

金砖五国PM_{2.5}浓度与经济环境因素的关联

潘虹宇*, 吴 冰#

同济大学经济与管理学院, 上海

收稿日期: 2025年8月18日; 录用日期: 2025年9月17日; 发布日期: 2025年10月17日

摘 要

本研究旨在探究金砖国家(巴西、俄罗斯、印度、中国、南非)PM_{2.5}污染的核心驱动因素, 以应对其城市化与经济发展中的环境健康挑战, 并为差异化治理策略提供依据。基于2010~2019年的面板数据, 运用灰色关联模型从人口、人均GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平和森林覆盖率六个维度进行分析。结果表明, 各国核心驱动因素存在显著差异: 城市化水平($r_i = 0.849$)、人口($r_i = 0.881$)和平均寿命($r_i = 0.885$)是影响中国和印度PM_{2.5}浓度的主导因素; 人均GDP ($r_i = 0.780$)与巴西PM_{2.5}污染关联最为密切; 森林覆盖率对中国($r_i = 0.875$)和南非($r_i = 0.959$)的PM_{2.5}浓度具有显著抑制效应, 印证了生态修复工程及自然生态系统在颗粒物去除中的关键作用。本研究揭示了不同发展路径下PM_{2.5}驱动机制的异质性, 强调在环境治理中需统筹经济社会因素与生态保护, 并提出基于国家具体情况的差异化政策建议。

关键词

PM_{2.5}, 金砖五国, 经济社会学, 灰色关联分析

Association between PM_{2.5} Concentrations and Economic/Environmental Factors in BRICS Countries

Hongyu Pan*, Bing Wu#

School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai

Received: August 18, 2025; accepted: September 17, 2025; published: October 17, 2025

Abstract

This study aims to investigate the key driving factors of PM_{2.5} pollution in the BRICS countries

*第一作者。

#通讯作者。

文章引用: 潘虹宇, 吴冰. 金砖五国 PM_{2.5} 浓度与经济环境因素的关联[J]. 可持续发展, 2025, 15(10): 11-19.

DOI: 10.12677/sd.2025.1510280

(Brazil, Russia, India, China, and South Africa), in response to the environmental health challenges posed by their urbanization and economic development, and to provide a basis for differentiated governance strategies. Using panel data from 2010 to 2019 and applying the grey relational analysis model, six dimensions were examined: population, GDP per capita, average life expectancy, energy consumption, urbanization level, and forest coverage rate. The results indicate significant differences in the core driving factors among the countries: urbanization level ($r_i = 0.849$), population ($r_i = 0.881$), and average life expectancy ($r_i = 0.885$) were the dominant factors affecting $PM_{2.5}$ concentrations in China and India; GDP per capita ($r_i = 0.780$) showed the strongest association with $PM_{2.5}$ pollution in Brazil; forest coverage demonstrated a significant inhibitory effect on $PM_{2.5}$ concentrations in China ($r_i = 0.875$) and South Africa ($r_i = 0.959$), underscoring the critical role of ecological restoration projects and natural ecosystems in particulate matter removal. This study reveals the heterogeneity of $PM_{2.5}$ driving mechanisms under different development paths, emphasizing the need to integrate socioeconomic factors and ecological conservation in environmental governance, and proposes tailored policy recommendations based on country-specific conditions.

Keywords

$PM_{2.5}$, BRICS Countries, Socioeconomic Factors, Grey Relational Analysis

Copyright © 2025 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

随着全球经济的快速发展和工业化的不断推进,大量环境不友好的生产和生活方式(汽车尾气排放、化学燃料燃烧等)严重影响了生态环境,导致大气污染事件和异常天气显著增加。 $PM_{2.5}$ 是大气污染物的主要组成部分,是评价空气质量的重要指标。 $PM_{2.5}$ 是指直径小于或等于 $2.5\ \mu m$ 的颗粒物,化学构成主要包含五大类化合物:有机碳(OC)、元素碳(EC)、矿物气溶胶、铵盐(包括硫酸铵 $[(NH_4)_2SO_4]$ 和亚硫酸铵 $[(NH_4)_2SO_3]$)以及硝酸铵(NH_4NO_3),主要来源于汽车尾气、固体废弃物焚烧、工业燃煤、餐饮业无组织排放、秸秆焚烧和柴草燃烧等过程[1]。可以长期悬浮在空气中,并容易携带有毒有害物质。

