

沿黄主要城市空气质量时空特征及 社会经济影响因素研究

常骑¹ 李宏伟^{1,2} 张斌² 何孟铮¹ 刘杨¹¹

(1. 郑州大学 水利科学与工程学院, 河南 郑州 450001;

2. 郑州大学 地球科学与技术学院, 河南 郑州 450052)

【摘要】: 基于 2015—2019 年黄河沿线 71 个主要城市空气质量指数(AQI)和社会经济数据,采用探索性数据分析方法探究了空气质量时空及集聚特征,构建了空气质量的社会经济影响指标体系,引入BP神经网络改进DEMATEL模型,探讨了空气质量的关键影响因素及因素间相互影响关系,结果表明:(1)黄河沿线城市AQI空间上总体呈“东高西低”,且有显著的高、低值集聚特征。(2)空气质量季节上总体呈“夏优冬差,春秋居中”。(3)工业烟粉尘排放量、人均GDP为强驱动因素,是调控空气质量的根本性因素;工业用电总量、公路货运量为强特征因素,是调控空气质量最直接的因素。鉴于研究结论,讨论了改善黄河沿线城市空气质量的有效措施。

【关键词】: 空气质量 时空特征 BP-DEMATEL 关键因素 黄河沿线城市

【中图分类号】: X51; F062.2 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1671-4407(2021)07-183-07

近年来,随着我国社会经济的快速发展,大规模空气污染事件频频发生,严重影响了人们的生产、生活和身心健康^[1-2]。为加快改善环境空气质量,国务院相继发布了《“十三五”生态环境保护规划》《打赢蓝天保卫战三年行动计划》等污染整治政策^[3]。如何从根本上治理空气污染,有效改善空气质量也成为各级政府的重大议题。

空气质量主要受自然环境和人类活动两大方面影响,究其根源,关键在于人类社会经济活动下的多因素综合作用^[4-5]。有众多学者针对空气质量及社会经济影响因素开展研究。Lin等^[6]利用统计学方法分析了2001—2010年中国PM_{2.5}的时空分布,地理加权回归模型得到PM_{2.5}的三大驱动因素分别为人口增长、地方经济增长和城市扩张。蔺雪芹和王岱^[7]基于地理学视角研究了2013年和2014年中国161个城市空气质量的时空特征,空间计量模型结果表明能源消耗、工业化和技术进步是造成空气质量恶化的重要因素,经济发展则有助于改善空气质量。姚尧等^[8]对2004—2013年中国274个城市NO₂浓度的时空特征进行了探究,空间计量经济模型发现人口城市化水平、第二产业占比和机动车数量激增是恶化中国城市NO₂的重要因素。柏玲等^[9]探索了2015年长江经济带空气质量指数(AQI)的时空演变特征,并基于贝叶斯空间计量模型实证了长江经济带空气质量符合环境库兹涅茨曲线假说和污染避难假说,人口密度、公路客运量均能导致空气污染加剧,而第三产业占比和建成区绿色覆盖率均对空气质量改善起积极作用。姜磊等^[10]运用地理加权回归模型从空间异质性视角出发,分析了2014年中国150个城市外商直接投资与空气质量之间的关系。程钰等^[11]探究了2014—2017年京津冀及周边地区28个城市的空气质量时空演变特征,运用PCA-多元线性回归模型甄

作者简介: 常骑, 硕士, 研究方向为数据挖掘、地理信息技术与应用。E-mail:986540612@qq.com

李宏伟, 博士, 教授, 博士研究生导师, 研究方向为地理信息技术理论与应用。E-mail:laob_811@sina.com

基金项目: 国家自然科学基金项目“空间数据流的概念漂移问题研究”(41571394);郑州大学高层次人才科研启动项目“地理时空大数据(流)异常事件检测与预测建模关键技术研究”(237-32310319)

别出空气质量的重要影响因素为经济增长、产业结构、城镇化、能源效率、交通压力、城市绿化。这些研究取得了不少成果，给空气质量及社会经济影响因素方面的研究带来了一定的启示，但也存在以下不足：空气质量的社会经济影响因素多集中于单个或几个因素的简单整合，且忽略了因素对空气质量的根本作用及因素间的相互影响，而空气质量受社会经济的影响恰恰是多方面共同作用的。

