文献标志码: A

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Impact Factors Research of Spatial Pattern of Air Quality in China

ZHANG Xiangmin^{1,2*}, LUO Shen¹, LI Zhuofan¹, JIA Lin¹, ZHAI Huimin², WANG Liming²

(1.Key Laboratory for Geographical Process Analysis & Simulation of Hubei Province,

Central China Normal University, Wuhan 430079, China;

2.College of Geographic Sciences, Xinyang Normal University, Xinyang 464000, China)

Abstract: Based on the daily air quality index (AQI) data of 343 districts in China in 2015, the spatial pattern of air pollution in China is analyzed by taking the districts in administrative divisions as the smallest spatial unit. Furthermore, the paper also quantitatively evaluates the influence intensity of driving factors by using geographic detector model. The results showed that: ① Air pollution in China has the characteristics of "dual-center" spatial agglomeration, including two high-value centers in North China and Northwest China, and two low-value centers in South China and Northeast China. Air pollution in China has the characteristic of "two centers" spatial agglomeration with two high-value centers in North China and Northwest China and two low-value centers in South China and Northeast China. ② The natural factors that affect the distribution of AQI in China are quite complex, which requires a specific analysis of specific problems. The socio-economic factors affecting the distribution of AQI in China can be divided into four categories: population, industry, living consumption and environmental maintenance. The result is a scientific reference for regional air environmental comprehensive management.

Key words: air quality index; spatio-temporal pattern; impact factors; geodetector

0 引言

近年来,中国经济快速增长,国家经济实力不断增强,于 2010 年成为世界第二大经济体。改革开放以来,随着经济快速增长,大量资源和能源被消耗,随之而来的是严重的环境污染和破坏,从而使人类面临着前所未有的环境污染防治压力。其中,在大气环境方面,已有研究发现,随着大气污染

物排放量的增加,大气污染状况愈发严重^[1,2],影响了人类赖以生存的大气环境、生产生活及公众健康^[3-5]。为了应对日益严峻的大气环境问题,国家不断制定、修订相应的法律法规,采取切实可行的大气污染防治措施,空气质量得到了明显改善。

同样,大气污染及防治问题也是学术界关注的焦点,地理学、生态学、大气科学、环境科学与工程

收稿日期:2019-04-30;修订日期:2019-09-06; * .通信联系人, E-mail: xyzxm@126.com

基金项目:国家自然科学基金项目(41671179, 41701187);河南省哲学社会科学规划项目(2016BJJ046, 2017CJJ093);河南省教育厅人文社会科学研究项目(2019-ZZJH-178);信阳师范学院青年骨干教师资助计划;信阳师范学院青年科研基金项目资助

作者简介:张向敏(1983—),女,河南新乡人,讲师,博士,主要从事区域发展与城乡规划研究。

等领域的学者对相关问题开展了大量研究^[5]. 地理学领域的研究内容主要有:不同空间尺度空气质量时空格局^[3,6-8],大气污染物时空分布特征^[9-11],从社会经济^[5]、自然^[8]以及综合要素^[12]等视角评价空气质量影响因素. 关于空气质量相关研究的技术和方法不断趋于多元化^[13-15].

针对空气质量影响因素开展的研究已取得丰富成果. 但是,从数据来源看,这些研究多基于分辨率较低的遥感卫星数据推演,空气质量时空格局较难精确度量,且空气污染模式的空间依赖性和异质性研究较少;从空间尺度看,大多研究基于不同尺度的行政区划单元、典型区域或城市,较少基于全国尺度从区域的视角进行空气质量影响因素研究;从影响因素来看,前人研究较少结合自然和社会经济因素,影响因素对空气质量的作用方向仍没有比较统一的认识.

基于此,本文拟利用 2015 年中国 343 个地区逐日空气质量指数(AQI)数据,基于陆地表层系统九大区域视角对全国空气质量空间分布特征进行探究. 在此基础上,进一步利用地理探测器模型定量评价影响中国空气质量空间差异的自然和社会经济因素,以期为中国尤其是区域的大气环境综合治理提供科学依据.

1 研究区域与数据来源

1.1 研究区域

根据 2015 年中国行政区划,以地级市为基本空间单元,将全国划分为 343 个地区(不包括香港、澳门和台湾),其中包括 4 个省辖市和 4 个省辖县级市. 另外,需要说明的是,海南省所有省辖县作为一个基本空间单元. 借鉴前人研究成果,中国陆地表层系统被划分为九大区域^[16]:东北区、华北区、东南区、华南区、内蒙古区、陇陕晋区、西南区、西北区和青藏区,基于九大区域这一视角开展中国空气质量空间格局影响因素研究.