根据 IQAir 汇总来自 138 个国家和地区,共计 8954 个地点的 4 万多个空气质量监测站点数据,发布的《2024 年全球空气质量报告》显示,空气污染仍然是世界上最大的环境健康威胁,超过 90%与污染有关的死亡发生在低收入和中等收入国家,18 岁以下的儿童、孕妇和老年人因接触空气污染而发生或恶化健康状况的风险较高[1]。长期接触高浓度 $PM_{2.5}$ 可使有毒颗粒物通过呼吸系统渗入人体,引发一系列呼吸系统和心血管疾病,严重威胁人类生命健康[2]。截止 2024 年,全球仅七个国家达到了世界卫生组织设定的年平均 $PM_{2.5}$ 浓度指南值($5\ \mu g/m^3$ 及以下),分别是:澳大利亚、巴哈马、巴巴多斯、爱沙尼亚、格林纳达、冰岛和新西兰。这代表,全球仅有不足 10%的国家和地区的人民所呼吸的空气不会对他们的健康造成威胁[3]。

$PM_{2.5}$ 引起的雾霾和对气候的影响也是新兴市场国家持续关注的主要问题。工业化国家的经济增长需要能源的综合利用,导致废弃物和残余物排放到自然环境中,可能会对环境造成破坏[4]。大部分 $PM_{2.5}$ 排放是使用煤炭、石油等化石燃料产生的,煤炭是与经济增长和发展相关的汽车行业的主要能源。此外,高浓度 $PM_{2.5}$ 还对交通、生态环境等领域造成不利影响。

作为新兴市场国家的“金砖国家”(BRICS),当前仍然是以煤炭为主、石油天然气为辅的能源结构,

处在经济社会高速发展, 城市化水平不断提高, 环境保护需求日益增加的时期, 金砖五国能源、经济联动性在不断加强[5]。2024 年, 在 IQAir 汇总的 138 个国家和地区中, 印度 $\text{PM}_{2.5}$ 年平均浓度排名全球第五, 中国为第二十一位, 南非为四十七位; 在汇总的全球 8954 个城市的空气污染严重程度排名中, 前五十五座城市印度占据 35 座, 中国占据 1 座[2]。金砖五国作为一个由主要新兴经济体组成的合作机制, 其成员国在发展阶段、资源禀赋和环境挑战上具有可比性与差异性, 为研究不同发展路径下的环境压力提供了理想样本。

因此, 本研究希望通过探讨人口、人均 GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平、森林覆盖率对金砖五国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响, 从而准确把握各国 $\text{PM}_{2.5}$ 显著影响因素, 指导决策者因地制宜强化对于某项影响因素的管控从而减少 $\text{PM}_{2.5}$ 排放, 为新兴市场国家实现 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度控制提供有效参考。

2. 文献综述

2.1. 针对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因素的研究

国内外学者对 $\text{PM}_{2.5}$ 的影响因素的研究已积累了大量成果。在过去的研究中, 研究者探究了影响 $\text{PM}_{2.5}$ 排放的多种经济社会学因素, 主要涉及能源消费结构, 产业结构, 城市化水平等。在影响因素的选取上, 更多取决于研究地域的范围和特征, 研究范围通常为农村、城市、国家, 关注的影响因素也有区别。

在农村 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的研究中, 通常根据当地农业、生活方式的不同, 选取不同因素, 主要包括燃烧取暖、烹饪燃烧、农残物燃烧、农业运输活动。Liu 等通过在中国华北地区的数据分析发现, 中国北方农村冬季 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度主要影响因素是煤炭燃烧[6]。Lovarelli, D 等发现, 农业运输活动对于意大利伦巴第大区主要畜牧省的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度有着显著影响[7]。

