

# 基于空间数据模型的空气质量影响因素分析

陈 芳

武汉东湖学院基础课部, 湖北 武汉

收稿日期: 2026年7月10日; 录用日期: 2026年8月15日; 发布日期: 2026年8月26日

## 摘 要

为了分析空气质量的影响因素, 基于空间数据模型, 以2025年我国31个省级行政区六种污染物的年平均浓度数据为研究对象, 利用熵权Topsis法得出六种污染物指标的权重以及空气质量得分情况, 发现衡量空气质量的各项污染物的权重存在较大的差异; 根据全域空间自相关法, 计算莫兰指数, 判断空气质量指数具有明显的地理差异性, 空间依赖性; 最后, 利用空间滞后模型分析影响空气质量的八个因素, 发现人均地区生产总值和地区森林覆盖率是促进省域空气质量提高的主要因素; 地区社会用电量、地区公路年度客运量和地区年平均气温是制约空气质量提高的主要因素。

## 关键词

基于熵权的Topsis法, 全域空间自相关法, 空间回归模型

# Analysis of Influencing Factors of Air Quality Based on Spatial Data Model

Fang Chen

Basic Courses Department, Wuhan Donghu University, Wuhan Hubei

Received: July 10, 2026; accepted: August 15, 2026; published: August 26, 2026

## Abstract

In order to analyze the influencing factors of air quality, based on the spatial data model, 31 provinces (municipalities directly under the Central Government) in China in 2019 were selected. The annual average concentration data of six kinds of pollutants in Autonomous Region were used as the research object, and the weight of six kinds of pollutants and the air quality score were obtained by using

entropy weight Topsis method, and it was found that there were great differences in the weight of each kind of pollutants to measure the air quality. According to the global spatial autocorrelation method, the Moran index was calculated and the air quality index was judged to have obvious geographical difference and spatial dependence. Finally, eight factors affecting air quality were analyzed by using spatial lag model, and it was found that GDP per capita and forest coverage rate were the main factors promoting air quality at provincial level. Annual highway passenger volume and annual average temperature are the main factors restricting the improvement of air quality.

## Keywords

Topsis Method Based on Entropy Weight, Global Spatial Autocorrelation Method, Spatial Regression Model

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

我们所面临的七大污染威胁，其中空气污染威胁位居第一，严重危害我国的环境效益和经济效益，急需解决。研究相关因素对空气质量变化的影响，并且确定每个影响因素是如何影响我国空气质量的变化方向 and 变化程度，对于有效的治理空气污染问题非常重要。空气污染并不只是某一个特定区域的问题，大气中的污染物受地形和季节性风向等的影响，会蔓延到周边的城市，因此相邻地区之间的空气质量具有明显的空间相关性。

不少学者从不同的时空尺度和不同的影响因素来探究我国空气质量的变化规律[1]-[5]。如：肖悦[1]探究我国空气质量在时空分布上的特征，分析气象和经济两个影响要素对空气质量变化的影响。魏琪政[2]、陆江潇[3]等从长三角、珠三角和长江中下游地区的尺度来分析区域空气质量时空特征。还有一些学者采用空间回归模型对影响因素进行分析[6]-[13]，如胡亚权[6]和张可娟[7]利用空间面板数据研究实际问题，研究变量之间的空间相关性以及空间聚集现象和地域环境质量影响因素等。

引起空气质量的因素比较复杂，很多学者从自然因素和社会因素两个方面来进行研究[14]-[16]，如符建华、周方召[14]从人口总数和自然温度等要素分析其对空气质量的影响。王强、李明涛从经济发展水平、工业排放量与气压、湿度等要素分析其对空气质量的影响[15]。

基于空间面板模型的研究基础，本文将以我国 31 个省级行政区(不含港澳台地区)空气污染现状为研究对象，引入空间权重矩阵反映空气质量指数的空间相关性，通过空间回归模型来分析影响空气质量的因素，探究我国空气质量的变化方向及趋势，从而为我国制定有效的大气污染对策提供参考。