1.2 数据来源

本文数据来源:(1)2015 年 343 个地区的逐日空气质量指数(AQI)数据来源于国家生态环境部数据中心(<http://www.mee.gov.cn/>),部分缺失数据来源于地方环保部门官方网站.(2)空间数据来源于国家基础地理信息中心提供的 1:400 万矢量地图.(3)解释变量数据包含自然、社会经济因素. 自然因素数据中,DEM 数据从地理空间数据云下载,空间分辨率为 30 m. 气象资料来自国家气象信息中心(<http://data.cma.cn/>),包括 2015 年

722 个国家气象站的海拔、平均降水量、平均相对湿度、平均风速、平均气温、平均气压、平均日照时数 7 个因素. 社会经济因素数据来自各省统计年鉴《2016 年中国城市统计年鉴》,包括人口密度、人均地区生产总值、第二产业比重、工业烟粉尘排放量、城乡居民生活消费用电量、建成区绿化覆盖率、每万人拥有公共汽车和城市环境维护建设投资等 8 个因素.

1.3 地理探测器

地理探测器(GeoDetector,GD)是探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法,其作为一种探测地理要素空间格局成因和机理的重要方法被逐渐应用于社会经济、生态环境等相关领域研究中^[12,13]. 地理探测器不考虑影响因素之间的多重共线性(影响空气质量的许多因素之间存在高度相关),因而可以识别出每个影响因素的相对重要性.其模型如下:

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

式中: $P_{D,H}$ 为 AQI 驱动因素解释力(q statistic); D 为 AQI 日平均浓度变化的驱动因素; H 为某种因素的分类个数; L 为因素分类; σ^2 与 σ_h^2 分别为研究区域 AQI 变量和 h 类因素的方差; N 和 N_h 分别为全区和 h 类上样本的个数. $P_{D,H}$ 取值区间为 $[0,1]$,数值越大表明该因素对 AQI 值变化解释能力越强,数值为 0,表明分类因素与 AQI 变化完全无关;数值为 1,说明分类因素可以完全解释 AQI 空间分异特征.

2 空气质量的空间格局

根据《环境空气质量指数(AQI)技术规范(试行)》(HJ633~2012)规定,空气质量被划分为 6 个等级:优(0~50)、良(51~100)、轻度污染(101~150)、中度污染(151~200)、重度污染(201~300)和严重污染(>300)^[7]. 为明晰空气质量空间格局年内演变特征,基于空气质量等级划分,呈现 2015 年 1—12 月份 AQI 空间分布格局(图 1).

2015 年中国 AQI 的分布呈现明显的空间集聚性,主要是高值集聚区和低值集聚区. AQI 高值集聚区,呈现以“西北区—华北区”为中心的双核分布特征(图 1). 2015 年,新疆和田、喀什地区与华北平原的京津地区、河北中南部、山东中西部、河南全省 AQI 日均值在 100 以上,达到污染水平,并向四周递减. AQI 低值集聚区,呈现以“华南区—东

北区”为中心的双核分布特征, 低值集聚区核心月份变化明显, 整体呈现双核或单核特征. 空气污染的冷点集中分布在东北区北部、东南区南部、华南区、西南区南部和青藏高原东南部等边疆地区.

PM_{2.5}、PM₁₀、O₃是我国排名前三位的空气污

染物. 从大气污染物的空间分布分析, 东北、华北、东南、华南和西南区以 PM_{2.5} 为首要污染物出现的次数最多, 内蒙古、陇陕晋、青藏和西北区以 PM₁₀ 为首要污染物出现的次数最多, 呈现出较为明显的东西分异特征, 分界线大致与“胡焕庸线”接近.

