

区域旅游发展与空气质量时空耦合 协调度分析

——以河北省为例

韩 菲, 李志新*, 高利鹏

河北工程大学数理科学与工程学院, 河北 邯郸

收稿日期: 2025年10月11日; 录用日期: 2025年11月2日; 发布日期: 2025年11月12日

摘 要

本研究基于2014~2022年河北省11个地级市的面板数据, 构建了包含旅游发展和空气质量两大子系统的评价指标体系。研究综合运用组合客观赋权法、耦合协调度模型(CCDM)和探索性空间数据分析(ESDA)等方法, 对河北省旅游发展与空气质量的综合水平、时空耦合协调关系及空间集聚特征进行了系统性分析。研究发现: 1) 旅游发展水平整体波动上升, 但城市间不均衡; 空气质量水平则普遍显著提升, 呈现梯度扩散特征。2) 两者耦合协调水平总体不高但呈上升趋势, 空间上表现为“北高南低”格局, 且普遍存在旅游发展滞后于空气质量改善的现象。3) 耦合协调水平存在显著的空间集聚效应, 主要表现为“高-高”(H-H)聚集和“低-低”(L-L)聚集, 但该格局在近年受到外部事件冲击而有所减弱。

关键词

旅游发展, 空气质量, 耦合协调, 时空演化, 河北省

Spatiotemporal Coupling Coordination Analysis of Regional Tourism Development and Air Quality —A Case Study of Hebei Province

Fei Han, Zhixin Li*, Lipeng Gao

School of Mathematics and Physics Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan Hebei

Received: October 11, 2025; accepted: November 2, 2025; published: November 12, 2025

*通讯作者。

文章引用: 韩菲, 李志新, 高利鹏. 区域旅游发展与空气质量时空耦合协调度分析[J]. 统计学与应用, 2025, 14(11): 132-147. DOI: 10.12677/sa.2025.1411317

Abstract

This study is based on panel data from 11 prefecture-level cities in Hebei Province from 2014 to 2022, constructing an evaluation index system encompassing two subsystems: tourism development and air quality. By comprehensively applying a combined objective weighting method, the coupling coordination degree model (CCDM), and exploratory spatial data analysis (ESDA), the research systematically analyzes the comprehensive levels, spatiotemporal coupling coordination relationships, and spatial agglomeration characteristics of tourism development and air quality in Hebei Province. The findings are as follows: 1) The level of tourism development has generally fluctuated upward, but significant disparities exist among cities; air quality levels have generally improved significantly, exhibiting a gradient diffusion pattern. 2) The overall coupling coordination level between the two systems is not high but shows an upward trend, with a spatial pattern characterized as “high in the north and low in the south,” and a prevalent phenomenon where tourism development lags behind improvements in air quality. 3) The coupling coordination level exhibits significant spatial agglomeration effects, primarily manifested as “High-High” (H-H) and “Low-Low” (L-L) clusters, although this spatial pattern has weakened in recent years due to external shocks.

Keywords

Tourism Development, Air Quality, Coupling Coordination, Spatio-Temporal Evolution, Hebei Province

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

习近平总书记在5月17日全国旅游发展大会上作出重要指示：“旅游业从小到大、由弱渐强，日益成为新兴的战略性支柱产业和具有显著时代特征的民生产业、幸福产业”[1]。改革开放40余年来，中国旅游业蓬勃发展，不仅促进了经济的增长，也为人们的生活质量提升做出了贡献，其中，2019年旅游业对GDP的综合贡献为10.94万亿元，占GDP总量的11.05%，旅游直接就业2825万人，旅游直接和间接就业7987万人，占全国就业总人口的10.31%[2]。然而，在此过程中，旅游业可持续发展与空气质量保护之间的平衡问题也日益凸显。大规模的旅游开发活动、游客数量的急剧增加以及配套设施的运营给目的地的自然环境，尤其是空气质量造成了不容忽视的负面影响。人们逐渐意识到，曾被视为“无烟产业”的旅游业并非“无污染产业”。而空气污染不仅会对旅游者的健康和体验质量产生影响，更为重要的是，会强化人们对旅游风险的感知，在很大程度上损害目的地的旅游形象，进而对整个旅游经济产生不可忽视的负面影响[3]。因此，有必要实现旅游发展与空气质量之间的耦合协调，以促进旅游业的可持续发展，确保空气质量的长期改善，最终实现旅游发展与空气质量保护的和谐共生。

近年来，随着旅游发展与空气质量之间作用机制研究的不断深入，理清两系统复杂的相互作用关系，实现两者的协同发展，确定一致性定位，成为当前研究的焦点。目前为止，空气质量多作为生态环境的一部分存在于与旅游发展的相互关系研究中，众多学者已在全国范围[4] [5]、区域层面[6] [7]、省域层面[8]、市(县)域层面、景区层面[9]等不同研究尺度下探究过旅游发展与生态环境的耦合协调关系，揭示了实现两者耦合协调对于保护环境、实现旅游产业的可持续发展至关重要。然而，单独将空气质量作为一

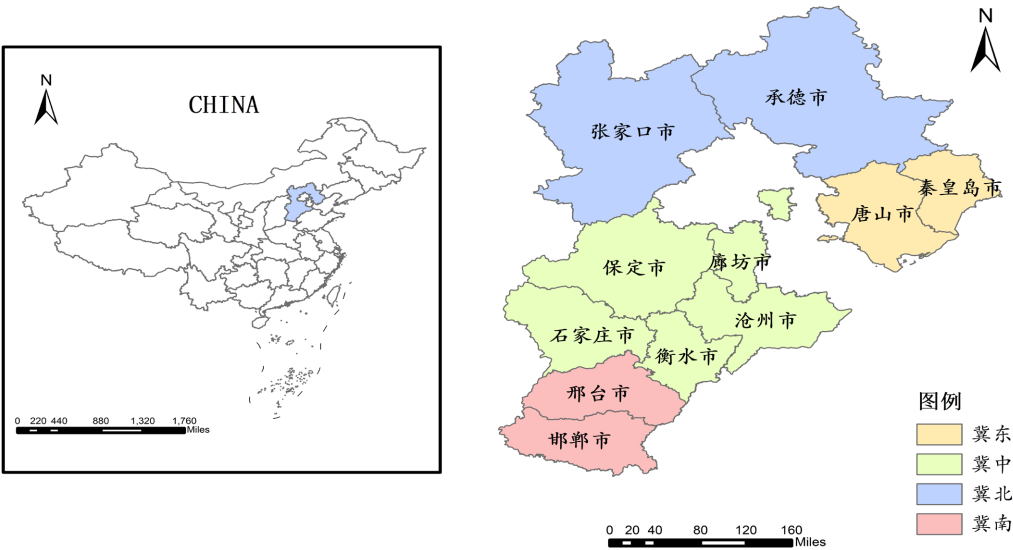
个子系统与旅游发展进行耦合协调的研究尚不多见，且学者们多以单个或多个污染物项目作为空气质量子系统的评估指标，未考虑到影响空气质量变化的压力变量和响应对策，如污染物排放源、植被面积等。最后，河北省凭借其丰富的自然景观、悠久的历史文化和独特的地理位置，成为中国旅游业的重要组成部分，更在国家大气污染防治行动计划指导下，空气质量显著提升，但对于旅游发展与空气质量的耦合协调研究涉及较少，缺乏充分的科学解释。