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济带，流域生态保护和高质量发展已纳入国家重大战略^[12]。新中国成立以来，黄河治理取得了巨大成就，社会经济发展显著提升，与此同时，生态脆弱和高质量发展问题日益凸显^[4]。系统探究黄河沿线城市空气质量时空特征及其背后社会经济根源是什么，如何高效改善空气质量等，对于推动黄河流域环境空气质量改善及高质量发展至关重要。本文以黄河沿线 71 个地级城市(州、盟)为研究区域，基于城市的空气质量指数(AQI)和社会经济数据，对黄河沿线主要城市 2015—2019 年空气质量时空特征及社会经济影响因素进行探究，以期达到以下研究目标：(1)探究黄河沿线城市空气质量时空及集聚特征；(2)构建符合研究区域特点的空气质量的社会经济影响指标体系，并对指标因素进行识别分类；(3)探讨空气质量的关键影响因素及因素间的显著影响关系。

1 数据与方法

1.1 数据说明

本文采用空气质量指数(AQI)作为全面衡量空气质量的综合指标，AQI 是由环保部制定监测空气质量的无量纲指数，具有一定的权威性、综合性和可信度^[9]。AQI 分为 6 个等级，值越低代表空气质量越好^[13]。AQI 数据来源于生态环境保护部数据中心的数据接口(<http://datacenter.mee.gov.cn/websjzx/queryIndex.vm>)。探究空气质量时空及集聚特征基于 2015—2019 年黄河沿线 71 个主要地级城市(州、盟)的 AQI 数据。

依据以往空气质量的社会经济影响因素实证研究成果^[6-11]，结合黄河流域区域状况^[4]，构建了含有 3 个维度层、10 个指标层、19 个指标因素的空气质量社会经济影响指标体系(表 1)。其中，区域发展水平反映区域发展过程中不同社会经济状况对空气质量的影响，污染来源反映人类社会经济活动中产生的污染对空气质量的影响，城市化水平反映城市化进程对空气质量的影响。由于缺少黄河流域 10 个自治州(盟)2015—2019 年完整的社会经济数据，因而空气质量的社会经济影响因素研究基于 2016—2017 年黄河沿线 61 个地级城市的 AQI 和社会经济数据。社会经济数据来源于《中国城市统计年鉴》及各省、市统计年鉴。

表 1 沿黄主要城市空气质量的社会经济影响指标体系

维度层	指标层	指标因子	单位
区域发展水平	人口集聚	人口密度(X_1)	人/ km^2
	经济发展	地区生产总值 GDP(X_2)	万元
		人均 GDP(X_3)	元
	产业结构	第二产业占 GDP 比重(X_4)	%
		第三产业占 GDP 比重(X_5)	%
	科技创新	R&D 内部经费支出(X_6)	万元
污染来源	工业源	工业二氧化硫排放量(X_7)	吨

		工业氮氧化物排放量 (X_8)	吨
		工业烟粉尘排放量 (X_9)	吨
	能源消耗源	天然气供气总量 (X_{10})	万 m^3
		液化气供气总量 (X_{11})	吨
		全社会用电量 (X_{12})	万千瓦时
		工业用电总量 (X_{13})	万千瓦时
	建筑源	房地产开发投资完成额 (X_{14})	万元
	交通源	公路客运量 (X_{15})	万人
		公路货运量 (X_{16})	万吨
城市化水平	城市建设	建成区面积 (X_{17})	km^2
	城市绿化	绿地面积 (X_{18})	公顷
		建成区绿化覆盖率 (X_{19})	%

1.2 探索性数据分析方法

本文采用经验正交函数 (EOF) 和空间自相关分析对研究区 AQI 的时空及集聚特征进行探究。EOF 最早由 Pearson^[14] 提出, 1956 年引入到气象领域, 后来逐渐应用于众多学科^[15-16]。EOF 可将空间数据时空分解得到相互正交的特征向量, 其空间模态在一定程度上可以反映空间分布, 时间系数则可以反映时间变化。

空间自相关分析包括全域空间自相关分析和局域空间自相关分析。全域空间自相关分析可定量描述相邻城市间 AQI 是否具有相似性, 从而判断 AQI 是否存在空间集聚特征^[17]。全域空间自相关分析常以 Moran' s I 为测度指标, Moran' s I 值介于 $[-1, 1]$, 其值大于 0, 表明存在空间正向自相关; 其值小于 0, 表明存在空间负向自相关, 且绝对值越大, 相关性越强。局域空间自相关分析可更直观的探究 AQI 的空间集聚态势, 常以 Local Moran' s I 为检验指标^[4]。二者计算公式为:

$$\text{Moran' s I} = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n W_{ij}) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, (i \neq j) \quad (1)$$

$$\text{Local Moran' s I} = \frac{n(x_i - \bar{x}) \sum_{j=1}^m W_{ij} (x_j - \bar{x})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, (i \neq j) \quad (2)$$