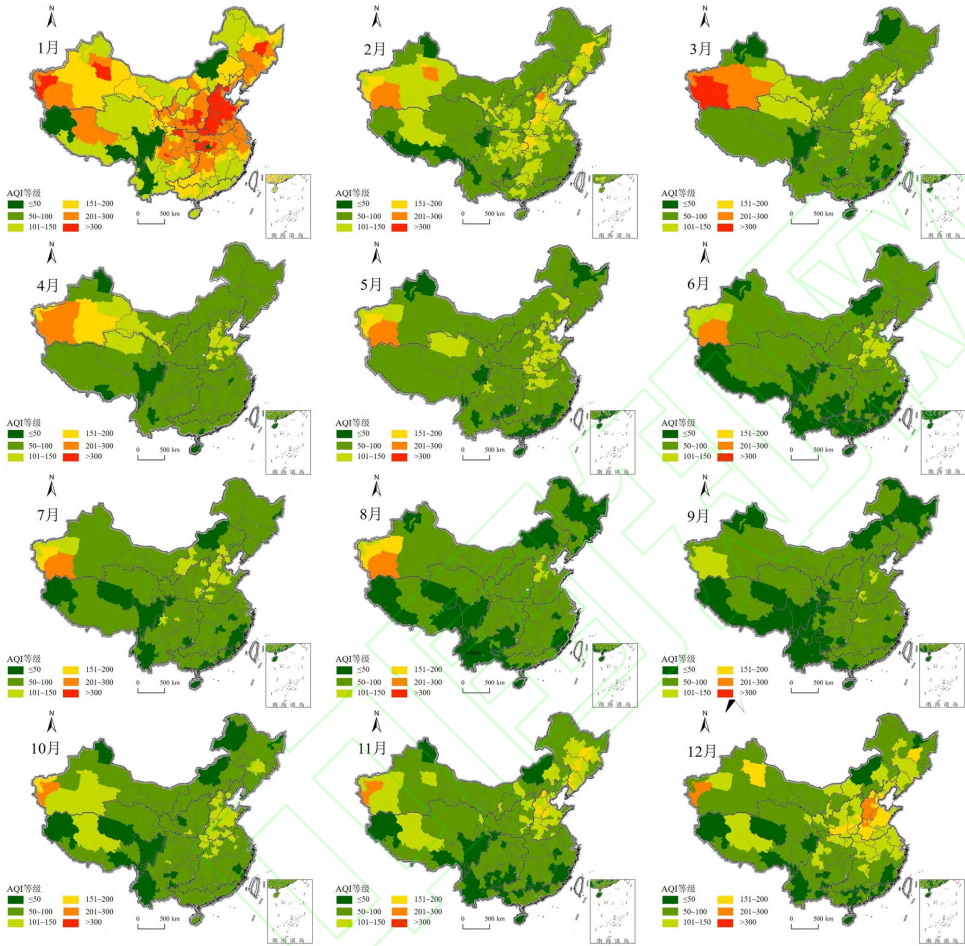


图 1 2015 年中国月均 AQI 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of China monthly average AQI in 2015

3 影响因素

中国空气质量空间格局的成因复杂, 驱动因素多样, 可以分为自然因素和社会经济因素两个方面. 从自然因素来看, 地形地貌与气象条件对空气污染物的浓度具有重要影响, 尤其是对短时间污染过程的影响更为明显. 本文选取海拔(X_{11})、平均降水量(X_{12})、平均相对湿度(X_{13})、平均风速(X_{14})、平均气温(X_{15})、平均气压(X_{16})、平均日照时数(X_{17}) 7 个因素. 从社会经济因素来看, 人类活动对空气质量的影响十分显著, 本文选取人口密度(X_{21})、人均地区生产总值(X_{22})、第二产业比重(X_{23})、工业烟粉尘排放量(X_{24})、城乡居民生活消费用电量(X_{25})、建成区绿化覆盖率(X_{26})、每万人拥有公共汽车(X_{27})、城市环境维护建设投资

(X_{28}) 8 个因素对应探究人口集聚、经济发展、工业化、工业污染、生活消费、城市绿化、公共交通、环境维护等对空气质量变化的影响. 获取 343 个地区 2015 年截面数据, 共计 5488 个样本, 利用地理探测器探测空间分异特征与规律, 揭示其背后的自然和社会经济驱动因素(表 1, 图 2).

3.1 自然因素对空气质量的影响

(1)地形. 封闭地形不利于空气污染物扩散, 平坦开阔地形有利于空气污染物的扩散^[12]. 西南(0.427)、西北(0.354)和内蒙古区(0.341)三区域 AQI 受地形影响大. 三个地区海拔高, 具有高原、大盆地等地势较缓的地形, 有利于空气污染物的扩散.