在城市 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的研究中, 常关注人口规模、城市化水平、经济等影响。张淑平等定量分析中国冬季 114 个重点城市浓度分布的空间格局和人口规模同污染物浓度之间的关系, 探究了城市人口规模和大气污染物浓度的关系[8]。He 等以中国长三角城市群的 27 个城市为例, 分析了城市地区人口密度、经济发展、能源强度、工业污染和公共交通密度对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的贡献[9]。

在国家 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度变化的研究中, 常采用不同国家对比研究的方式, 除了通常讨论的影响外, 还受到是否为发达国家、政策稳定性、国际局势等影响。Cao 等选取美国、欧洲、中国和印度为研究对象, 对比得出发达国家和发展中国家城市化水平对于 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的不同影响[10]。Chen 等探讨了不同收入水平国家的 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度与能源消耗、能源强度、经济增长和城市化之间的关系, 发现经济增长是影响 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要变量, 能源消费结构是影响中低收入国家 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的主要因素[11]。

总体而言, 当前有部分对于国家间 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的对比研究, 但对于金砖五国的 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因素的强度的分析暂时缺乏。同为发展中国家的金砖五国在社会经济角度上有着较多相似与差异, 同时探究金砖五国 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响因素有着较大意义。因此本研究选取了金砖五国进行 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度影响因素的对比研究。

在影响因素的选取上, 本研究选取了国家层次通常关注的人口、人均 GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平等经济社会因素。此外金砖五国在高速发展阶段, 因农业、工业、基础建设带来的环境变化对 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响不容忽视, 因此还增加了森林覆盖率作为环境因素进行探究。

2.2. 灰色关联分析模型

在对于研究 $\text{PM}_{2.5}$ 影响因素时的建模层面, 现有研究常运用的包括: 地理加权回归模型(GWR) [12]、多尺度地理加权回归模型(MGWR) [13]、对数平均迪氏指数分解法(LMDI) [14]、数据包络分析(DEA) [15]、方差分析[16]等。但这些方法都有一些不足之处: (1) 需要大量数据; (2) 观测样本需符合特定概率分布

假设; (3) 计算量大; (4) 可能出现量化结果与定性分析结果不符的现象[17]。对于金砖五国而言, 印度、俄罗斯、中国常有统计数据有限的情况, 现有数据灰度较大, 且俄罗斯和南非的人均 GDP、能源消耗和巴西的人均 GDP 等许多数据波动较大, 没有典型的分布规律。因此, 采用数理统计方法往往难以奏效。

相较于传统参数估计及假设检验方法, 灰色关联分析方法规避了协变量多重共线性及模型误设风险; 计算量小, 在有限样本下具备较强可操作性; 不会出现量化结果与定性分析结果不符的情况[17]。因此灰色关联模型常用于分析包含环境因子的影响因素。Rehman 等利用灰色关联模型探讨了亚洲碳排放、城市化、人口增长、能源消耗和经济发展之间关系, 并对各影响因素进行排序[18]; Alshuwaikhat 等基于灰色关联模型构建了沙特阿拉伯环境可持续性评估综合指数[19]。

2.3. 研究评述

因此, 本文在借鉴前人研究的基础上, 本文以 2010~2019 年的金砖五国人口、人均 GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平、森林覆盖率因素为数据源, 采用灰色关联模型, 探讨各国对于 PM_{2.5} 浓度影响影响强度最高的因素, 从而对未来降低 PM_{2.5} 浓度的政策方向提供建议。

3. 数据收集与分析

本文采用 2010~2019 年的年度时间序列数据进行实证分析。采用的包括巴西、俄罗斯、印度、中国、南非五国的人口、人均 GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平、森林覆盖率的数据。解释变量数据: 即使用单位千吨石油当量代表能源消耗; 人均 GDP 使用的是美元; 用森林面积占土地面积百分比代表森林覆盖率的情况; 用城市人口占总人口的比例表示城市化水平; 此外还有总人口、平均寿命、空气中 PM_{2.5} 含量的数据用于数据分析。本文使用的所有研究数据都来自世界银行公开数据(World Bank Open Data)[20]。所有数据分析均在 MATLAB 和微软 Excel 中执行。