鉴于此，本文选取了 2014~2022 年河北省 11 个地级市的面板数据进行实证研究。首先，构建了基于旅游发展与空气质量耦合协调关系的评价指标体系，运用熵权法和变异系数客观确定指标权重，综合权重采用最小相对信息熵方法确定。在此基础上，采用加权求和方法计算综合评估值，运用 CCDM 从多维度探讨旅游发展与空气质量耦合协调关系的演变，分析了河北省 11 个地级市之间的差异。最后引入 ESDA，深入探究耦合协调结果的空间集聚特征和关联模式。研究结果不仅丰富了旅游发展与空气质量耦合协调的科学研究，同时为地方政府制定协同发展战略提供了有价值的理论参考。

2. 研究区域和数据来源

2.1. 研究区域

河北省地处京畿要地，历史悠久，文化底蕴深厚，是中华文明重要的发祥地之一，同时地理独特，有着丰富的人文和自然景观。而河北省空气质量状况不容乐观，据生态环境部公布的 2024 年 10 月全国环境空气质量状况显示，当月河北省“后十”总数在全国各省份中位居第一。旅游发展与空气质量不平衡性突出，人与自然关系不协调，制约了河北省旅游业的可持续发展。因此，以河北省作为研究对象，促进旅游发展与空气质量的协调发展是有必要的。根据中国地理位置划分，将河北省划分为冀北、冀东、冀中和冀南四个区域，如图 1 所示。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图[审图号 GS (2022) 1873 号]制作，底图无修改。

Figure 1. Study area
图 1. 研究区域

2.2. 数据来源

为了保证数据的时效性和一致性，本文选择 2014~2022 年的河北省 11 个地级市作为分析对象。其中，

旅游专利授权数数据来源于国家知识产权局(<https://pss-system.cponline.cnipa.gov.cn/conventionalSearch>), 旅游相关政务服务数量从河北政务服务网(<http://www.hbzwfw.gov.cn/index.html>)获得, 空气质量数据采集于中国空气质量在线监测分析平台(<https://www.aqistudy.cn/historydata/>), 人工造林面积获取于河北省林业统计数据管理系统(<http://lycy.hebei.gov.cn/report/>), 其余空气质量数据与旅游经济数据来源于 2015~2023 年的《河北省统计年鉴》《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》、各地级市统计年鉴、统计公报以及河北省各地级市部分相关政府部门, 缺失数据采用线性插值法等方法进行填补。

3. 研究方法

3.1. 指标体系构建

为探讨河北省 11 个地级市旅游发展与空气质量之间耦合协调关系的时空演化特征和空间集聚现象, 在现有研究基础上[5][9]-[11], 结合河北省实际情况, 遵循科学客观的原则, 从多维视角构建了旅游发展与空气质量耦合协调关系的评价指标体系, 空气质量子系统遵循由 Rapport 和 Friend (1979) [12]提出的压力-状态-响应(P-S-R)模型来创建指标体系。与以往研究相比, 本研究所选取的指标综合考虑了影响空气质量变化的压力因素和相应的对策措施, 旨在构建一个更为全面的评价指标体系。最终, 本文选取旅游发展的 4 个一级指标和 22 个二级指标, 空气质量的 3 个一级指标和 18 个二级指标, 构成旅游发展-空气质量综合评价指标体系, 如表 1、表 2 所示。

3.2. 权重计算

为消除主观因素造成的偏差, 本文以变异系数和熵权法相结合的组合客观赋权法确定旅游发展与空气质量子系统各评估指标的权重, 采用最小相对信息熵的方法对两种权重结果进行结合[13]。具体测算步骤如下:

1) 数据标准化

本文采用极差标准化法对指标数据进行标准化处理, 针对不同的指标属性, 其标准化公式[12]为:

正向指标:

$$r_{ij} = \frac{X_{ij} - \min\{X_j\}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (1)$$

负向指标:

$$r_{ij} = \frac{\max\{X_j\} - X_{ij}}{\max\{X_j\} - \min\{X_j\}} \quad (2)$$

其中, r_{ij} 表示标准化后的数据, 取值范围为[0, 1], X_{ij} 表示原始数据, $\min\{X_j\}$ 和 $\max\{X_j\}$ 分别表示 j 指标在所有年份中取值最小和最大数据。

2) 利用变异系数计算各指标的权重:

$$u_j = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n r_{ij} \quad (3)$$

$$\sigma_j = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (r_{ij} - u_j)^2} \quad (4)$$

$$CV_j = \frac{\sigma_j}{u_j} \quad (5)$$

$$\omega_{1j} = \frac{CV_j}{\sum CV_j} \tag{6}$$

式中， u_j 表示第 j 个指标的均值， σ_j 表示第 j 个指标的标准差， CV_j 表示第 j 个指标的变异系数， ω_{1j} 表示第 j 个指标的权重。

3) 利用熵权法确定各指标的权重：

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=1}^n r_{ij}} \tag{7}$$

$$E_j = -\frac{1}{\ln(n)} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln(p_{ij}) \tag{8}$$

$$D_j = 1 - E_j \tag{9}$$

$$\omega_{2j} = \frac{D_j}{\sum D_j} \tag{10}$$

式中， p_i 表示第 i 个样本第 j 个指标在 j 指标所有样本数量上占的比重， E_j 为每个指标的信息熵， D_j 表示各个指标之间的差异程度， ω_{2j} 表示第 j 个指标的权重。

4) 利用最小相对信息熵原则对两种权重值进行组合，以确定最终权重分配：

$$\min_{\omega_j} D_{KL}(\omega_j \parallel \alpha\omega_{1j} + (1-\alpha)\omega_{2j}) = \sum \omega_j \log \frac{\omega_j}{\alpha\omega_{1j} + (1-\alpha)\omega_{2j}} \tag{11}$$

$$\sum \omega_j = 1 \tag{12}$$

$$\omega_j \geq 0, \forall j \tag{13}$$

其中，式(11)为最小相对信息熵的目标函数， ω_j 表示第 j 个指标的最终所占权重， α 介于0~1之间，决定两种权重确定方法的贡献比例，一般情况下认为两种权重方法同等重要[7][14]， α 值设定为0.5。为了确保权重的合法性和归一性，添加式(12)和式(13)两个约束条件。

Table 1. Evaluation indicator system and indicator weights for tourism development
表 1. 旅游发展的评价指标体系及指标权重

子系统	一级指标	二级指标	指标属性	变异系数	熵权法	最小相对信息熵
旅游发展	旅游效益	X1 总旅游收入(亿元)	+	0.0419	0.0383	0.0404
		X2 国际旅游接待人数(人次)	+	0.0590	0.0816	0.0698
		X3 国际旅游创汇收入(万美元)	+	0.0725	0.1020	0.0865
		X4 国内旅游接待人数(万人次)	+	0.0373	0.0298	0.0335
		X5 国内旅游收入(亿元)	+	0.0395	0.0336	0.0366
		X6 旅游业总收入占第三产业 GDP 比重(%)	+	0.0508	0.0508	0.0510
		X7 旅游业总收入占全市 GDP 比重(%)	+	0.0524	0.0519	0.0525
旅游资源禀赋		X8 A 级景区数量(个)	+	0.0225	0.0137	0.0176
		X9 公共图书馆图书藏量(万册)	+	0.0453	0.0376	0.0414
		X10 公园面积(公顷)	+	0.0464	0.0464	0.0466