(2)降水. 降水对空气污染物具有清除作用,

降水时间越长对空气污染物的清除作用越明显. 青藏(0.632)、陇陕晋(0.542)和华南区(0.489)三区域 AQI 水平受降水影响显著.

(3)相对湿度. 相对湿度大则会使空气中的细小颗粒物附着在水汽中,在空气中停留,此时大气条件稳定,会使得 $PM_{2.5}$ 、 PM_{10} 浓度增大. 青藏区(0.659)的 AQI 水平受相对湿度的影响最大.

(4)风速. 风速与污染物浓度整体上呈明显负相关,风可以加速污染物扩散,稀释污染物浓度. 但风也会携带地表松散物质,扩大污染范围. 华南(0.489)、陇陕晋(0.466)和内蒙古区(0.375)的 AQI 水平受风速的影响较大.

(5)气温. 气温与大气污染物的总体关系是气温越高,对流越旺盛,越有利于污染物扩散,反之则不利于污染物扩散^[12]. 华南(0.644)、陇陕晋(0.568)和西北区(0.546)三区域 AQI 水平受气温影响显著. 但气温升高也促进污染物质的化合作用,

形成新污染物,加重污染程度.

(6)气压. 地面气压与大气污染物浓度有较好正相关关系. 在低压系统控制下,低层辐合风速大,利于污染物稀释扩散,当高压系统控制时情况相反. 气压是影响内蒙古区 AQI 的首位自然因素(0.617). 冬季,这一地区靠近西伯利亚高压,在高压系统控制下,低层辐散,空气污染物难以扩散与稀释. 同时由于下垫面植被稀疏,多沙尘天气,可吸入颗粒物污染十分严重. 而夏季,虽然内蒙古区在低气压系统控制下,但由于地处内陆,大陆性气候显著,气温升高为空气中的污染物化合作用提供了良好条件,由此导致内蒙古区全年 AQI 走高.

(7)日照. 日照对空气污染物的浓度影响除了间接通过气温影响,还可以通过直接促进大气化学污染物质的化合作用影响空气质量. 东北(0.389)和华南区(0.353)的 AQI 水平受日照的影响较大.

表 1 驱动要素地理探测分析表

Tab. 1 Analysis of driving factors derived from Geographic Detection

<i>q</i>	全国	东北区	华北区	东南区	华南区	内蒙古区	陇陕晋区	西南区	西北区	青藏区
X_{11}	0.041	0.126	0.191	0.078	0.101	0.341	0.144	0.427	0.354	0.243
X_{12}	0.253	0.160	0.277	0.395	0.489	0.430	0.546	0.225	0.202	0.632
X_{13}	0.017	0.230	0.080	0.080	0.221	0.179	0.083	0.039	0.328	0.659
X_{14}	0.136	0.331	0.284	0.141	0.489	0.375	0.466	0.295	0.308	0.219
X_{15}	0.301	0.290	0.258	0.381	0.644	0.368	0.568	0.304	0.546	0.282
X_{16}	0.016	0.139	0.087	0.104	0.207	0.617	0.253	0.077	0.105	0.495
X_{17}	0.017	0.389	0.155	0.108	0.353	0.290	0.060	0.059	0.215	0.217
X_{21}	0.186	0.533	0.358	0.368	0.177	0.135	0.310	0.343	0.182	0.221
X_{22}	0.057	0.245	0.106	0.077	0.063	0.355	0.171	0.261	0.083	0.140
X_{23}	0.083	0.593	0.231	0.054	0.107	0.476	0.074	0.437	0.064	0.269
X_{24}	0.084	0.250	0.097	0.061	0.160	0.132	0.284	0.021	0.030	0.060
X_{25}	0.033	0.181	0.087	0.148	0.129	0.140	0.073	0.199	0.346	0.176
X_{26}	0.028	0.051	0.077	0.066	0.085	0.395	0.024	0.110	0.145	0.124
X_{27}	0.004	0.122	0.065	0.109	0.052	0.032	0.143	0.186	0.221	0.006
X_{28}	0.049	0.345	0.037	0.090	0.247	0.409	0.352	0.144	0.345	0.530

3.2 社会经济因素对空气质量的影响

(1)人口驱动型. 2015 年,我国常住人口城镇化率达 56.1%,强烈的人类活动深刻地影响着大气环境. 城镇化建设过程中造成的扬尘、汽车增加导致的尾气排放、能源消耗与燃煤取暖均是 AQI 增长的重要驱动因素. AQI 高值区中除了受自然因素强烈影响的新疆地区以外,华北高值区基本与中国人口密度空间分布一致. 全国范围内,AQI 高值区的形成与城镇化建设关系紧密,从区域上看,华北和东南区 AQI 与人口密集区域空间高度重合.