## 2. 研究数据与方法

### 2.1. 数据来源

数据均来源于 2025 年《中国统计年鉴》。选取我国 31 个省级行政区(不含港澳台地区)的空气质量数据。空气质量数据包含 AQI 评价体系的六种污染物年平均浓度。同时本文通过对所搜集到参考文献的整理，选择了 8 个被提到最多的影响因素，其中 6 个社会因素：地区总人口(POP)、第二产业占 GDP 比例(THI)、地区社会用电量(ELE)、地区公路年度客运量(KYL)、地区专利授权数(KJ)。2 个自然因素：地区森林覆盖率(TREE)、地区年平均气温(TEM)。

## 2.2. 数据处理

利用方差膨胀系数(VIF), 对所选取的 8 个影响因素变量利用 SPSS 软件进行共线性检验, VIF 越大, 表明自变量之间存在共线性的可能越大。若 VIF 小于 10, 自变量之间则不存在多重共线性; 若 VIF 大于等于 10, 自变量之间则存在多重共线性, 共线的变量需要被剔除。8 个影响因素的检验结果如表 1 所示, 可以看出 8 个因素都通过了 VIF 检验, 不需要剔除。

**Table 1.** VIF test results of influencing factors  
**表 1.** 影响因素 VIF 检验结果

| 变量  | GDP   | POP   | THI   | ELE   | KYL   |
|-----|-------|-------|-------|-------|-------|
| VIF | 2.156 | 6.601 | 1.449 | 6.309 | 3.321 |
| 变量  | KJ    | TREE  | TEM   |       |       |
| VIF | 4.447 | 1.948 | 2.259 |       |       |

## 2.3. 数据分析

### 2.3.1. 全域空间自相关法

用来定量地描述变量在空间上的聚集程度, 通过计算全局 Moran' I 指数[3]来描述相邻城市污染物浓度在空间上的相似性, 计算公式:

$$I = \frac{n}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij}} \frac{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n w_{ij} (Y_i - \bar{Y})(Y_j - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (1)$$

$I$  为 Moran' I 指数,  $Y_i$ 、 $Y_j$  分别为地区  $i$  和地区  $j$  的空气质量指数;  $\bar{Y}$  为空气质量指数的算术平均值;  $n$  为观测地区的数量;  $w$  为空间权重矩阵。 $I$  统计量的取值范围为 $[-1, 1]$ , 且统计量的值与空间样本容量有关。当  $I$  接近于 1 时, 说明空气质量指数的空间相关性越强; 当  $I=0$  时, 说明空气质量指数在空间上呈随机分布; 当  $I$  接近于-1 时, 说明空气质量指数的空间差异性越大。

### 2.3.2. 基于熵权的 Topsis 法

基于熵权的 Topsis 法具体步骤如下:

(1) 数据标准化

正向指标标准化:

$$V_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{\min}}{r_{\max} - r_{\min}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (2)$$

负向指标标准化:

$$V_{ij} = \frac{r_{ij} - r_{\max}}{r_{\min} - r_{\max}} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

其中,  $r_{\max}$  为指标的最小值,  $r_{\min}$  为指标的最大值,  $V_{ij}$  为标准化后的指标。

标准化数据归一化处理:

$$A = \frac{V_{ij}}{\sqrt{\sum_{i=1}^m V_{ij}^2}} = (a_{ij})_{m \times n} \quad (4)$$

## (2) 确定最优和最劣方案

最优方案  $A^+ = \{a_1^+, a_2^+, \dots, a_n^+\}$ , 其中  $a_j^+$  为矩阵  $A$  第  $j$  列的最大值。

最劣方案  $A^- = \{a_1^-, a_2^-, \dots, a_n^-\}$ , 其中  $a_j^-$  为矩阵  $A$  第  $j$  列的最小值。

## (3) 计算距离

将熵权法与 Topsis 相结合, 可以得到第  $i$  评价对象与最优方案和最劣方案的距离分别为  $D_i^+$  和  $D_i^-$ :

$$D_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (a_j^+ - a_{ij})^2} \quad (5)$$

$$D_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n w_j (a_j^- - a_{ij})^2} \quad (6)$$