续表

服务保障	X11 旅行社数量(家)	+	0.0366	0.0329	0.0349
	X12 星级宾馆数量(家)	+	0.0341	0.0272	0.0306
	X13 限额以上住宿业企业数(个)	+	0.0440	0.0383	0.0412
	X14 限额以上餐饮业企业数(个)	+	0.0355	0.0269	0.0311
	X15 高速公路里程(公里)	+	0.0357	0.0313	0.0336
	X16 道路清扫保洁面积(万平方米)	+	0.0509	0.0524	0.0519
	X17 年末实有公共汽(电)车营运车辆数(辆)	+	0.0423	0.0395	0.0411
科技创新 与政策 支持	X18 旅游专利授权数(个)	+	0.0608	0.0758	0.0682
	X19 R&D 内部经费支出(万元)	+	0.0511	0.0507	0.0511
	X20 旅游相关政务服务数量(个)	+	0.0670	0.0744	0.0710
	X21 移动电话用户数(万户)	+	0.0380	0.0345	0.0364
	X22 互联网宽带接入用户数(万户)	+	0.0364	0.0302	0.0333

Table 2. Evaluation indicator system and indicator weights for air quality
表 2. 空气质量的评价指标体系及指标权重

子系统	一级指标	二级指标	指标属性	变异系数	熵权法	最小相对信息熵
空气质量	压力(P)	Y1 工业 SO ₂ 排放量(吨)	-	0.0297	0.0163	0.0223
		Y2 工业氮氧化物排放量(吨)	-	0.0340	0.0215	0.0274
		Y3 碳排放量(万吨)	-	0.0361	0.0226	0.0289
		Y4 工业烟(粉)尘排放量(吨)	-	0.0282	0.0159	0.0214
		Y5 城市建成区面积(平方公里)	-	0.0600	0.0627	0.0620
	状态(S)	Y6 AQI	-	0.0534	0.0466	0.0505
		Y7 PM _{2.5} (ug/m ³)	-	0.0552	0.0503	0.0533
		Y8 PM ₁₀ (ug/m ³)	-	0.0485	0.0388	0.0439
		Y9 CO (ug/m ³)	-	0.0492	0.0398	0.0448
		Y10 SO ₂ (ug/m ³)	-	0.0485	0.0403	0.0448
		Y11 NO ₂ (ug/m ³)	-	0.0750	0.0902	0.0831
		Y12 O ₃ (ug/m ³)	-	0.0901	0.1045	0.0984
		Y13 空气质量优良率(%)	+	0.0646	0.0657	0.0657
	响应(R)	Y14 公园绿地面积(公顷)	+	0.1189	0.1819	0.1487
		Y15 建成区绿化覆盖率(%)	+	0.0370	0.0236	0.0299
		Y16 生活垃圾无害化处理率(%)	+	0.0188	0.0079	0.0123
		Y17 污水处理厂集中处理率(%)	+	0.0334	0.0218	0.0272
		Y18 人工造林面积(公顷)	+	0.1195	0.1499	0.1352

3.3. 综合发展水平评估

基于组合客观赋权法确定的指标权重，运用线性加权求和方法计算旅游发展与空气质量子系统的综

合发展水平，用公式表示为：

$$s_i = \sum r_{ij} \cdot \omega_j \tag{14}$$

3.4. 耦合协调度计算

本文选择构建旅游发展与空气质量的 CCDM,以深入分析两者之间的相互作用关系及协调发展趋势。具体公式如下：

$$C = \sqrt{\frac{s_1 \cdot s_2}{\frac{s_1 + s_2}{2}}} \tag{15}$$

$$T = \alpha \cdot s_1 + \beta \cdot s_2 \tag{16}$$

$$D = \sqrt{C \cdot T} \tag{17}$$

$$E = \frac{s_1}{s_2} \tag{18}$$

式中， C 是两子系统之间的耦合度， T 代表综合协调指数， D 表示耦合协调度，取值范围为[0, 1]， E 为相对发展度， α 和 β 分别为两子系统的待定权重，考虑到旅游发展与空气质量两个系统同等重要，故设定 $\alpha = \beta = 0.5$ ，通过参考[7] [10]的研究成果，将旅游发展与空气质量的耦合协调发展类型划分为 5 大类 15 个子类，划分情况如表 3 所示：

Table 3. The classification of coupling coordination degrees for tourism development and air quality
表 3. 旅游发展与空气质量耦合协调度等级划分

耦合协调度 D	耦合协调等级	相对发展度 E	相对发展类型
$0.6 < D \leq 1$	良好平衡发展		
$0.5 < D \leq 0.6$	基本平衡发展	$E \geq 1.2$	空气质量滞后
$0.4 < D \leq 0.5$	轻微失衡发展	$0.8 < E < 1.2$	同步发展
$0.3 < D \leq 0.4$	中度失衡发展	$0 < E \leq 0.8$	旅游发展滞后
$0 < D \leq 0.3$	严重失衡发展		

3.5. 探索性空间数据分析

考虑到空气质量的空间扩散效应和旅游活动的人员流动特征，有必要将空间因素纳入研究体系。本文选用全局 Moran’s I 指数和局部 Moran’s I 指数两个指标作为评估工具，绘制 Moran 散点图以直观展示空间分布特征。全局 Moran’s I 指数从总体上反映河北省旅游发展与空气质量的耦合协调度有无空间聚集性，其公式为：

$$I = \frac{n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x})}{\left(\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \tag{19}$$

式中， n 表示研究区城市数， x_i 、 x_j 分别为 i 城市和 j 城市的耦合协调度， $\bar{x}$ 为河北省两子系统耦合协调度的平均值， ω_{ij} 为空间权重矩阵，本文采用 KNN 方法确定。Moran’s I 指数值介于-1~1 之间， $|I|$ 越接近于 1，相关性越强。

全局 Moran's I 指数虽然从整体上反映了河北省旅游发展与空气质量耦合协调度有无聚集性,但不能反映聚集区域的确切位置及聚集类型状态,因此计算局部 Moran's I 指数、绘制 Moran 散点图以评估河北省每个地级市的空间自相关性,其计算公式为:

$$I_i = \frac{x_i - \bar{x}}{S^2} \sum_{j,j \neq i}^n \omega_{ij} (x_j - \bar{x}) \tag{20}$$

式中, $S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$, 其余字母含义同上式。若局部 Moran's I 指数通过显著性检验,认为 Moran's $I_i \neq 0$, 存在局域型空间自相关。Moran 散点图如图 2 所示。

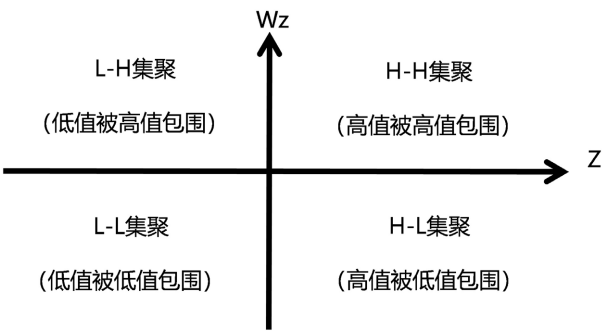


Figure 2. Moran scatterplot
图 2. Moran 散点图

4. 结果分析

4.1. 子系统总体水平结果

基于组合客观赋权法和综合发展评价模型,对 2014~2022 年河北省 11 个地级市的旅游发展和空气质量综合发展水平进行了计算,分别从时空维度对演变结果进行了深度分析,并使用 Arcgis10.8 软件对其进行了空间可视化处理,根据自然分裂断点法(Jenks)将旅游发展与空气质量水平分别划分为 5 个等级。