(2)工业驱动型. 2015 年,我国第二产业在国民经济中的比重为 40.9%,地理探测器得出的结果显示,东北、内蒙古和西南区第二产业比重因素的

q 值分别为 0.593、0.476 和 0.437,并且 q 值是所有社会经济影响因素中的首位因素. 表明这三个区域 AQI 值的变化与工业发展密切相关. 东北地区是我国老工业基地,工业发展历史悠久,内蒙古地区有得天独厚的自然资源条件,重工业发展水平高,西南地区特别是四川盆地重工业发展比较快,这三个地区的大气污染受工业发展的影响较大.

(3)生活消费驱动型. 根据地理探测器得到的结果,西北区城乡居民生活消费用电量因素为所有社会经济影响因素中的首位因素(0.346),同时高于其他八个区域的 q 值. 西北区生活消费用电量从全国范围来看比较低,但与周围地区相比比较高,这与区域人口分布和国民经济发展水平有关,用电

量增加会间接增加能源消耗和空气污染物排放, 这一因素对西北地区 AQI 值的变化起到主导作用。

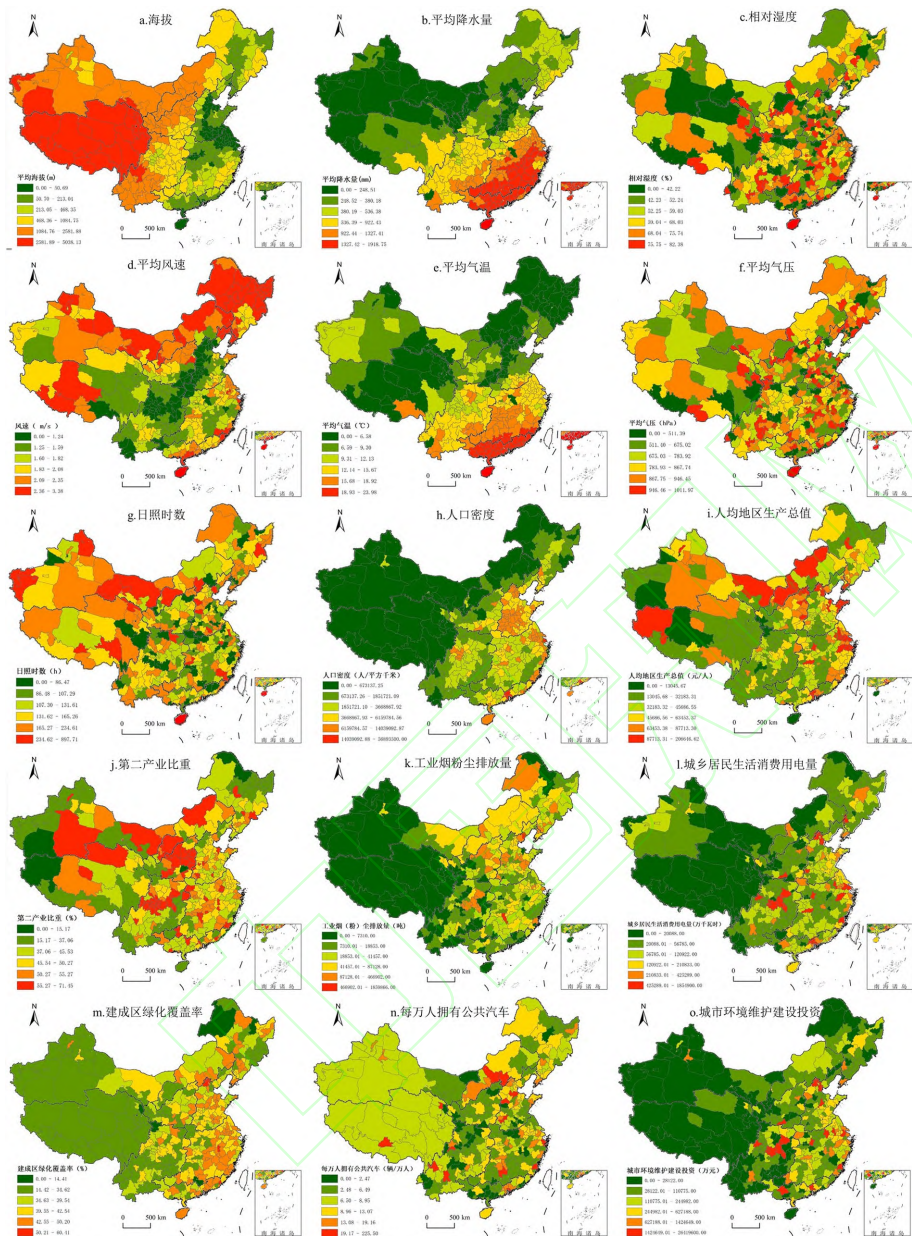


图 2 空气质量影响因素的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of air quality influencing factors

(4)环境维护驱动型。影响空气质量的社会经济因素不仅有负面驱动的因素,同时存在正面驱动因素,地方通过增加环境维护资金减少城市固体废物、废气排放,促进城市空气质量改善。2015 年,我国城市环境维护建设投资总额达到 12070 亿,占国内生产总值的 1.7%。根据地理探测器得到的结果,青藏、陇陕晋和华南区 AQI 受环境维护因素的影响比较大,q 值分别为 0.530、0.352 和 0.247。青藏区主要空气污染物—可吸入颗粒物与臭氧的减少可能与其环境维护投入有关。近五年,青海和西藏两省环境维护投入资金占地区生产总值比重以每年平均 0.4% 的增速增长,高于全国平均 0.1% 的