式中: n 为城市个数, W_{ij} 为空间权重矩阵, m 为邻接城市个数, x 为各城市的 AQI 值, $\bar{x}$ 为各城市 AQI 均值。

1. 3BP-DEMATEL 模型

决策与试验评价实验室方法 (DEMATEL) 是影响因素识别领域常用算法之一, 可从系统众多影响因素中有效识别出原因型和结果型两类因素^[18]。模型依据调查问卷和专家打分建立因素的直接关联矩阵不免具有一定的主观性和实现难度, 引入 BP 神经网络模型进行权值计算得到直接关联矩阵, 可有效解决这一不足^[19]。本文引入 BP-DEMATEL 模型对黄河沿线主要城市空气质量的社会经济影响因素进行识别分析, 模型构建步骤如下:

(1) 定义影响因素矩阵为 $X = (x_{ij})_{m \times n}$, 目标矩阵为 $Y = (y_{it})_{m \times k}$, 将 X 和 Y 归一化得到 $\bar{X}$ 和 $\bar{Y}$, 其中, m 为样本数, n 为影响因素数, k 为目标因素数, $1 \leq i \leq m$, $1 \leq j \leq n$, $1 \leq t \leq k$ 。

(2) $\bar{X}$ 为输入量, $\bar{Y}$ 为输出量, 构建 BP 神经网络模型训练得到输入层至隐含层、隐含层至输出层的权值矩阵 $(W_1)_{n \times h}$ 、 $(W_2)_{h \times k}$, 计算整体权值矩阵 $(W)_{n \times k} = (W_1) \times (W_2)$, 其中, $(W)_{n \times k}$ 表示影响因素与目标因素的权值关系。

(3) 计算因素间的直接关联矩阵。

$$A = (a_{ij})_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \cdots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \cdots & a_{nn} \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: $a_{ii}=0$, $a_{ij} = \frac{w_{ij}}{w_i}$ (若 $w_i=0$, 则 $a_{ij}=0$), a_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的影响程度。

(4) 归一化直接关联矩阵。

$$B = (b_{ij})_{n \times n} = \frac{1}{\max_{1 \leq i \leq n} \sum_{j=1}^n a_{ij}} \cdot A \quad (4)$$

(5) 计算综合影响矩阵。

$$T = (t_{ij})_{n \times n} = B(I - B)^{-1} \quad (5)$$

式中: $(I-B)^{-1}$ 为 $(I-B)$ 的逆矩阵, I 为单位矩阵, t_{ij} 表示因素 i 对因素 j 的综合影响度。

(6) 因果关系分析, 定义 D 为 T 各行之和, R 为 T 各列之和。

$$D_i = \sum_{j=1}^n t_{ij}, (i=1, 2, \cdots, n) \quad (6)$$

$$R_j = \sum_{i=1}^n t_{ji}, (j=1, 2, \cdots, n) \quad (7)$$

式中： D_i 为第 i 个影响因素对其他因素的综合影响度， R_i 为第 i 个影响因素受其他因素的综合影响度。

将 D_i+R_i 定义为因素 i 的中心度，其值越大代表因素在系统中的重要程度越大； D_i-R_i 为因素 i 的原因度，原因度大于 0，代表该因素在系统中对其他因素影响较大，为原因型影响因素；原因度小于 0，代表该因素在系统中受其他因素影响较大，为结果型影响因素。

2 结果与分析

2.1 空气质量时空特征

本文基于研究区 71 个地级城市(州、盟) 2015—2019 年 AQI 日均值数据，将其整理为月均值数据，利用 EOF 方法进行时空分解。计算结果得出，前两个特征向量的累计方差贡献率分别为 82.46%和 91.75%，因而可以用来衡量 AQI 的时空分布特征。由于每一特征向量场的极大值中心是 AQI 增加或减少异常变化的最敏感区域，且特征向量相互正交，故 EOF 展开的第一模态特征向量反映 AQI 距平的平均状态，其余模态反映 AQI 距平的变化状态，特征向量对应的时间系数作为特征向量的权重，反映不同月份对这种空间分布的贡献大小^[17]。