## (4) 计算绩效

各评价对象与最优方案的接近程度为  $C_i$ :

$$C_i = \frac{D_i^-}{D_i^+ + D_i^-} \quad (7)$$

$C_i$  越大, 表明评价对象的绩效越高, 即本文中空气质量得分越高, 空气质量就越好。

## 2.3.3. 空气质量得分计算与排序

通过熵权法用 matlab 软件运算, 得出六种污染物指标的权重如表 2:

**Table 2.** Weighting of six pollutants

**表 2.** 六种污染物权重表

| 指标 | SO <sub>2</sub> | NO <sub>2</sub> | PM 2.5 | PM 10  | CO     | O <sub>3</sub> |
|----|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|----------------|
| 权重 | 0.3413          | 0.1135          | 0.1656 | 0.1609 | 0.1737 | 0.0450         |

由表 2 的结果明显可见, 各项污染物的权重存在较大的差异, 所占权重最高的是二氧化硫, 其次就是一氧化氮、细颗粒物(PM 2.5)和可吸入颗粒物(PM 10)所占权重中等, 二氧化氮权重较小, 臭氧所占权重最小。

通过熵权的 Topsis 法, 利用 matlab 软件, 运算 31 个省级行政区(不含港澳台地区)空气质量得分, 31 个省级行政区(不含港澳台地区)空气质量得分及排序如表 3 所示(得分越高, 代表空气质量越好):

**Table 3.** Air quality scores and rankings of provinces in my country in 2019

**表 3.** 2019 年我国各地区空气质量得分及排序

| 地区 | 得分     | 排名 | 地区  | 得分     | 排名 |
|----|--------|----|-----|--------|----|
| 海南 | 0.9381 | 1  | 江苏  | 0.5866 | 17 |
| 西藏 | 0.9117 | 2  | 湖北  | 0.5755 | 18 |
| 福建 | 0.8733 | 3  | 新疆  | 0.5116 | 19 |
| 贵州 | 0.7281 | 4  | 河南  | 0.4899 | 20 |
| 上海 | 0.7165 | 5  | 陕西  | 0.4889 | 21 |
| 广西 | 0.7058 | 6  | 天津  | 0.4842 | 22 |
| 广东 | 0.7057 | 7  | 宁夏  | 0.4484 | 23 |
| 北京 | 0.6933 | 8  | 黑龙江 | 0.4188 | 24 |

续表

|    |          |    |    |        |    |
|----|----------|----|----|--------|----|
| 重庆 | 0.6862   | 9  | 内蒙 | 0.4091 | 25 |
| 云南 | 0.6814   | 10 | 青海 | 0.3919 | 26 |
| 浙江 | 0.6753   | 11 | 山东 | 0.3305 | 27 |
| 四川 | 0.6710   | 12 | 甘肃 | 0.2990 | 28 |
| 湖南 | 0.6654   | 13 | 辽宁 | 0.2718 | 29 |
| 安徽 | 0.6626   | 14 | 河北 | 0.2240 | 30 |
| 江西 | 0.6437   | 15 | 山西 | 0.1365 | 31 |
| 浙江 | 0.675347 | 16 |    |        |    |

如表 3 所示，空气质量得分排名前十和后十的地区在地理位置上基本上是相邻的。排名前十的地区为：海南、西藏、福建、贵州、上海、广西、广东、北京、重庆、云南；位于我国南方沿海地区、西南部高原地区和沿江地区，北京是唯一的北方地区，它们的得分平均值是 0.7640。排名后十的地区为：天津、宁夏、黑龙江、内蒙、青海、山东、甘肃、辽宁、河北、山西；位于我国北方、内陆地区，它们的得分平均值是 0.3414。从地理位置和气候上来看，南方省份临海，空气流通性好，降雨多，植被覆盖率高，空气净化能力强。北方地区冬季气温低，供暖需求大，煤炭燃烧量大，污染物排放量大，降雨量少，植被覆盖率低，空气净化能力弱。可以明显看出，空气质量排名前十的平均值是后十的两倍有余，并且南方地区的空气质量明显优于北方地区，而北京作为唯一排在前十的北方城市，北京市的二氧化硫年平均浓度处于一个很低的水平，说明近几年北京市的环保较好，空气质量好转。