增速。黄土高原长期受下垫面物质构成的影响,空气污染物以可吸入颗粒物为主,2015 年,山西和陕西两省环境维护投资总额达 772 亿元。华南区作为快速城市化地区,可吸入颗粒物与臭氧成为主要空气污染物,这一地区环境投资与空气质量的较高耦合说明华南地区城市可持续发展走在经济发达地区的前列。

4 结论

本文综合分析了中国空气质量空间格局,并对不同地区影响空气质量的自然和社会经济因素进行定量评价,结论如下:(1)中国 AQI 的分布呈现明显的空间集聚性。其中 AQI 高值集聚区,呈现以

“西北区—华北区”为中心的双核分布特征. AQI 低值集聚区呈现以“华南区—东北区”为中心的双核分布特征. 大气污染物的空间分布呈现出较为明显的东西分异特征,分界线大致与“胡焕庸线”接近. (2)影响我国 AQI 空间分布的自然因素比较复杂,总体上看,空气污染水平与地形、降水、气温呈负相关,与气压、日照、相对湿度呈正相关,与风速关系较为复杂. 影响我国 AQI 空间分布的社会经济因素可分为4种类型:华北和东南区属于人口驱动型;东北、内蒙古和西南区属于工业驱动型;西北

参考文献:

区属于生活消费驱动型;青藏、陇陕晋和华南区属于环境维护驱动型.

基于陆地表层九大区域独特视角,运用地理探测器方法,从自然和社会经济两个方面对全国空气质量空间格局影响因素进行定量评价,进一步丰富了空气质量相关研究的理论体系和研究结论. 但是,本文仅限于对2015年的截面数据进行静态分析,不能更深刻地剖析空气质量空间格局影响因素的动态变化及规律,可在后续研究中利用AQI面板数据进行深化.

