文章编号：1003-1421(2026)11-0199-10
引用格式：范英飞，郝慧颖，李梦露，等.考量生态环境耦合的区域经济与交通运输通道协同演化分析[J].铁道运输与经济，2026，48(11)：199-208.
FAN Yingfei，HAO Huiying，LI Menglu，et al. Coevolution Analysis of Regional Economy and Transportation Corridors Considering Ecological Environment Coupling[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(11)：199-208.

考量生态环境耦合的区域经济与交通运输通道协同演化分析

范英飞[1,2]，郝慧颖[1]，李梦露[1]，贾志绚[1,2]

(1.太原科技大学 车辆与交通工程学院，山西 太原 030024；2.太原科技大学 智慧交通山西省实验室，山西 太原 030024)

摘 要：为响应国家高质量发展战略要求，破解区域经济、交通运输通道与生态环境协同发展难题，构建一套协同演化分析体系。基于熵值法-层次分析法，借助耦合协调度模型与障碍度分析，系统量化三者间协同演化关系。山西与周边省份(河北、内蒙古、河南、陕西)的实证结果表明，在协同维度，各省耦合协调度实现良好跃升，但子系统发展失衡显著，后期普遍呈现“生态滞后型”特征，生态短板制约协同上限；在演化维度，障碍因子呈现阶段性演变，早期以工业污染和交通基建不足为主，后期转向碳排放、客运及固废处置等结构性压力，标志着制约因素向系统性绿色转型问题深化。据此提出协同发展优先顺序及差异化协同路径，为区域可持续发展提供参考。

关键词：交通运输经济；协同演化；耦合协调度；障碍度模型；山西省
中图分类号：U2-9 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250811002

Coevolution Analysis of Regional Economy and Transportation Corridors Considering Ecological Environment Coupling

FAN Yingfei[1,2], HAO Huiying[1], LI Menglu[1], JIA Zhixuan[1,2]

(1. School of Vehicle and Transportation Engineering, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China; 2. Shanxi Laboratory of Smart Transportation, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan 030024, Shanxi, China)

Abstract: In response to the national high-quality development strategy, an analytical framework for coevolution was established to address the difficulty in the coordinated advancement of the regional economy, transportation corridors, and ecological environment. By combining the entropy weight method with the analytic hierarchy process (AHP), the coupling coordination model and the obstacle factor model were employed to systematically quantify the coevolutionary interactions among the three subsystems. The empirical results from Shanxi Province and its neighboring provinces (Hebei, Inner Mongolia, Henan, and Shaanxi) reveal two key findings. From a synergistic perspective, all sampled provinces exhibit a notable increase in coupling coordination. However, significant imbalances persist across subsystems. Most regions enter an “ecology-lagged” stage in the later research period, where ecological deficits constrain the overall ceiling of coordination. From an

收稿日期：2025-08-11 **修订日期**：2026-06-30
基金项目：山西省基础研究计划项目(202403021221150)；山西省科技战略研究专项计划项目(202304031401079)

evolutionary perspective, obstacle factors demonstrate phased transition patterns. In the early stage, industrial pollution and inadequate transport infrastructure are the primary constraints, while in the later stage, the structural pressures dominate including carbon emissions, passenger transport, and solid waste disposal. This indicates that these constraints have transformed into systemic challenges for green transformation. Based on these findings, the priority of coordinated development and differentiated coordination pathways was proposed, providing a reference for regional sustainable development.

Keywords: Transportation Economy; Synergistic Coevolution; Coupling Coordination; Obstacle Factor Model; Shanxi Province

0　引言

党的二十大报告提出区域协同、新型城镇化战略，要求构建优势互补、高质量发展的国土空间格局[1]。在区域协同发展进程中，量化区域经济、交通运输通道与生态环境的系统协同程度至关重要。交通运输是区域经济的基础性产业，通过提升可达性形成经济“催化效应”[2]；而区域经济的壮大又通过增加财政收入反哺交通基础设施的扩建升级，为生态环境的治理保护提供物质与技术支撑，形成对生态建设的“反馈效应”。然而，交通运输和经济活动在驱动发展的同时也对生态环境形成“约束效应”[3]。在“双碳”目标下[4]，统筹三者协同发展成为资源型区域发展的核心议题。