3. 空气质量影响因素分析

3.1. 空间自相关检验

空间自相关性的显著性检验可用统计量 Z 值表示，其计算公式如下：

$$Z = \frac{I - E(I)}{\sqrt{VAR(I)}} \tag{8}$$

上式中： $E(I)$  是 Moran' I 的期望值， $E(I) = \frac{-1}{n-1}$ ； $VAR(I)$  是方差。若  $|Z|$  值大于 2.58，则表明通过 0.01 的显著性水平检验，那么各省的空气质量指数存在空间依赖性。

本文用全局 Moran' I 指数来描述相邻省市污染物浓度在空间上的相似性，选取的是 Queen 邻接矩阵，由 Geoda 软件自动生成。

经软件运算得到空气质量指数(AQI\_TOP)的莫兰指数为 0.418，对应的 P 值为 0.01，所以判断空气质量指数存在空间依赖性，运行结果如下图 1 所示。

若散点所在位置的横坐标大于 0，那么该处空气质量较高；若散点所在位置的纵坐标大于 0，那么表明其周边地区空气质量较高。由于海南省在地图上没有邻接的省市，Geoda 在进行作图的时候自动剔除了空间权重中没有邻居的对象，所以莫兰散点图上没有海南省。

从表 4 中可以发现，位于第一、三象限的省份明显多于位于第二、四象限的省份，说明空气质量指数“高-高”和“低-低”型的区域明显多于空气质量指数“低-高”和“高-低”质量型的区域，这就意味着空气质量指数高(低)的区域更容易在空间上聚集，空气质量指数存在空间依赖性。

Moran's I: 0.418 (空间权重中的没有邻居的对象已被删除)

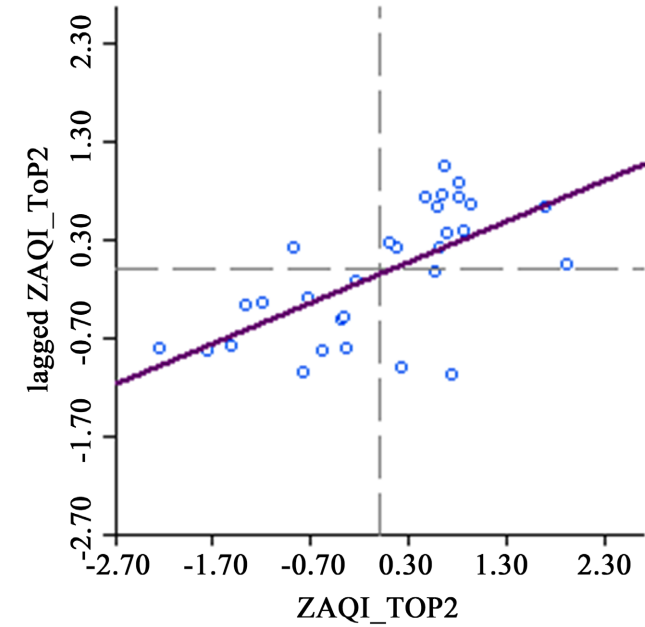


Figure 1. Moran scatter plot  
图 1. 莫兰散点图

Table 4. Scatter plot of Moran's distribution by province  
表 4. 莫兰散点图各地区分布

| 第一象限                                      | 第二象限 | 第三象限                                 | 第四象限  |
|-------------------------------------------|------|--------------------------------------|-------|
| 云南、广东、江西、浙江、湖南、贵州、重庆、湖北、江苏、四川、上海、西藏、福建、安徽 | 青海   | 山西、河北、辽宁、甘肃、黑龙江、山东、新疆、天津、陕西、内蒙、宁夏、河南 | 北京、吉林 |