4. 建模与结果分析

4.1. 邓氏灰色关联度计算方法

邓氏灰色关联度是邓聚龙教授 1985 年提出的用于分析系统变量之间关系的方法, 是围绕接近程度, 即灰色关联度(GRG)的估计建立的[21]。邓氏灰色模型是基于相应序列点之间的空间计算系统因素的趋势相似度。计算基本步骤如下[22]:

(1) 确定特征序列和因素序列:

确定反映系统特征行为的特征序列(母序列)和影响系统行为的若干因素序列(子序列)。设特征序列为 $x_0 = \{x_0(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, 因素序列为 $x_i = \{x_i(k) | k = 1, 2, \dots, n\}$, $i = 1, 2, 3, \dots, m$ 。

(2) 标准化处理:

由于系统中各因素的单位或量纲不同, 数据无法直接比较。因此在实施灰色关联分析之前, 需对原始数据序列进行归一化预处理以消除量纲差异, 具体采用基准化处理方法构建初值像, 记特征序列初值像为 x'_0 , 因素序列初值像为 x'_i , 由下列公式可得:

$$x'_0 = \frac{x_0(k)}{x_0(1)}, \quad x'_i = \frac{x_i(k)}{x_i(1)} \quad (1)$$

其中, $x_i(1)$ 表示第 i 个序列的首项观测值。该变换通过将各序列元素除以其初始值, 实现数据集的量纲一致性转化, 从而构建具有可比性的无量纲比值矩阵。相较于极差标准化法, 初值法能有效保持序列的几何形态特征[21], 为后续关联度计算提供满足平移不变性要求的规范化数据基础。

(3) 计算绝对值序列

求特征序列与因素序列初值像对应分量之差的绝对值序列, 记为 $\Delta_i(k)$, 则:

$$\Delta_i(k) = |x'_0 - x'_i| \tag{2}$$

(4) 求极差最大值 M 和极差最小值 m :

$$M = \max_i \max_k \Delta_i(k), \quad m = \min_i \min_k \Delta_i(k) \tag{3}$$

(5) 求关联度系数:

$$r_i(k) = \frac{m + \rho M}{\Delta_i(k) + \rho M} \tag{4}$$

式中 ρ 为分辨系数, 一般取 0.5, 作用是抑制离群值对关联度计算的敏感性, 提高不同关联序间的区分效度。

(6) 计算加权关联度

各个时刻的关联系数的平均值 r_i 即是两序列间的关联度, 公式如下:

$$r_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n r_i(k) \tag{5}$$

(7) 优势因素分析

根据关联度 r_i 大小排序确定特征序列与各因素序列间的关联程度。一般认为, 当 $r_i < 0.5$ 时, 序列间的关联不密切; 当 $0.5 \leq r_i < 0.75$ 时, 关联比较密切; 当 $0.75 \leq r_i < 0.9$ 时, 关联密切; $r_i \geq 0.9$ 时, 关联最密切[21]。

将各国 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度作为特征序列 x_0 , 城市化水平、人口、人均 GDP、平均寿命、森林面积、能源消耗作为因素序列 $x_i (i = 1, 2, 3, \dots, m)$, 建立邓氏灰色关联分析模型。

4.2. 邓氏灰色关联分析

4.2.1. 原始数据标准化预处理

将原始数据建立数据矩阵并使用公式 4.1 进行基准化转换, 构造各序列的初值像。

4.2.2. 关联度计算与驱动因子分析

计算特征序列和因素序列的关联系数, 从而得 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度与环境、经济的邓氏灰色关联度, 如下表 1。

Table 1. Deng's grey relational degree between $\text{PM}_{2.5}$ exposure concentration and environment, economy
表 1. $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度与环境、经济的邓氏灰色关联度