EOF 第一模态方差贡献率为 82.46%，反映了研究区 2015—2019 年空气质量的总体空间分布特征(图 1a)，AQI 特征值基本呈现“东高西低”分布格局，极大值主要集中在东部下游地区的山西、河南、山东及陕西南部的一部分城市，极小值主要集中在西部上游的青海大部分城市、四川的阿坝州及中游的内蒙古大部分城市，这主要由于黄河下游城市地处华北平原，人口密集，社会经济发展水平相对较高，且部分城市处于社会经济高速发展时期，如郑州都市圈等，人类生活、生产污染排放较多，故空气质量相对较差。黄河上游和中游部分城市地处青藏高原、黄土高原及内蒙古高原等高原地区，人口稀少，社会经济水平相对较低，人类生活生产污染排放较少，故空气质量相对较好。

第一模态对应的标准化时间系数基本呈现“W”型变化特征(图 1b)。1—4 月份呈下降趋势，1 月份为最大值点，说明 1 月份 AQI 的空间分布最为明显。4—9 月份呈先回升后下降趋势，6 月份为极大值点，这可能与夏秋收时秸秆的焚烧引起的空气污染有关^[20]，9—12 月份又呈上升趋势，并在 12 月份达到极大值点，主要与冬季气温较低，采暖引起的能源消耗产生污染排放有关^[21-22]。就季节变化特征来看，空气质量总体呈现“夏优冬差，春秋居中”。

EOF 第二模态方差贡献率为 9.29%，反映了研究区 2015—2019 年空气质量差异的空间变化特征^[23](图 2a)。特征值呈现“西北高，东南低”的分布格局，反映了西北方向地区和东南方向地区 AQI 异常呈反相位，即东南方向地区 AQI 减小时，西北方向地区 AQI 变大，说明空气污染可能存在东西输送的变化规律。依据标准化时间系数(图 2b)，可对 AQI 异常分布进行时序特征分析^[24]。3—7 月份，特征系数为正，说明 AQI 西北地区异常大，东南地区异常小，空气污染物可能存在由东南朝西北方向输送的现象。其他月份反之，空气污染物可能存在由西北朝东南输送的现象。

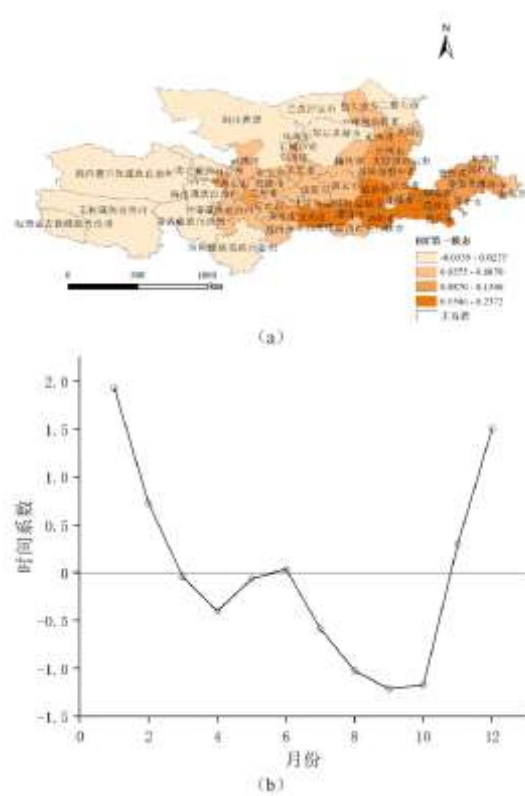


图1 EOF 第一模态空间分布 (a) 和标准化时间系数图 (b)

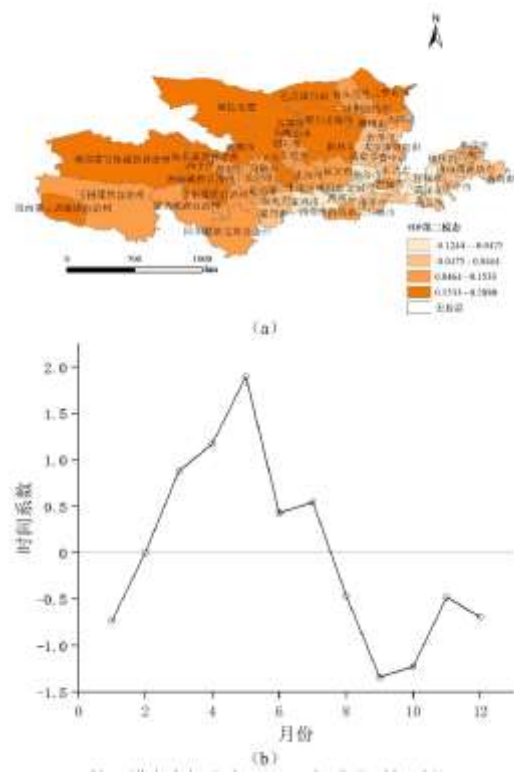


图 2 EOF 第二模态空间分布 (a) 和标准化时间系数图 (b)