3.2. 模型参数估计

由 Geoda 软件得到普通回归模型、空间滞后模型、空间误差模型的计算结果，详细结果见附录，其中参数估计结果见表 5：

Table 5. Model parameter estimation results  
表 5. 模型参数估计结果

|          | 线性回归模型                     | 空间滞后模型                  | 空间误差模型                  |
|----------|----------------------------|-------------------------|-------------------------|
| CONSTANT | -5.82457e-007<br>(1.00000) | -0.0418222<br>(0.56892) | -0.0935872<br>(0.88281) |
| GDP      | 0.758265<br>(0.00397)      | 0.299834<br>(0.00534)   | 0.12092<br>(0.39144)    |
| POP      | 0.939421<br>(0.03279)      | 0.478694<br>(0.01019)   | 0.242784<br>(0.26067)   |
| THI      | -0.0244521<br>(0.90043)    | 0.0456401<br>(0.59980)  | 0.0436489<br>(0.72573)  |
| ELE      | -0.182296<br>(0.65558)     | -0.139384<br>(0.04257)  | -0.0947547<br>(0.60133) |

续表

|           |                        |                        |                        |
|-----------|------------------------|------------------------|------------------------|
| KYL       | -0.484633<br>(0.11177) | -0.253995<br>(0.05439) | -0.153145<br>(0.28563) |
| KJ        | -0.258552<br>(0.45308) | -0.157179<br>(0.30241) | -0.560604<br>(0.70545) |
| TREE      | 0.410644<br>(0.08033)  | 0.176989<br>(0.08029)  | 0.118249<br>(0.39983)  |
| TEM       | -0.394064<br>(0.11661) | -0.154737<br>(0.15438) | -0.911349<br>(0.39248) |
| $\rho$    |                        | 0.849021<br>(0.00000)  |                        |
| $\lambda$ |                        |                        | 0.911349<br>(0.00000)  |

由经典线性回归模型残差的莫兰指数  $I = 0.3147$  (结果见附录) 不等于 0 可以得到, 经典线性回归模型需要考虑空间因素; 空间滞后模型的空间回归系数  $\rho = 0.849021$ ,  $P$  值为 0, 在 0.01 的显著性水平下通过检验; 空间误差模型的残差空间相关系数  $\lambda = 0.911349$ ,  $P$  值为 0, 在 0.01 的显著性水平下通过检验; 无法判断两者谁更显著。但是根据参数显著性, 空间滞后模型的参数显著性明显高于空间误差模型。

3.3. 空间自回归模型的检验

Table 6. Model validation results  
表 6. 模型检验结果

|                 | 线性回归模型               | 空间滞后模型   | 空间误差模型     |
|-----------------|----------------------|----------|------------|
| LM(lag)         | 23.3076<br>(0.00000) |          |            |
| RobustLM(lag)   | 24.6712<br>(0.00000) |          |            |
| LM(error)       | 6.5557<br>(0.01015)  |          |            |
| RobustLM(error) | 7.9192<br>(0.00489)  |          |            |
| Log-likelihood  | -34.6782             | -19.1677 | -22.373026 |
| AIC             | 87.3564              | 58.3354  | 62.7461    |
| SC              | 100.262              | 72.6752  | 75.6519    |

在空间自回归模型中, 判断模型优劣的指标是 Log-likelihood、AIC 和 SC, Log-likelihood 越大, AIC 和 SC 越小, 模型就拟合越好。如表 6 所示, 从模型的拟合度来看空间滞后模型的 Log-likelihood 最大, AIC 和 SC 最小, 所以拟合度最好。LM(lag)和 RobustLM(lag)显著, 说明空间滞后模型优于空间误差模型。

3.4. 空间数据模型应用结果及分析

综上, 本文最终选择空间滞后模型来对空气质量的影响因素进行分析, 参数估结果如表 7 所示。  
空间滞后模型的空间回归系数  $\rho = 0.849021$ ,  $P$  值为 0 并且在 0.01 的显著性水平下通过检验, 这说明空气质量存在空间溢出效应, 空气污染严重的地区, 其污染物气体会通过大气环流作用扩散到周边地区, 进而对周边地区造成污染。影响因素人均地区生产总值(GDP)和地区总人口数(POP)的系数在 0.01 的