4.1.1. 旅游发展分析

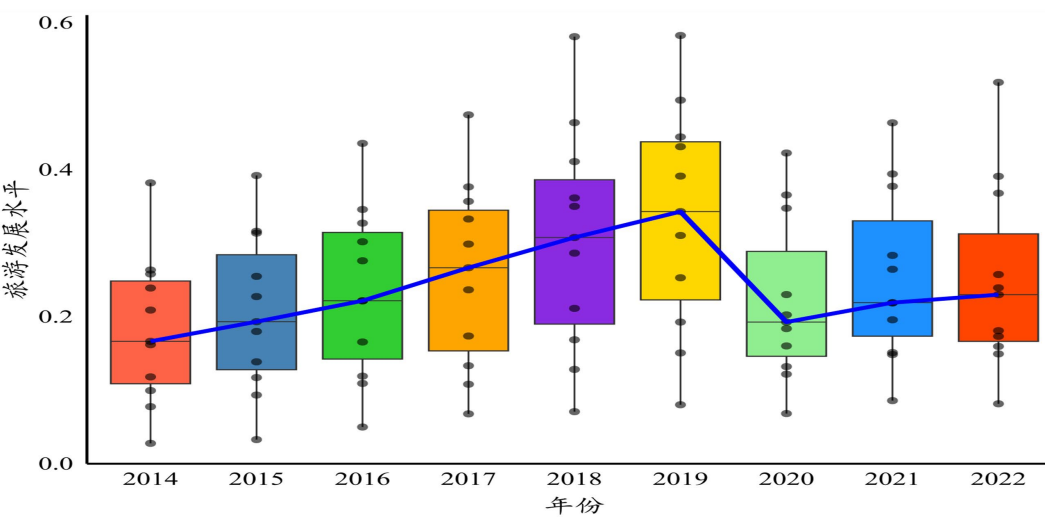
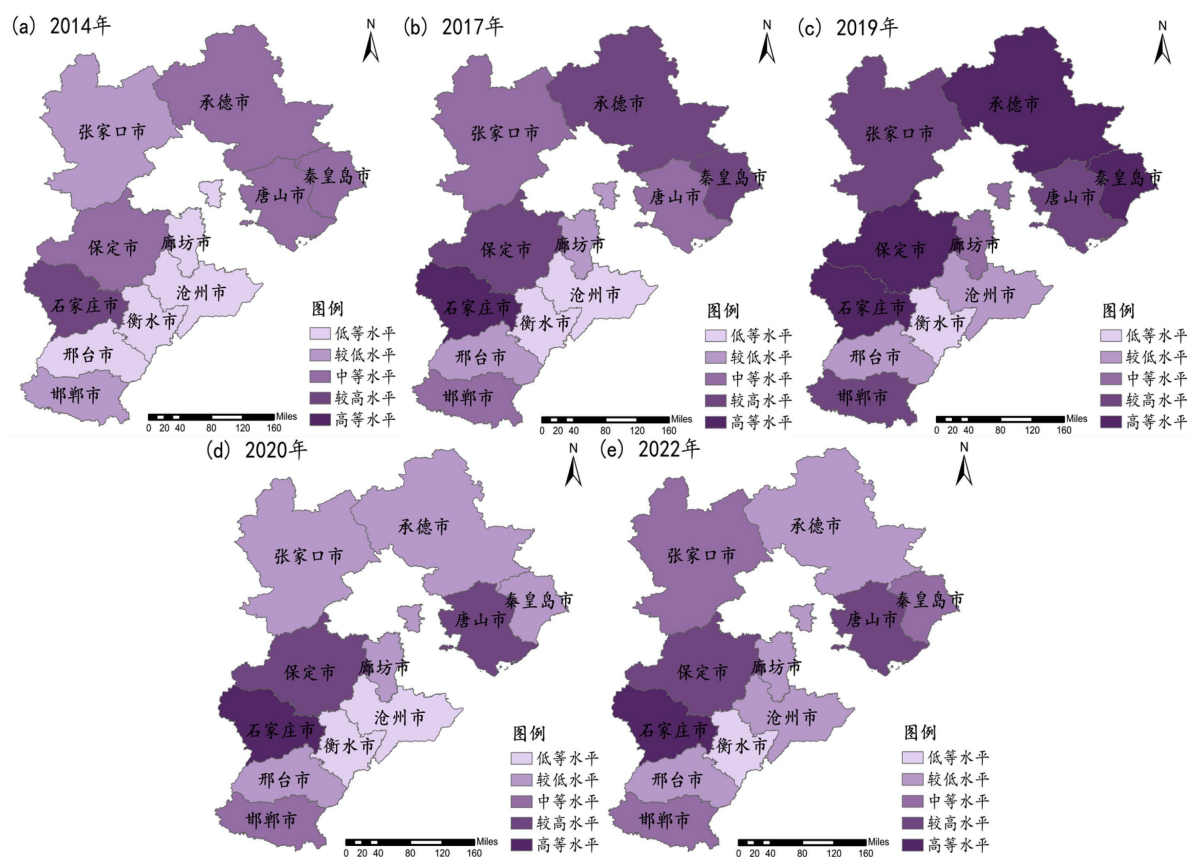


Figure 3. Boxplot of tourism development evolution in Hebei Province from 2014 to 2022
图 3. 河北省 2014~2022 年旅游发展水平演变的箱线图

从时间演变的角度来看(图 3), 2014~2022 年河北省旅游发展演变具有明显的阶段性特征, 整体呈波动上升的趋势, 发展水平从 0.1819 上升到了 0.2497。其中, 2014~2019 年是稳步上升期, 在京津冀协同发展战略推动的基础上, 河北省人民政府发布《河北省旅游高质量发展规划(2018~2025 年)》, 深化旅游管理体制, 加大旅游宣传力度, 打响“京畿福地·乐享河北”旅游品牌, 有效推动了河北省旅游业的转型升级和高质量发展。然而, 2020 年, 新型冠状病毒肺炎疫情在全国范围内爆发, 这对高度依赖于人员聚集和流动性的旅游业造成了前所未有的重创, 旅游发展水平从 2019 年的 0.3338 骤降到 2020 年的 0.2205, 城市差异也大幅降低, 2020~2022 三年间, 疫情形势反复多变, 旅游发展水平恢复缓慢。

从空间角度分析(图 4), 河北省 11 个地级市旅游发展的综合评估均值表现为: 石家庄(0.4724) > 保定(0.3769) > 唐山(0.3244) > 秦皇岛(0.3078) > 承德(0.2668) > 邯郸(0.2421) > 张家口(0.2402) > 廊坊(0.1657) > 邢台(0.1554) > 沧州(0.1232) > 衡水(0.0625), 2014 年, 中国旅游业正面临着转型升级的新任务, 这一时期, 廊坊、邢台、沧州和衡水四个城市的发展水平相对较低, 位于低等水平阶段; 随着政策支持和市场环境不断优化, 各城市旅游业进入了快速发展期, 至 2019 年, 石家庄、保定、秦皇岛和承德四个城市旅游发展已达到高等水平阶段, 然而 2020 年突如其来的疫情导致旅游市场萎缩, 游客出行受限, 各城市的旅游收入大幅下降, 旅游业的强势发展势头被迫按下暂停键, 河北省多数地市发展等级出现下滑。2022 年, 高等水平阶段仅剩石家庄一所城市, 沧州重返低等水平阶段。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图[审图号 GS (2022) 1873 号]制作, 底图无修改。