国家	城市化水平	人口	人均 GDP	平均寿命	森林面积	能源消耗
巴西	0.6931	0.6592	0.7803	0.6924	0.7370	0.5646
中国	0.8493	0.8806	0.5754	0.8851	0.8753	0.7433
印度	0.7707	0.7772	0.6765	0.7592	0.7185	0.7199
俄罗斯	0.6794	0.6799	0.5856	0.6486	0.6687	0.6190
南非	0.7514	0.6732	0.5929	0.6319	0.9588	0.7637

在 6 项干涉因子中, 南非的森林面积与 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度的关系最密切($r_i > 0.9$); 巴西的人均 GDP, 中国的城市化水平、人口、平均寿命、森林面积, 印度的城市化水平、人口、平均寿命, 南非的能源消耗、城市化水平平均与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系密切($0.75 \leq r_i < 0.9$); 其余指标与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度关系较密切($0.5 \leq r_i < 0.75$)。

4.3. 结果讨论

本研究采用灰色关联模型, 对 2010~2019 年金砖国家 PM_{2.5} 暴露浓度与六项经济社会驱动因子之间的关系进行了定量分析, 数据结果显示数值都大于 0.5, 皆属于较强和极强的相关范围内, 表明各国核心驱动因素存在显著差异, 揭示了不同发展阶段和资源禀赋国家污染治理路径的异质性。

如图 1 所示, 呈现出的是研究区域内经济发展系统的各项具体指标对 PM_{2.5} 暴露浓度的灰色关联度。该柱状图能够比较客观和科学地反映出在经济发展进程中的具体指标对环境的影响。

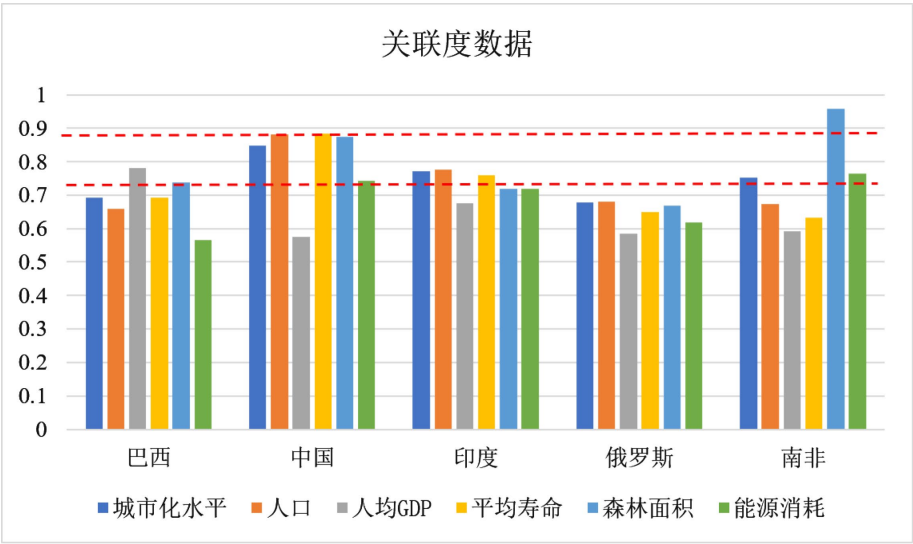


Figure 1. Bar chart of Deng's grey relational degree between PM_{2.5} exposure concentration and environment, economy
图 1. PM_{2.5} 暴露浓度与环境、经济的邓氏灰色关联度柱状图

分析表明, 各国 PM_{2.5} 浓度的核心驱动机制各不相同。

中国的 PM_{2.5} 浓度与城市化水平($r_i = 0.849$)、人口($r_i = 0.881$)、平均寿命($r_i = 0.885$)和森林面积($r_i = 0.875$)均呈现高度关联。尤其值得注意的是, 城市化水平的关联度超过了能源消耗($r_i = 0.743$), 这表明在中国快速城镇化进程中, 城市扩张带来的建筑扬尘、交通拥堵、生活能源需求激增等综合效应, 已成为比单一工业排放更核心的驱动机制。同时, 森林面积的高关联度也印证了退耕还林等生态工程对空气质量改善的积极作用。