2.2 空气质量空间集聚特征

为探究 AQI 是否存在空间集聚效应, 本文基于 2015—2019 年 AQI 年均值数据, 以 Queen 邻接矩阵作为空间权重矩阵, 进行全域自相关分析。计算得出 AQIMorans’ sI 值高达 0.716, Z-sore 值为 9.548, 通过 1% 的显著性水平检验, 说明城市之间 AQI 呈显著的空间正相关性, 即存在显著的高值或低值空间集聚特征。

为进一步探究 AQI 的高低值集聚空间分布, 进行局域自相关分析, 由分析结果得出(图 3), 城市间 AQI 存在显著的高—高和低—低两种集聚类型。AQI 高值集聚区主要集中在社会经济发展水平相对较好的东部下游地区, 包括山东、河南和山西的部分城市, 说明这些城市及其周边城市 AQI 值均较高, 空气质量相对较差。AQI 低值集聚区主要集中在社会经济发展水平相对较低的西部上游地区, 包括青海、四川以及陕西西部的部分城市, 说明这些城市及其周边城市 AQI 值均较低, 空气质量相对较好。



图 3 2015—2019 年沿黄主要城市 AQI 集聚图

2.3 空气质量的社会经济影响因素

本文以沿黄主要城市空气质量的社会经济影响指标体系中 19 个指标因素为输入神经元, AQI 数据为输出神经元, 对输入层和输出层数据进行归一化处理, 应用 MATLAB 软件建立含有一个隐含层的 BP 神经网络模型, 依据经验公式^[25]和多次训练确定隐含层节点个数为 10, 引入带有动量项的自适应学习算法为训练函数, 设置最大训练次数为 3000 次, 学习率为 0.05, 动量因子为 0.5, 训练要求精度为 0.00001, 以 2017 年数据作为训练集, 2016 年数据作为测试集, 经过反复测试, 选择效果较好的网络, 导出输入层至隐含层、隐含层至输出层的权重矩阵, 在公式(3)~(5)的基础上计算得到各影响因素间的直接关联矩阵和综合影响矩阵, 在公式(6)、公式(7)基础上计算得出空气质量的各影响因素的中心度 D+R 和原因度 D-R。计算结果见表 2。

表 2 沿黄主要城市空气质量的社会经济影响因素中心度及原因度

指标因子	D	R	D+R	D-R
X ₁	1.0647	0.9921	2.0567	0.0726
X ₂	1.5119	0.6986	2.2105	0.8133
X ₃	1.6849	0.6269	2.3118	1.0580
X ₄	1.0225	1.0330	2.0555	-0.0106

X ₅	1.0349	1.0206	2.0555	0.0142
X ₆	0.7530	1.4026	2.1556	-0.6496
X ₇	1.3095	0.8066	2.1161	0.5029
X ₈	1.4739	0.7166	2.1905	0.7573
X ₉	1.8046	0.5853	2.3899	1.2193
X ₁₀	0.8647	1.2215	2.0862	-0.3568
X ₁₁	0.9477	1.1145	2.0622	-0.1668
X ₁₂	0.9897	1.0672	2.0569	-0.0775
X ₁₃	0.5340	1.9778	2.5119	-1.4438
X ₁₄	0.9509	1.1107	2.0616	-0.1597
X ₁₅	1.2384	0.8529	2.0913	0.3855
X ₁₆	0.5872	1.7988	2.3860	-1.2116
X ₁₇	0.7920	1.3335	2.1256	-0.5415
X ₁₈	1.0320	1.0234	2.0555	0.0086
X ₁₉	0.9263	1.1402	2.0665	-0.2139

2.3.1 社会经济影响因素识别

由 DEMATEL 分类规则，将影响因素分为原因型和结果型两大类。结合影响因素中心度范围及作用机理，可将所有因素中心度的标准差和均值之和作为阈值 θ_1 ，中心度大于 θ_1 的原因型和结果型因素分别定义为强驱动因素和强特征因素。中心度小于 θ_1 的原因型和结果型因素为驱动因素和特征因素^[26]。强驱动因素具备较高的中心度和原因度，呈现出显著的重要性，该类因素对其他因素影响较大，且不易受其他因素影响，对空气质量有着根本性、持续性的影响作用，是空气质量的根本性影响因素。强特征因素具备较高的中心度，该类因素与其他因素关系密切，受其他因素影响作用最为典型，是影响空气质量最直接的因素。计算得出 $\theta_1=2.2997$ ，影响因素因果关系见图 4，图中数字编码与沿黄主要城市空气质量的社会经济影响指标体系中的指标因素相互对应。