Figure 4. The spatial pattern of tourism development level in Hebei Province in 2014, 2017, 2019, 2020 and 2022

图 4. 河北省在 2014、2017、2019、2020、2022 年旅游发展水平的空间格局

4.1.2. 空气质量分析

从图 5 空气质量的时间演变来看, 2014~2022 年河北省空气质量不断改善, 呈现波动上升的趋势, 评估均值从 0.4035 上升到了 0.5769, 其阶段性特征一定程度上呼应环境库兹涅茨曲线(EKC) [15]所揭示的“倒 U 型”规律。2014 年河北省 11 个地级市空气质量梯度特征明显, 其中, 张家口、承德和秦皇岛位于第一梯队(均高于 0.5); 石家庄、邯郸、沧州和廊坊位于第二梯队, 综合评估值在 0.35~0.45 之间; 唐山、邢台、保定、衡水这一类拥有一定规模高耗能、高排放的产业城市综合评估值在 0.35 以下, 位于第三梯队, 邢台(0.2880)是所有地级市中的最低值。随着经济的迅速发展, 环保意识不足, 2015~2017 年多个地级市空气质量发展水平出现回落, 这一现象对应 EKC 曲线的左侧上升部分。然而, 2017 年成为一个关键的“拐点”, 环境污染问题引起高度重视, 《环境保护税法》《京津冀及周边地区 2017 年大气污染防治工作方案》等文件政策相继出台, 强有力的环境规制有效推动河北省整体跨过 EKC 曲线的拐点, 进入空气质量稳步提升阶段, 地区发展不平衡问题得到改善, 到 2022 年底, 河北省 11 个地级市的空气质量评估值均在 0.5 以上, 显示出较好的空气质量和较高的治理成效, 且地区之间差异不再凸显。

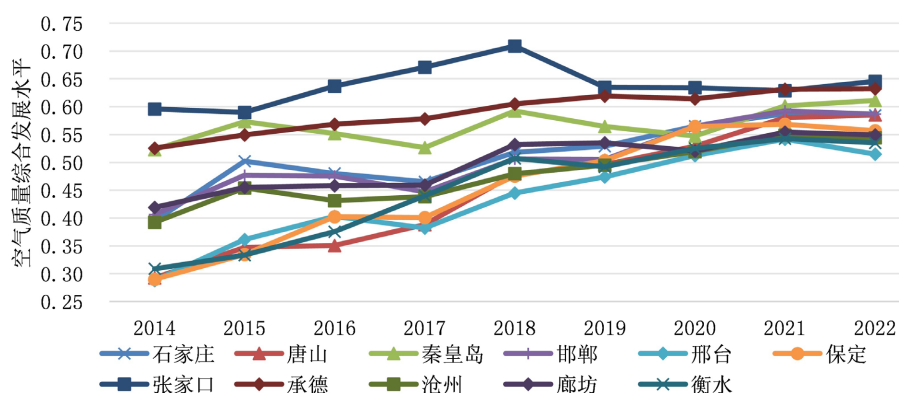


Figure 5. Line graph of air quality evolution in Hebei Province from 2014 to 2022
图 5. 河北省 2014~2022 年空气质量演变的折线图

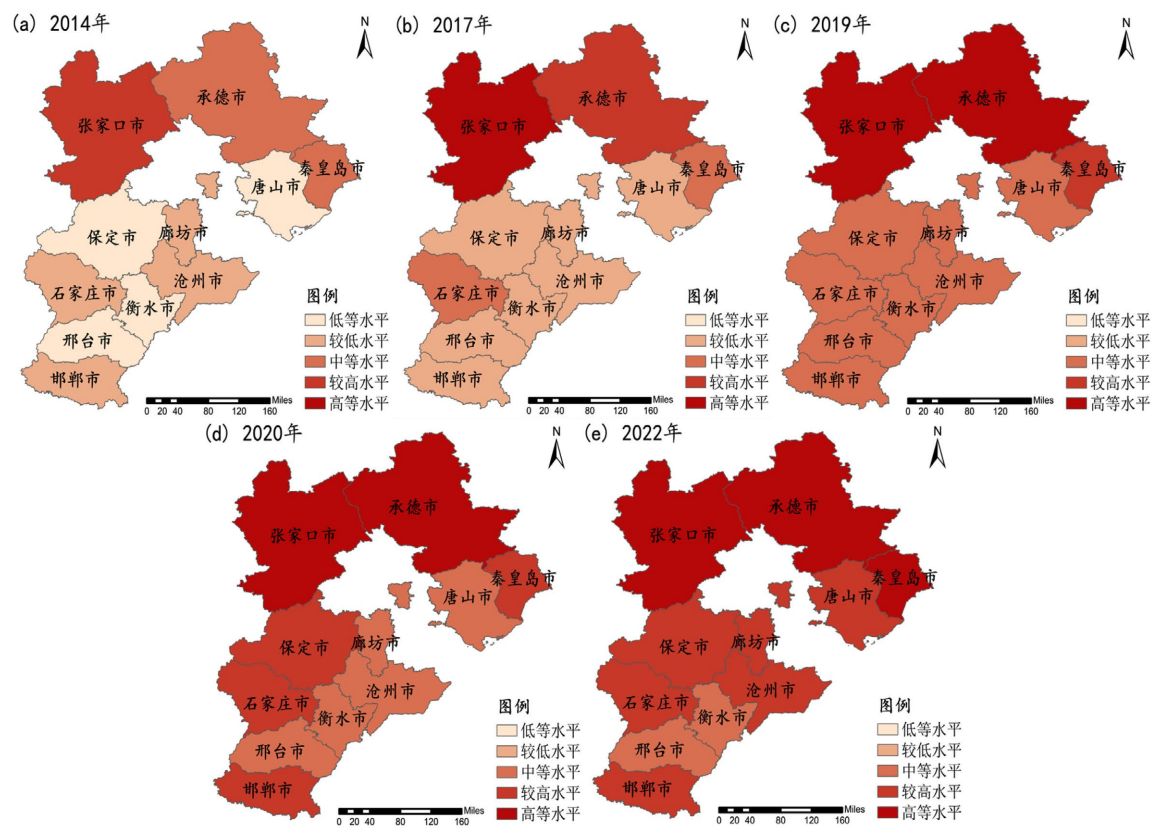
从空间分布的角度分析来看, 图 6 中河北省 11 个地级市空气质量发展水平演变呈现梯度扩散的特征, 其中, 张家口空气质量率先发展起来, 之后呈阶梯扩散状, 向东向南将高发展水平的状态扩散到周边或其他相对低水平的地区, 到 2022 年, 冀北和冀东地区城市空气质量已全部达到较高水平, 冀中和冀南地区则均在中等水平及以上, 整体表明 11 个地级市之间发展水平差距逐渐减小, 趋向于均衡良好发展。