印度同样显示出与城市化水平($r_i = 0.771$)和人口($r_i = 0.777$)的高度关联, 证实了人类活动集聚是其污染的主要来源。但与中国的差异在于, 其能源消耗关联度($r_i = 0.720$)相对更接近城市化水平, 暗示印度城市在基础设施、排放标准和能源效率方面的不足, 可能使其城市化进程的污染排放强度更高。加之独特的农业焚烧季节性污染源, 构成了更复杂的污染图谱。

巴西呈现出独特模式, 其人均 GDP ($r_i = 0.780$)关联度位居各因素之首, 凸显了经济发展与环境压力的直接矛盾。这与其依赖农业扩张和亚马逊雨林开发的经济增长方式密切相关。森林面积($r_i = 0.737$)较高的关联度则体现了雨林在拦截和沉降颗粒物方面的关键作用, 但其持续缩减正在削弱这一生态服务功能。

南非的研究结果最为突出, 森林面积($r_i = 0.959$)显示出极强的关联性。这主要源于其大规模集约化商业人工林基地的生态效应。然而, 其能源消耗($r_i = 0.764$)与城市化水平($r_i = 0.751$)也呈现高度关联, 反映了采矿活动和能源密集型产业叠加带来的污染压力, 形成了独特的“抑制 - 驱动”双重作用机制。

俄罗斯各因素关联度相对均衡且较低, 与其已完成城市化进程、经济结构转型、人口稳定低增长的

发展阶段相符, 污染物排放已进入低水平稳态期。

总体而言, 本研究说明, 发展中国家在城市化与经济增长阶段普遍面临 $\text{PM}_{2.5}$ 污染压力, 但各国核心驱动力存在显著差异。森林生态系统被视为重要的自然解决方案, 但其保护与经济发展的矛盾(如巴西、南非)仍是巨大挑战。

5. 总结展望

5.1. 研究结果

基于上述国别化研究发现, 本研究提出以下更具针对性的政策建议:

① 实施差异化的城市与环境治理策略

中国与印度应推行精准城市化模式, 重点优化城市内部结构而非规模扩张。建议发展紧凑型城市和公共交通导向(TOD)开发, 以降低通勤污染; 并建立人口流动碳足迹核算体系, 为超大城市制定基于环境承载力的人口密度阈值。

巴西需着力构建绿色 GDP 核算体系, 将环境成本内部化。应强化其创新的森林采伐配额交易机制和生态服务付费(PES)制度, 确保雨林的生态价值不低于农业扩张的收益, 从根本上解决发展与保护的矛盾。

② 推动基于核心污染源的产业升级与技术干预

印度的治理重点在于农业废弃物的资源化利用。需加大投资, 推广秸秆还田、生物质发电等技术, 并配套相应的财政补贴和机械支持, 从源头减少季节性焚烧。

南非需在矿业和林业领域推行绿色供应链管理。对采矿活动强制实施更严格的抑尘、除尘标准, 同时优化人工林结构, 提升其生态功能而非单一的经济产出。

中国应继续深化能源结构与产业结构调整, 推动低碳技术扩散。

③ 强化基于森林生态系统的精准增汇减排

对南非和中国等森林关联度高的国家, 应实施差异化增汇工程。南非需加强矿区的生态修复和耐旱树种造林, 中国则可探索将生态补偿机制与 $\text{PM}_{2.5}$ 减排配额交易市场相结合, 让森林的生态价值产生经济效益。

巴西则需严格执行生态服务付费(PES)制度, 构建“造林权-砍伐权”市场, 为雨林保护提供可持续的资金流。

④ 构建金砖国家环境信息共享与合作平台

鉴于 $\text{PM}_{2.5}$ 的跨境传输特性, 建议共建“金砖国家环境信息共享与合作平台”。优先推动统一的大气污染物清单编制规范、共享实时空气质量监测数据和污染溯源技术, 为未来的区域协同治理奠定科学基础。