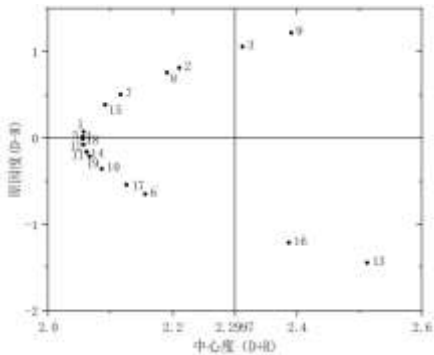


图 4 沿黄主要城市空气质量的社会经济影响因素因果关系图

为深入探讨各影响因素间的关系，以模型中综合影响矩阵的均值和标准差之和为阈值 θ_2 ，当因素之间综合影响度大于 θ_2 时，认定因素间的影响关系为显著^[27]。经计算 $\theta_2=0.0833$ ，各因素间显著关系见图 5，其中，点越大代表该因素在显著关系系统中重要程度越大，箭头指向反映了两因素间的影响机制。

为深入探讨各影响因素间的关系，以模型中综合影响矩阵的均值和标准差之和为阈值 θ_2 ，当因素之间综合影响度大于 θ_2 时，认定因素间的影响关系为显著^[27]。经计算 $\theta_2=0.0833$ ，各因素显著关系见图 5，其中，点越大代表该因素在显著关系系统中重要程度越大，箭头指向反映了两因素间的影响机制。

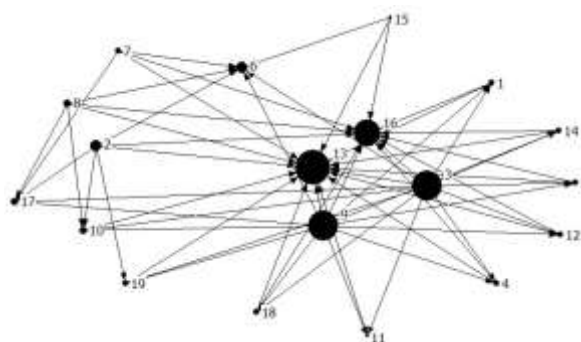


图 5 沿黄主要城市空气质量的社会经济影响因素间显著关系图

2.3.2 关键驱动因素分析

工业烟粉尘排放量 (X_6)、人均 GDP (X_8) 为空气质量的强驱动因素，对所有特征因素均产生显著影响，对空气质量有着根本性的影响作用。地区生产总值 GDP (X_2)、工业氮氧化物排放量 (X_9)、工业二氧化硫排放量 (X_7) 3 项因素高于其余驱动因素中心度的均值，且对特征因素的影响较大，说明在系统中拥有较为重要的地位，也属于影响空气质量的关键驱动因素^[28]。

分析得出，关键驱动因素涵盖了经济发展和工业污染源两个指标层全部指标，且均对 R&D 内部经费支出 (X_6)、工业用电总量 (X_{13})、公路货运量 (X_{16})、建成区面积 (X_{17}) 等因素有显著影响关系。这反映出黄河沿线大多数城市目前仍以经济发展为第一要务，工业废气排放是空气质量最主要的污染源，经济发展和工业化进程也影响着人口、产业结构、科技创新、能源消耗、城市化水平等多方面空气质量影响因素。说明随着经济和工业的发展，一方面，科技创新水平不断提高，生产、生活方式的优化促进了空气质量有所改善。另一方面，加剧了能源消耗、交通和城市建设等社会经济活动产生的污染物，造成了一定程度的空气污染。因此，若从根本上改善空气质量状况，各地政府应注重经济协调发展，严格控制工业废气排放，杜绝以牺牲环境为代价的经济发展模式，同时，充分利用自身区位与资源优势，发展绿色环保可持续经济，推动黄河流域生态经济高质量发展。

2.3.3 关键特征因素分析

工业用电总量 (X_{13})、公路货运量 (X_{16}) 为空气质量的强特征因素，受所有驱动因素的显著影响，是影响空气质量最直接的核心因素，R&D 内部经费支出 (X_6)、天然气供气总量 (X_{10})、建成区面积 (X_{17}) 3 项因素高于其余特征因素中心度的均值，且受驱动因素影响较大，说明可对空气质量造成较大直接影响，也属于影响空气质量的关键特征因素。