4.2. 耦合协调度分析

4.2.1. 时间维度

基于综合发展水平结果及 CCDM, 测算河北省 11 个地级市每年的耦合协调度。其中, 在时间维度上, 由图 7 可以看出, 2014~2022 年河北省旅游发展与空气质量的耦合协调水平不高, 数值在 0.35 到 0.55 之间, 但整体上呈波动上升的态势, 年均增长率为 30.73%, 表明河北省旅游发展与空气质量的协调发展未来存在着较大的潜力和优化空间。具体而言, 根据耦合协调度的变化, 可分为三个阶段: 2014~2019 年为稳步增长阶段, 得益于国家一系列政策支持以及河北省政府的积极响应, 河北省旅游业获得了强劲的发展动力, 同时, 科技进步和环保措施的加强使得工业活动对空气污染的影响下降, 空气质量得到显著改善, 至 2019 年达到了整个研究期的峰值(0.5162); 2020 年为极速下降阶段, 新冠疫情的爆发对旅游业造成了巨大冲击, 旅游活动几乎停滞, 大规模停工停产的应对措施导致工业活动大幅减少, 空气质量改善更具惯性。两者耦合协调水平出现了急速下降的态势, 降幅达 11.44%; 2021~2022 年为缓慢回升阶段,

随着疫情形势的有效控制，旅游业开始复苏，然而，值得注意的是，尽管旅游活动的逐渐增加和持续的环保措施为旅游发展与空气质量的耦合协调水平回升提供了有利条件，但疫情的反复和不确定性仍然对旅游业复苏产生了较大影响，这也导致了旅游发展与空气质量耦合协调水平的回升速度较为缓慢，未能迅速恢复到疫情前的水平。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图[审图号 GS (2022) 1873 号]制作，底图无修改。

Figure 6. The spatial pattern of air quality level in Hebei Province in 2014, 2017, 2019, 2020 and 2022
图 6. 河北省在 2014、2017、2019、2020、2022 年空气质量发展水平的空间格局

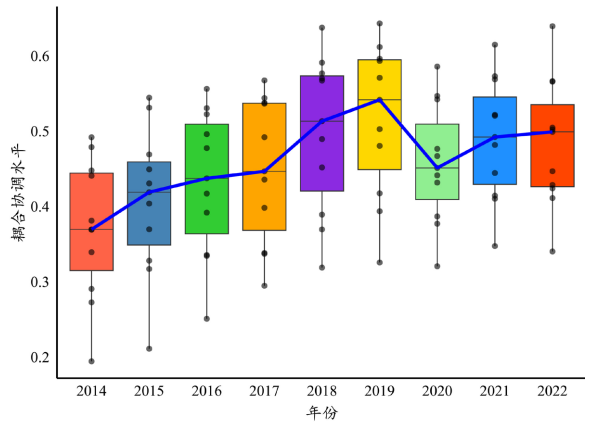


Figure 7. Boxplot of the change in coupling coordination degree in Hebei Province from 2014 to 2022
图 7. 河北省在 2014~2022 年耦合协调度变动的箱线图

4.2.2. 空间维度

在区域维度上,正如图 8 所示,2014~2022 年间冀北地区在旅游发展与空气质量的耦合协调方面展现出了显著的优势,其均值高达 0.5063,紧随其后的是冀东(0.5038)和冀中(0.4318),而冀南地区则以 0.4180 的均值位列末尾,整体呈现出北高南低的分布格局。这一格局的形成,一方面源于自然禀赋与产业基础的差异,冀北地区依托丰富的冰雪资源和广袤的森林草原,耦合协调水平最高,而冀南地区作为中国北方重要的经济区域之一,产业结构偏重,空气质量改善难度较大;另一方面依据“核心-边缘”理论,冀北地区凭借毗邻京津的“核心”区位优势,长期作为京津冀地区重要的生态屏障,并在《京张体育文化旅游带建设规划》等国家战略加持下,持续获得旅游客流和生态政策倾斜,而冀南地区处于京津冀协同发展战略实施的“边缘”地带,距离京津较远,接受外部资源和政策支持的便利性较低,这也影响了其旅游发展与空气质量的耦合协调水平,一直处于失衡状态。

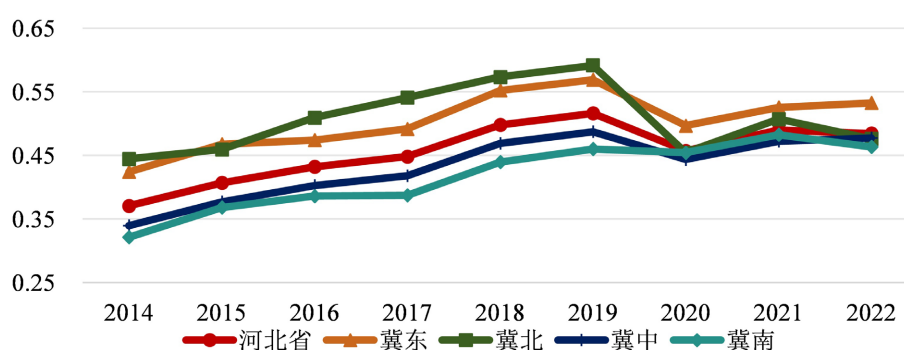
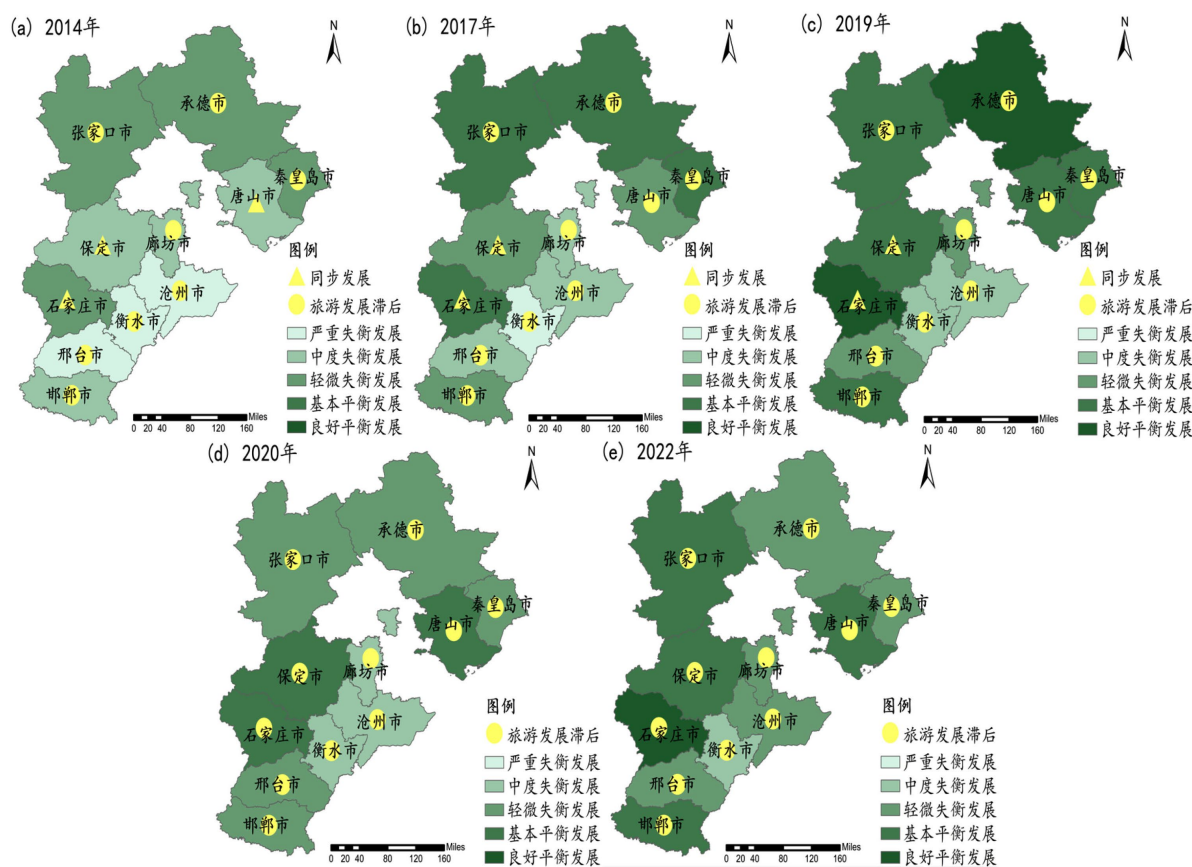