**Table 7.** Parameter estimation results of the spatial lag model  
**表 7.** 空间滞后模型参数估计结果

|          | 系数         | P 值     |        | 系数        | P 值     |
|----------|------------|---------|--------|-----------|---------|
| CONSTANT | -0.0418222 | 0.56892 | KYL    | -0.253995 | 0.05439 |
| GDP      | 0.299834   | 0.00534 | KJ     | -0.157179 | 0.30241 |
| POP      | 0.478694   | 0.01019 | TREE   | 0.176989  | 0.08029 |
| THI      | 0.0456401  | 0.59980 | TEM    | -0.154737 | 0.15438 |
| ELE      | -0.139384  | 0.04257 | $\rho$ | 0.849021  | 0.00000 |

显著性水平下通过检验；影响因素地区社会用电量(ELE)和地区公路年度客运量(KYL)的系数在 0.05 的显著性水平下通过检验；地区森林覆盖率(TREE)的系数在 0.1 的显著性水平下通过检验；地区年平均气温(TEM)的系数在 0.15 的显著性水平下通过检验；第二产业占 GDP 比例(THI)和地区专利授权数(KJ)系数 P 值较大，故不显著。

人均地区生产总值(GDP)与空气质量影响正相关显著，而根据之前几年文献的记载，两者之间应该是显著的负相关关系，这说明近几年来，空气质量得到明显的改善，使得两者之间的关系由负相关转向为正相关。

地区总人口数(POP)对空气质量影响正相关显著。因为科技的进步，处理垃圾的技术在不断革新，即使人口增加，所产生的生活垃圾能在不破坏环境的情况下得到妥善的处理。

第二产业占 GDP 比例(THI)对空气质量指数影响不显著，可能是因为各地区空气质量差异本身就很大，各地区的自然环境资源对空气污染物的自我处理能力存在差异，再加上各地政府对环境治理的投入不同以及对第二产业排放的空气污染物的处理方法存在差异。

地区社会用电量(ELE)对空气质量指数影响负相关显著。社会用电量包括工业用电、农业用电、商业用电、居民用电、公共设施用电以及其他用电等等。火力发电一直是我国重要的发电方式，尤其在北方，火力发电的过程中，煤炭燃烧直接排放二氧化硫和氮氧化物，粉煤灰会污染电站附近环境，严重污染大气环境。社会用电量越大，排放到空气中的污染物越多，从而导致空气质量变得越来越差。

地区公路年度客运量(KYL)对我国省域空气质量影响负相关显著。最近几年我国快递行业发展十分地迅猛，公路运输的数量大大增加，目前我国公路运输的主要交通工具是燃油车，尾气排放量越来越多，燃油汽车尾气主要包含氮氧化物和一氧化氮，对大气造成污染，降低空气质量。

地区专利授权数(KJ)对空气质量影响不显著。首先各地空气质量状况存在差异，然后发明的专利不一定全都用在节能减排上，这就导致科技创新能力对各地空气质量影响不显著。

地区森林覆盖率(TREE)对空气质量的影响正相关。森林是天然的净化器，各种各样的植物可以通过自身的循环来净化空气，从而降低空气中颗粒物的浓度，提高空气质量。

地区年平均气温(TEM)对空气质量的负相关影响是勉强显著的。各地区温度越高，在夏季，各地区的制冷设备的使用量就会大幅度增加，导致各地区煤电使用量增加，产生大量有害气体，降低空气质量。

#### 4. 结论

对 2025 年我国 31 个省级行政区(不含港澳台地区)六种污染物的年平均浓度数据，利用熵权 Topsis 法得出六种污染物指标的权重以及空气质量得分情况，根据全域空间自相关法，计算莫兰指数，最后，基于空间滞后模型分析影响空气质量的八个因素，得出的结论如下：