工业用电总量是反映工业活动中能源消耗的重要指标，受人均 GDP 影响最大，影响度高达 0.1624，远大于 θ_2 ，表明各城市

的经济发展对工业产业存在一定的显著依赖性，工业生产活动中的能源消耗及环境污染已成为影响空气质量的突出问题。公路货运量是反映城市交通污染的主要指标，受工业烟粉尘排放量影响最大，影响度为 0.1582，表明目前各城市工业生产活动中交通方式仍以公路货运为主，机动车尾气排放已成为直接影响空气质量的核心因素。R&D 内部经费支出、天然气供气总量在一定程度上分别反映了城市科技创新和清洁能源利用情况，均受人均 GDP 的影响最大，影响度分别为 0.1233 和 0.1，表明城市经济发展能够有效地带动科技创新和绿色能源的推广，在一定程度上可以提高能源利用效率，降低生产、生活中的污染排放，改善空气质量。建成区面积可以反映城市建设中土地利用情况和人类活动强度，往往存在着能源消耗、人类活动等带来的污染，受工业烟粉尘排放量影响最大，影响度为 0.1173，表明城市建设的支柱产业为工业，工业的发展能够直接推动城市建设，与此同时，也加重了空气污染，因而城市建设过程中应优化产业结构，增加其他产业依靠力度，并防止过度开发而引起原始绿地破坏，导致城市净化功能下降。

3 结论与讨论

3.1 结论

本文采用探索性数据分析方法，探究了黄河沿线主要城市 2015—2019 年空气质量的时空及集聚特征，构建了沿黄主要城市空气质量的社会经济影响指标体系，在此基础上，引入 BP 神经网络改进的 DEMATEL 模型，探讨了影响空气质量的关键社会经济因素及因素间显著关系。研究结论如下：

(1) AQI 总体呈“东高西低”的空间分布，且具有显著的高、低值集聚特征。空气质量较好区域主要集中在西部上游和中游的青海、四川、内蒙古及陕西四省的高原地区城市，空气质量较差的区域主要集中在东部下游的山西、河南及山东地区的城市。

(2) 空气质量总体呈“夏优冬差，春秋居中”。月尺度的 AQI 时间系数变化大致呈“W”型特征，1—4 月份呈下降趋势，1 月份为最大值，4—9 月份呈先回升后下降趋势，6 月份为极大值，9—12 月份又呈上升趋势，12 月份为极大值。

(3) 工业烟粉尘排放量、人均 GDP 为空气质量的强驱动影响因素，工业用电总量、公路货运量为空气质量的强特征影响因素。人均 GDP、工业烟粉尘排放量对空气质量有着根本性、持续性的影响作用，且对特征影响因素影响显著，是调控空气质量的根本性因素。工业用电总量、公路货运量对空气质量有着直接性的影响作用，且受驱动影响因素影响最为典型，是短时间内调控空气质量最直接有效的因素。

3.2 讨论

鉴于黄河沿线主要城市 AQI 存在显著的时空及集聚特征。因而可采取空气质量区域差异化管理和联防联控措施，一方面依据空气质量时空差异实施不同的防控策略，如空气质量较好的西部上中游的青海、四川、内蒙古及陕西四省的高原地区城市以防控为主，空气质量较差的东部中下游的山西、河南及山东地区城市以防治为主，同时，重点把控冬季空气质量状况。另一方面，应积极探索城市空气质量防控协作新方式，形成区域联防联控机制，城市之间协同规划实施空气污染防控方案，划分合理有效的污染治理责任和补偿机制等，避免空气污染空间相关效应带来的连锁反应，实现黄河沿线城市空气质量绿色协同发展。

鉴于工业烟粉尘排放量、人均 GDP 为空气质量的强驱动影响因素。因而从根本上改善空气质量有以下两个重要途径：一是严格把控企业工业废气排放标准，加强对排放超标企业的整治力度，制定激励补贴政策，引导企业节能减排，同时企业也应积极响应政府号召，严格遵守相关环保规定，为改善空气质量承担必要的社会责任。二是优化城市经济发展模式，注重经济和环境协同发展，杜绝以牺牲环境为代价的经济发展模式，应充分利用自身区位与资源优势，推动科技创新，发展绿色环保可持续经济。

鉴于工业用电总量、公路货运量为空气质量的强特征因素。因而短时期内改善空气质量可采取以下措施：积极推动工业企业生产设备升级，提升工业能源利用效率，同时提倡使用清洁能源与绿色环保交通运输方式，降低能源消耗和交通污染对空气质量带来的直接影响。