Figure 8. Line graph of regional coupling coordination evolution in Hebei Province
图 8. 河北省区域耦合协调度变动的折线图

从耦合协调的类型演变来看(见图 9),2014~2022 年河北省 11 个地级市表现各异,整体来说,石家庄(0.5869)处于相对领先地位,而衡水(0.2894)则明显滞后,在全省排名末位。其中,河北省的 11 个地级市中有 9 个城市实现了耦合协调类型的攀升,2 个城市耦合协调类型没有发生变化。研究初期(2014),河北省 11 个地级市普遍处于旅游发展与空气质量耦合协调的失衡状态,特别是邢台、沧州、衡水三市属于严重失衡发展。随着旅游业的持续蓬勃发展和空气质量的不断优化改善,至 2019 年河北省所有城市均摆脱了严重失衡发展的局面,过半城市实现了跨级式的类型迈进,然而,2020 年疫情的爆发对旅游发展与空气质量的协同进步造成了冲击,打破了这一良好势头,较多城市已无法维持平衡协调发展的状态。从系统相对发展的同步性来看,河北省旅游发展与空气质量之间的耦合协调互动,主要呈现出旅游发展滞后的特征,表明河北省旅游发展与空气质量两大复杂子系统的互动效应上的不均衡性,尽管空气质量在有效的政策推动下,河北省整体已跨越 EKC 拐点,进入持续改善阶段,为旅游发展提供了更为有利的外部环境,然而,旅游产业作为一个复杂的综合性产业,其发展不仅仅依赖于空气质量的提升,还需要更为完善的基础设施、更有代表性的旅游品牌等多重因素,因此旅游发展的响应存在滞后性,尚未能实现相应的增长。

4.3. 耦合协调度的空间集聚特征

本文借助 ESDA 方法逐年计算了全局 Moran'I 指数值,并进行了显著性检验,同时,绘制 2014、2017、2020、2022 年四个时间截面的河北省旅游发展与空气质量耦合协调的局部 Moran 散点图,以直观展示代表年份下各城市的耦合协调状态及其在空间上的分布情况。结果分别如表 4 和图 10 所示。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的标准地图[审图号 GS (2022) 1873 号]制作，底图无修改。

Figure 9. The spatial pattern of coupling coordination in Hebei Province in 2014, 2017, 2019, 2020 and 2022
图 9. 河北省在 2014、2017、2019、2020、2022 年耦合协调度的空间格局

Table 4. The global Moran's I of the coupling coordination degree in Hebei Province from 2014 to 2022
表 4. 河北省 2014~2022 年耦合协调度的全局莫兰指数

年份	Moran's I	Z 值	p 值
2014	0.144	1.927	0.027
2015	0.080	1.497	0.067
2016	0.162	2.013	0.022
2017	0.241	2.455	0.007
2018	0.212	2.296	0.011
2019	0.207	2.319	0.010
2020	0.067	1.252	0.105
2021	0.112	1.585	0.057
2022	0.022	0.921	0.179

从表 4 中可以看出，2014~2022 年 Moran'I 均为正值，且除 2020 和 2022 年两个年份外，其他年份的 Moran'I 均通过了 10%水平下的显著性检验，表明河北省的旅游发展与空气质量耦合协调水平在空间上

表示为高值聚集，低值相邻的格局。而对于 2020 年和 2022 年，Moran'I 未通过显著性检验，表明该时期受疫情的干扰，其耦合协调度的空间分布规律被打破而呈现出随机分布态势。

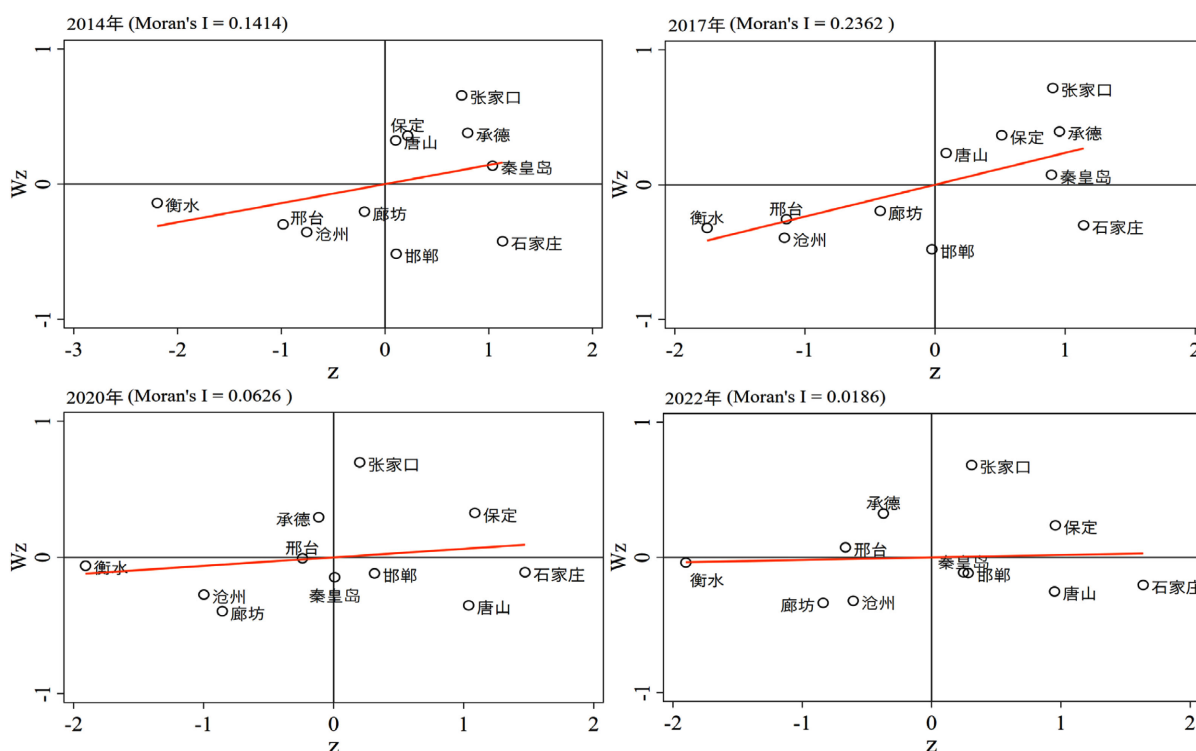


Figure 10. Scatter plots of the local Moran's I of the coupling coordination degree in Hebei Province in 2014, 2017, 2020, and 2022