5.2. 理论贡献与实践意义

5.2.1. 理论贡献

本文在研究样本选择上, 以金砖国家(BRICS)作为新兴经济体的代表, 构建了一个具有典型性与差异性的研究框架。这些国家在发展阶段、资源禀赋和经济结构上既存在共性, 也具有显著异质性, 为理解不同发展路径下的环境压力提供了良好的比较样本。

本文在构建影响因素体系时, 创新地将经济社会因素与环境因子纳入统一分析框架, 突破了以往研究中侧重于经济或能源变量的传统范式。实证结果表明, 森林覆盖率与 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度呈现显著负相关, 在南非和中国尤为突出。这一发现不仅从跨国比较视角验证了森林生态系统对空气质量的服务功能, 也为“基于自然的解决方案”(NbS)提供了来自新兴经济体的实证支持。

5.2.2. 实践意义

本研究通过面板数据与灰色关联分析, 不仅揭示了五国 $\text{PM}_{2.5}$ 污染驱动机制的共同特征, 更重点辨析了各国的主导因素和影响路径的差异, 从而为同类新兴经济体实施差异化环境治理策略提供了理论参考和实践依据。

本研究通过构建环境和经济社会多维影响体系, 提供更加全面的解决措施, 表明在工业化与城市化进程之中, 实施退耕还林、天然林保护、生态修复等政策, 能够有效协同经济增长与环境治理, 为实现可持续发展目标提供重要路径。

5.2.3. 不足与展望

本文从定量分析出发, 采用灰色关联分析探讨金砖五国人口、人均 GDP、平均寿命、能源消耗、城市化水平、森林覆盖率与空气中 $\text{PM}_{2.5}$ 暴露浓度的关联度, 但是由于时间和个人能力的限制, 本文还有进一步完善的地方:

(1) 本文基于多因素的考虑来进行研究, 对于已有数据的相关性进行了分析, 但缺少对于未来的预测, 期望在以后的研究中实现对未来变化的预测, 从而更好地给出减少 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的建议。

(2) 本文利用了灰色关联度模型评价关联度, 虽然在处理小样本数据上有优势, 但未来研究若能引入产业结构(第二产业占比)、外资水平(FDI)、环境研发投入、以及重大环境政策实施时间点等控制变量, 将能更精确地识别出各类因素的独立影响, 并减少遗漏变量偏误。