- [1] WAN Y S, YAO L, WANG L L, et al. Mechanism for the formation of the January 2013 heavy haze pollution episode over central and eastern China[J]. *Science China Earth Sciences*, 2014, 57(1): 14-25.
- [2] LI Changmin, WANG Hongxia, XIE Xiaoliang, et al. Tiered transferable pollutant pricing for cooperative control of air quality to alleviate cross-regional air pollution in China[J]. *Atmospheric Pollution Research*, 2018, 9(5): 857-863.
- [3] 丁镭, 刘超, 黄亚林, 等. 湖北省城市环境空气质量时空演化格局及影响因素[J]. *经济地理*, 2016, 36(3): 170-178.
DING Lei, LIU Chao, HUANG Yalin, et al. Spatial and temporal characteristics of urban ambient air quality and its main influence factors in Hubei Province[J]. *Economic Geography*, 2016, 36(3): 170-178.
- [4] HAN Lijian, ZHOU Weiqi, LI Weifeng. City as a major source area of fine particulate (PM_{2.5}) in China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 206(12): 183-187.
- [5] 蔺雪芹, 王岱. 中国城市空气质量时空演化特征及社会经济驱动力[J]. *地理学报*, 2016, 71(8): 1357-1371.
LIN Xueqin, WANG Dai. Spatio-temporal variations and socio-economic driving forces of air quality in Chinese cities[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2016, 71 (8): 1357-1371.
- [6] 余国忠, 施旋, 王世香, 等. 信阳市中心城区空气质量的时间变化特征[J]. *信阳师范学院学报(自然科学版)*, 2019, 32(3): 426-430.
YU Guozhong, SHI Huan, WANG Shixiang, et al. Temporal changes of air quality in the central city of Xinyang[J]. *Journal of Xinyang Normal University(Natural Science Edition)*, 2019, 32(3): 426-430.
- [7] ZHAN D S, KWAN M P, ZHANG W Z, et al. The driving factors of air quality index in China[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 197(1): 1342-1351.
- [8] 周兆媛, 张时煌, 高庆先, 等. 京津冀地区气象要素对空气质量的影响及未来变化趋势分析[J]. *资源科学*, 2014, 36(1): 191-199.
ZHOU Zhaoyuan, ZHANG Shihuang, GAO Qingxian, et al. The impact of meteorological factors on air quality in the Beijing-Tianjin-Hebei region and trend analysis[J]. *Resource Science*, 2014, 36 (1): 191-199.
- [9] 张智胜, 陶俊, 谢绍东, 等. 成都城区 PM_{2.5} 季节污染特征及来源解析[J]. *环境科学学报*, 2013, 33(11): 2947-2952.
ZHANG Zhisheng, TAO Jun, XIE Shaodong, et al. Seasonal variations and source apportionment of PM_{2.5} at urban area of Chengdu [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2013, 33 (11): 2947-2952.
- [10] 李名升, 任晓霞, 于洋, 等. 中国大陆城市 PM_{2.5} 污染时空分布规律[J]. *中国环境科学*, 2016, 36(3): 641-650.
LI Mingsheng, REN Xiaoxia, YU Yang, et al. Spatiotemporal pattern of ground-level fine particulate matter (PM_{2.5}) pollution in mainland China[J]. *Chinese Environmental Science*, 2016, 36 (3): 641-650.
- [11] 陈欣, 刘喆, 吴佩林. 中国城市空气质量的“春节效应”分析——来自31个重点城市的经验证据[J]. *统计与信息论坛*, 2014, 29(12): 57-62.
CHEN Xin, LIU Zhe, WU Peilin. Analysis on Chinese urban air quality's "Spring Festival effect": Evidence from 31 key cities in China[J]. *Statistics & Information Forum*, 2014, 29(12): 57-62.
- [12] 彭丽思, 孙涵, 聂飞飞. 中国大气污染时空格局演变及影响因素研究[J]. *环境经济研究*, 2017(1): 42-56.
PENG Lisi, SUN Han, NIE Feifei. The evolution of temporal and spatial pattern and influencing factors of the air pollution in China [J]. *Environmental Economics Research*, 2017 (1): 42-56.
- [13] 王艳东, 荆彤, 姜伟, 等. 利用社交媒体数据模拟城市空气质量趋势面[J]. *武汉大学学报(信息科学版)*, 2017, 42(1): 14-20.
WANG Yandong, JING Tong, JIANG Wei, et al. Modeling urban air quality trend surface using social media data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2017, 42(1): 14-20.
- [14] 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): 1051-1060.
YANG Kun, YANG Yulian, ZHU Yanhui, et al. Social and economic drivers of PM_{2.5} and their spatial relationship in China[J]. *Geographical Research*, 2016, 35(6): 1051-1060.
- [15] 王振波, 方创琳, 许光, 等. 2014年中国城市 PM_{2.5} 浓度的时空变化规律[J]. *地理学报*, 2015, 70(11): 1720-1734.
WANG Zhenbo, FANG Chuanglin, XU Guang, et al. Spatial-temporal characteristics of the PM_{2.5} in China in 2014 [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70 (11): 1720-1734.
- [16] 葛全胜, 赵名茶, 郑景云, 等. 中国陆地表层系统分区初探[J]. *地理学报*, 2002, 57(5): 515-522.
GE Quansheng, ZHAO Mingcha, ZHENG Jingyun, et al. Study on division of the terrestrial system in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2002, 57(5): 515-522.

责任编辑: 张建合