(1) 关于衡量空气质量的各项污染物，它们的权重存在较大差别，二氧化硫权重最高，一氧化氮、细



颗粒物(PM 2.5)和可吸入颗粒物(PM 10)的权重中等, 二氧化氮的权重较小, 臭氧的权重最小。

(2) 我国各省域的空气质量具有十分显著的地理位置差异性, 南方沿海的区域空气质量水平一般很高, 而北方省市除了北京之外的空气质量水平一般较低, 中部内陆沿江地区空气质量处于中等水平。

(3) 我国省域空气质量存在空间依赖性并且空间溢出效应十分显著, 由于区域地理位置特点和大气环流的作用, 我国空气污染严重的地区的污染性气体会随着空气流动到周边地区, 进而对这些周边地区造成大气污染。人均地区生产总值(GDP)和地区森林覆盖率是促进省域空气质量增长的主要因素; 地区社会用电量、地区公路年度客运量和地区年平均气温是制约空气质量提高的主要因素; 科技创新能力、第二产业占 GDP 的比例和空气质量的关系还未得到有效证明。

## 参考文献

- [1] 肖悦. 中国空气质量时空分布特征及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 重庆: 西南大学, 2018.
- [2] 魏琪政, 奚征峰, 崔哲. 京津冀、长三角、珠三角三大城市群空气质量评价与效率研究[J]. 化学工程与装备, 2020(12): 311-312.
- [3] 陆江潇. 长江中下游地区空气质量时空特征及影响因素分析[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2020.
- [4] 郭付友, 陈才, 刘志刚. 城市绿色发展效率的空间分异及影响因素——基于山东省 17 地市面板数据[J]. 世界地理研究, 2020, 29(5): 1040-1048.
- [5] 彭文斌, 尹勇. 环境规制、绿色创新与空间效应——基于 281 个地级市面板数据的实证研究[J]. 湘潭大学学报(哲学社会科学版), 2020, 44(5): 86-91.
- [6] 胡亚权. 空间面板数据模型及其应用研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [7] 张可娟. 空间自回归模型的研究与应用[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2012.
- [8] Xue, Z., Li, N., Mu, H., Zhang, M. and Pang, J. (2021) Convergence Analysis of Regional Marginal Abatement Cost of Carbon Dioxide in China Based on Spatial Panel Data Models. *Environmental Science and Pollution Research International*, **28**, 38929-38946. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-13288-9>
- [9] 李龙飞. 空间计量经济学中的空间自回归模型[J]. 计量经济学报, 2021, 1(1): 36-65.
- [10] 徐娟. 空间溢出对地区经济增长的影响——基于空间面板模型的分析[J]. 贵州商学院学报, 2020, 33(4): 47-53.
- [11] 杨威, 蔡礼彬. 基于空间杜宾模型的旅游业发展与经济增长关系研究——以沿海省份面板数据为例[J]. 生态经济, 2020, 36(11): 125-131.
- [12] Wang, D., Zhou, T., Lan, F. and Wang, M. (2021) ICT and Socio-Economic Development: Evidence from a Spatial Panel Data Analysis in China. *Telecommunications Policy*, **45**, Article 102173. <https://doi.org/10.1016/j.telpol.2021.102173>
- [13] Song, Z.G. (2020) The Third-Country Effects of CO<sub>2</sub> emissions in BRI Countries: A Verification on China's Impacts by Spatial Durbin Panel Data Model. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, **588**, Article 022056. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/588/2/022056>
- [14] 符建华, 周方召. 中国省域空气质量测度及影响因素分析[J]. 城市问题, 2020(5): 20-27.
- [15] 池建宇, 张洋, 晏思雨. 城市的经济发展水平影响空气质量吗——基于中国 31 个省会城市和直辖市的经验验证[J]. 经济与管理, 2014, 28(5): 26-31.
- [16] 赵艳艳, 张晓平, 陈明星, 等. 中国城市空气质量的区域差异及归因分析[J]. 地理学报, 2021, 76(11): 2814-2829.