参考文献

- [1] 郭新彪, 魏红英. 大气 $\text{PM}_{2.5}$ 对健康影响的研究进展[J]. 科学通报, 2013, 58(13): 1171-1177.
- [2] 王明玉, 司莉青, 陈锋, 等. 森林火灾污染物释放及其影响研究进展[J]. 生态学报, 2024, 44(12): 4933-4944.
- [3] IQAir. 2024 年世界空气质量报告[EB/OL]. 2024-03-05. <https://www.iqair.cn/cn/newsroom/waqr-2024-pr>, 2024-06-15.
- [4] 李雅男, 丁振民, 邓元杰, 等. 中国城市工业化发展与 $\text{PM}_{2.5}$ 的关系: 兼论 EKC 曲线形成的内在机制[J]. 环境科学, 2020, 41(4): 1987-1996.
- [5] 梁大鹏, 刘天森, 李一军. 基于 LMDI 模型的金砖五国二氧化碳排放成本及其影响因素比较研究[J]. 资源科学, 2015, 37(12): 2319-2329.
- [6] Liu, P., Zhang, C., Xue, C., *et al.* (2017) The Contribution of Residential Coal Combustion to Atmospheric $\text{PM}_{2.5}$ in Northern China during Winter. *Atmospheric Chemistry and Physics*, **17**, 11503-11520.
- [7] Lovarelli, D., Conti, C., Finzi, A., Bacenetti, J. and Guarino, M. (2020) Describing the Trend of Ammonia, Particulate Matter and Nitrogen Oxides: The Role of Livestock Activities in Northern Italy during Covid-19 Quarantine. *Environmental Research*, **191**, Article ID: 110048. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.110048>
- [8] 张淑平, 韩立建, 周伟奇, 等. 城市规模对大气污染物 NO_2 和 $\text{PM}_{2.5}$ 浓度的影响[J]. 生态学报, 2016, 36(16): 5049-5057.
- [9] He, Y., Lin, K., Liao, N., Chen, Z. and Rao, J. (2022) Exploring the Spatial Effects and Influencing Factors of $\text{PM}_{2.5}$ Concentration in the Yangtze River Delta Urban Agglomerations of China. *Atmospheric Environment*, **268**, Article ID: 118805. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2021.118805>
- [10] Shisong, C., Wenji, Z., Hongliang, G., Deyong, H., You, M., Wenhui, Z., *et al.* (2018) Comparison of Remotely Sensed $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations between Developed and Developing Countries: Results from the US, Europe, China, and India. *Journal of Cleaner Production*, **182**, 672-681. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.02.096>
- [11] Chen, J., Zhou, C., Wang, S. and Li, S. (2018) Impacts of Energy Consumption Structure, Energy Intensity, Economic Growth, Urbanization on $\text{PM}_{2.5}$ Concentrations in Countries Globally. *Applied Energy*, **230**, 94-105. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2018.08.089>
- [12] Chen, J., Zhou, C.S., Wang, S.J., *et al.* (2018) Identifying the Socioeconomic Determinants of Population Exposure to Particulate Matter ($\text{PM}_{2.5}$) in China Using Geographically Weighted Regression Modeling. *Environmental Pollution*, **241**, 494-503.
- [13] Yue, H., Duan, L., Lu, M., Huang, H., Zhang, X. and Liu, H. (2022) Modeling the Determinants of $\text{PM}_{2.5}$ in China

- Considering the Localized Spatiotemporal Effects: A Multiscale Geographically Weighted Regression Method. *Atmosphere*, **13**, Article 627. <https://doi.org/10.3390/atmos13040627>
- [14] Huang, H., Jiang, P. and Chen, Y. (2023) Analysis of the Social and Economic Factors Influencing PM_{2.5} Emissions at the City Level in China. *Sustainability*, **15**, Article 16335. <https://doi.org/10.3390/su152316335>
- [15] Zhou, Y., Li, L., Sun, R., Gong, Z., Bai, M. and Wei, G. (2019) Haze Influencing Factors: A Data Envelopment Analysis Approach. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**, Article 914. <https://doi.org/10.3390/ijerph16060914>
- [16] Yang, H., Chen, W. and Liang, Z. (2017) Impact of Land Use on PM_{2.5} Pollution in a Representative City of Middle China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **14**, Article 462. <https://doi.org/10.3390/ijerph14050462>
- [17] 徐丽丽. 陕西省产业结构变动与能源消费关系研究[D]: [硕士学位论文]. 西安: 西安建筑科技大学, 2015.
- [18] Rehman, E. and Rehman, S. (2022) Modeling the Nexus between Carbon Emissions, Urbanization, Population Growth, Energy Consumption, and Economic Development in Asia: Evidence from Grey Relational Analysis. *Energy Reports*, **8**, 5430-5442. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2022.03.179>
- [19] Alshuwaikhat, H.M., Adenle, Y.A. and Alotaishan, T.N. (2023) The Development of a Grey Relational Analysis-Based Composite Index for Environmental Sustainability Assessment: Towards a Net-Zero Emissions Strategy in Saudi Arabia. *Heliyon*, **9**, e18192. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e18192>
- [20] The World Bank (2023) World Bank Open Data. The World Bank. <https://data.worldbank.org/>
- [21] 邓聚龙. 灰色控制系统[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 1995.
- [22] 范文燕, 王玲, 汪鑫, 等. 环境干扰因子防控措施与鄱阳湖生态经济区血吸虫病疫情的邓氏灰色关联分析[J]. 中国血吸虫病防治杂志, 2016, 28(6): 635-643.