参考文献:

- [1]Wang 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]刘华军,雷名雨.中国雾霾污染区域协同治理困境及其破解思路[J].中国人口·资源与环境,2018(10):88-95.
- [3]郭一鸣,蔺雪芹,边宇.中国城市群空气质量时空演化特征及其影响因素[J].生态经济,2019(11):167-175.
- [4]陈世强,张航,齐莹,等.黄河流域雾霾污染空间溢出效应与影响因素[J].经济地理,2020(5):40-48.
- [5]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(2):134-138.
- [6]Lin G,Fu J Y,Jiang D,et al.Spatio-temporal variation of PM_{2.5} concentrations and their relationship with geographic and socioeconomic factors in China[J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2014,11(1):173-186.
- [7]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(8):1357-1371.
- [8]姚尧,李江风,胡涛,等.中国城市 NO₂ 浓度的时空分布及社会经济驱动力[J].资源科学,2017(7):1383-1393.
- [9]柏玲,姜磊,周海峰,等.长江经济带空气质量指数的时空特征及驱动因素分析——基于贝叶斯空间计量模型的实证[J].地理科学,2018(12):2100-2108.
- [10]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[J].地理科学,2018(3):351-360.
- [11]程钰,刘婷婷,赵云璐,等.京津冀及周边地区“2+26”城市空气质量时空演变与经济社会驱动机理[J].经济地理,2019(10):183-192.
- [12]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[J].中国水利,2019(20):1-3.
- [13]环境保护部.环境空气质量指数(AQI)技术规定(试行)[EB/OL].(2017-07-31).<https://max.book118.com/html/2017/0731/125437185.shtm>.
- [14]Pearson K.LIII.On lines and planes of closest fit to systems of points in space[J].Philosophical Magazine and Journal of Science,1901,2(11):559-572.
- [15]Lorenz E N.Statistical forecasting program:Empirical orthogonal functions and statistical weather

prediction[J].Scientific Report, 1956, 409(2):997-999.

[16]Monahan A H, Fyfe J C, Ambaum M H P, et al. Empirical orthogonal functions: The medium is the message[J]. Journal of Climate, 2009, 22(24):6501-6514.

[17]姜磊, 周海峰, 柏玲, 等. 空气质量指数(AQI)的社会经济影响因素分析——基于指数衰减效应视角[J]. 环境科学学报, 2018(1): 390-398.

[18]Tzeng G W, Chiang C H, Li C W. Evaluating intertwined effects in e-learning programs: A novel hybrid MCDM model based on factor analysis and DEMATEL[J]. Expert Systems with Applications, 2006, 32(4):1028-1044.

[19]崔强, 武春友, 匡海波. BP-DEMATEL 在空港竞争力影响因素识别中的应用[J]. 系统工程理论与实践, 2013(6): 1471-1478.

[20]柏玲, 姜磊, 周海峰, 等. 长江经济带空气质量指数时空异质性及社会经济影响因素分析[J]. 水土保持研究, 2019(2): 312-319.

[21]梁银双, 刘黎明. 冬季供暖对北京市空气质量影响的效应测算[J]. 环境科学与技术, 2015(12): 272-275.

[22]陶双成, 邓顺熙, 高硕晗, 等. 北京采暖期典型区域环境空气污染特征分析[J]. 生态环境学报, 2016(11): 1741-1747.

[23]潘润西, 陈蓓, 莫雨淳, 等. 广西 PM_{2.5} 时空分布特征及污染天气类型[J]. 环境科学研究, 2018(3): 465-474.

[24]李祥, 彭玲, 池天河, 等. 北京市空气质量时空特征分析[J]. 测绘通报, 2016(9): 47-51.

[25]周润景. 模式识别与人工智能(基于 MATLAB) [M]. 北京: 清华大学出版社, 2018.

[26]车亮亮, 韩雪, 秦晓楠. 基于 BP-DEMATEL 模型的农产品虚拟水流动影响因素分析[J]. 冰川冻土, 2015(4): 1112-1119.

[27]秦晓楠, 卢小丽. 基于 BP-DEMATEL 模型的沿海城市生态安全系统影响因素研究[J]. 管理评论, 2015(5): 48-58.

[28]张海霞, 程先富, 陈冉慧. 安徽省 PM_{2.5} 时空分布特征及关键影响因素识别研究[J]. 环境科学学报, 2018(3): 1080-1089.