图 10. 河北省在 2014、2017、2020、2022 年耦合协调度的局部莫兰指数散点图

各个地区的空间关联模式是否与全局情况一致，还需局部 Moran'I 进一步验证。在研究前期 (2014~2019 年)，河北省城市的空间分布主要集中在第一和第三象限，仅有少数城市位于第四象限，表现出明显的空间集聚特征。其中，唐山、秦皇岛、保定、张家口和承德始终在 H-H 集聚区，这一类城市主要集中在冀北、冀东地区，而邢台、沧州、廊坊、衡水则一直处于 L-L 集聚区，反映出这些城市及其周边地区的耦合协调水平普遍较低。此外，石家庄、邯郸在 H-L 集聚区出现，显示出自身耦合协调水平高，但周边地区水平较低的现象。在研究后期 (2020~2022 年)，河北省各城市在四个象限中的分布变得更加均衡，接近一半的城市经历了象限位置的变化，局部 Moran's I 指数逐渐趋近于 0，这表明河北省旅游发展与空气质量的耦合协调水平在空间上的分布趋于无序。

5. 结论与建议

5.1. 结论

本文基于 2014~2022 年河北省 11 个地级市的面板数据，构建了旅游发展与空气质量系统耦合协调关系的评价指标体系，综合运用 CCDM 以及 ESDA 方法探讨了两系统间耦合协调关系的时空演变趋势及空间集聚特征。主要结论如下：

1) 从综合发展水平来看，旅游发展水平在研究期内整体呈波动上升趋势，数值从 2014 年的 0.1819 上升到了 2022 年的 0.2497，但城市之间差异也在扩大，石家庄表现最优，衡水发展水平值最低；相比之

下,空气质量发展水平从 0.4035 提升到了 0.5769,空间上呈现梯度扩散的特征,张家口率先发展,向东向南扩散到周边地区,至 2022 年,各个城市的空气质量普遍获得显著提升,且地区之间差异不再凸显。

2) 从耦合协调的总体特征来看,2014~2022 年河北省旅游发展与空气质量的耦合协调水平不高,但整体呈上升趋势,空间上呈“北高南低”的分布格局;在类型演变上,11 个城市中有 9 个城市实现了耦合协调类型的攀升,2 个城市类型没有发生变化,协调互动类型主要表现为旅游发展滞后。

3) 从空间集聚特征来看,河北省旅游发展与空气质量耦合协调水平整体呈显著的集聚分布,表现为高值聚集,低值相邻的空间格局。在 2014~2019 年,各城市主要分布在第一和第三象限(H-H、L-L 集聚区),仅有少数城市位于第四象限(H-L 集聚区),表现出明显的空间集聚特征,而在 2020~2022 年,由于突发事件的影响,耦合协调水平在空间上的分布趋于无序,显现出随机分布态势。

5.2. 建议

基于以上研究结论,提出以下针对性建议:(1) 巩固 H-H 集聚区优势,打造高质量协同发展示范区。冀北、冀东地区应持续强化区域协作和品牌建设,依托主题资源(冰雪旅游、生态康养旅游等),推动线路整合与服务升级,增强游客可达性和体验感,巩固其旅游优势,同时整合生态保护措施,统一绿色旅游标准与环境管理政策,建设河北省生态旅游协同发展的先行区。(2) 突破 L-L 集聚区发展瓶颈,推动旅游空气质量双提升。冀中、冀南地区应优化交通网络,提升连接京津及其他重要客源市场的便捷性,突破战略“边缘”限制,其次,深入挖掘并创新展示当地独特的人文和自然资源,如保定的红色文化、邯郸的赵国历史、邢台的太行山资源等,开发差异化旅游线路,并持续深化产业绿色转型升级,降低工业活动对空气污染的影响,提升区域环境承载力,促进旅游业与生态环境的良性互动。(3) 强化 H-L 集聚区城市周边辐射带动功能,促进区域协同共进。石家庄应发挥省会辐射带动作用,主动破解与周边地区的“虹吸效应”,加速都市圈的一体化建设,通过交通同城化、产业协同化、生态共保化等举措,促进人才、资本、技术等要素向周边顺畅流动与合理布局,将交界处变成“协作带”。(4) 构建韧性发展体系,稳定空间协调格局。一方面应制定应对突发公共事件的旅游应急管理机制,发展本地化、短周期、分散化的旅游产品,增强抗风险能力,提高发展稳定性,另一方面强化跨区域应急联动,避免各自为战,共同提升区域的整体危机响应和恢复能力,确保耦合协调的空间格局在冲击下保持稳定。

基金项目

国家自然科学基金项目(No.12272293);河北省教育厅科学研究项目(No.QN2025824);邯郸市社科规划项目(No.2025499)。

参考文献

- [1] 王怡. 习近平对旅游工作作出重要指示强调 着力完善现代旅游业体系加快建设旅游强国 推动旅游业高质量发展行稳致远[EB/OL]. 2024-05-17. <https://china.huanqiu.com/article/4HpNgLa2QH>, 2024-12-02.
- [2] 杨倩. 2019 年旅游市场基本情况[EB/OL]. 2020-03-10. https://www.mct.gov.cn/whzx/whyw/202003/t20200310_851786.htm, 2024-12-02.
- [3] 彭建. 空气污染与旅游: 文献回顾与研究展望[J]. 中国旅游评论, 2017(2): 49-66.
- [4] 董琳. 旅游-生态-文化耦合协调发展水平及其影响因素[J]. 统计与决策, 2022, 38(12): 122-125.
- [5] 吴儒练. 旅游业高质量发展与乡村振兴耦合协调测度、演化及空间效应研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 江西财经大学, 2022.
- [6] 汤礼莎, 龙花楼, 杨嘉艺, 等. 洞庭湖区乡村人居环境和乡村旅游发展“障碍诊断-耦合协调”分析[J]. 经济地理, 2023, 43(10): 211-221.
- [7] Ma, M. and Tang, J. (2022) Interactive Coercive Relationship and Spatio-Temporal Coupling Coordination Degree

-
- between Tourism Urbanization and Eco-Environment: A Case Study in Western China. *Ecological Indicators*, **142**, Article ID: 109149. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109149>
- [8] Meng, G., Wang, K., Wang, F. and Dong, Y. (2023) Analysis of the Tourism-Economy-Ecology Coupling Coordination and High-Quality Development Path in Karst Guizhou Province, China. *Ecological Indicators*, **154**, Article ID: 110858. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2023.110858>
- [9] 刘瑞洋. 旅游产业与生态环境的耦合协调性研究——以肇庆市星湖旅游景区为例[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东省社会科学院, 2023.
- [10] Zhao, S.H., Li, Q., Kong, Y.Y. and Chen, X. (2023) The Coupling Relationship between Tourism Economy and Air Quality in China: A Province-Level Analysis. *Frontiers in Environmental Science*, **11**, Article ID: 1111828. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2023.1111828>
- [11] 赵书虹, 孔营营. 区域旅游经济与空气质量耦合协调的时空演化——以云南省为例[J]. 中国人口·资源与环境, 2023, 33(8): 146-156.
- [12] Rapport, D. and Friend, A. (1979) Towards a Comprehensive Framework for Environmental Statistics: A Stress-Response Approach. Statistics Canada.
- [13] 邵超峰, 高俊丽, 赵润, 等. 基于 SDGs 及旅游竞争力指数的旅游型城市可持续发展评估[J]. 中国人口·资源与环境, 2022, 32(2): 162-176.
- [14] 王明涛. 多指标综合评价中权系数确定的一种综合分析方法[J]. 系统工程, 1999(2): 56-61.
- [15] Grossman, G.M. and Krueger, A.B. (1995) Economic Growth and the Environment. *The Quarterly Journal of Economics*, **110**, 353-377. <https://doi.org/10.2307/2118443>