近年来，协同研究虽有进展，但资源型地区的研究仍存在明显不足。在协同机制研究方面，过往多聚焦于构建综合评价指标体系以揭示系统间关联，如孙朝阳[3]对交通优势度与区域经济关系的测度。然而，这类静态指标体系难以捕捉系统间动态交互的复杂特征。Wang等[5]指出现有研究对协同内在机理的揭示仍停留在表象。赵领娣等[6]表明静态分析难以支撑从状态诊断到政策路径生成的完整决策链条。在演化过程解析方面，肖红等[7-8]通过改进耦合协调度模型，分别对西部陆海新通道和成渝城市群的系统协同阶段进行有效识别。然而，这些研究对关键指标微观动态轨迹的追踪明显不足。特别是在资源型地区情境下，Li等[9-10]发现碳排放等核心指标与区域结构深度绑定，洪蕾等[11-12]发现从微观指标解析系统发展瓶颈的体系尚不完善，严重制约精准化政策体系构建。

山西省是全国首个全域资源型经济转型综合改革配套试验区[13]，与冀、蒙、豫、陕地缘经济、能源、交通联系紧密，是黄河流域战略交汇核心区域。通过构建统一集成分析框架，实现宏观协同状态测度与微观障碍因子动态识别。研究边际贡献：一是理论层面搭建“组合赋权-协同测度-障碍分析”一体化分析体系，弥补传统研究重宏观轻微观缺陷；二是方法层面将障碍度演化分析应用于省际资源型复合系统；三是实践层面基于分区域障碍特征提出差异化治理路径，为资源型地区转型提供参考。

1　区域经济-交通运输通道-生态环境协同演化分析方法

区域经济-交通运输通道-生态环境构成的复合系统，其互动关系随时间推移而动态演变。因此，本研究构建“协同”和“演化”双主线分析体系。宏观层面测度系统协同等级，微观层面识别协同制约因素。系统协同演化分析体系架构如图1所示。

1.1　协同维度

1.1.1　综合评价模型

整合层次分析法[14]与熵值法[15]，生成兼顾专家经验与数据特征的组合权重，解决主客观单一赋权偏差问题。

（1）层次分析法。通过两两比较的方式构建判断矩阵，将各指标或方案的相对重要性以数值形式呈现，为后续的权重计算奠定基础[14]。

$$w_i^{\mathrm{D}} = \frac{1}{n}\sum_{j=1}^{n}\frac{a_{ij}}{\sum_{l=1}^{n}a_{lj}} \tag{1}$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\frac{(\boldsymbol{XW})_i}{w_i^{\mathrm{D}}} \tag{2}$$

$$CR = \frac{\lambda_{\max} - n}{(n-1)RI} \tag{3}$$

式中：i为目标行；j为目标列；l为求和的行；n为判断矩阵阶数；w_i^{D}为层次分析法计算的指标权重；

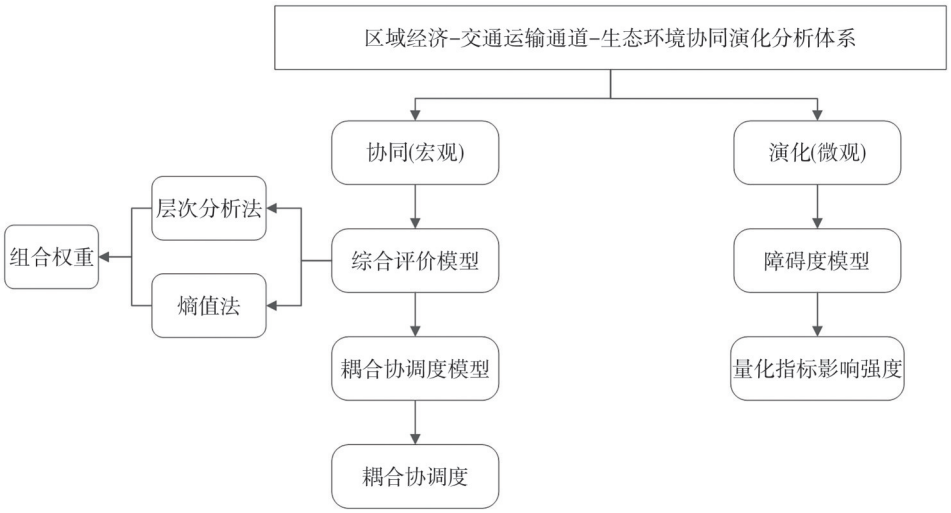


图1　系统协同演化分析体系架构

Fig.1　Framework of coevolution analysis system

a_{ij}为指标i相对于指标j的重要性；$\sum_{l=1}^{n} a_{lj}$为第j列所有指标重要性的和；λ_{max}为判断矩阵最大特征值；$\boldsymbol{X}$为判断矩阵；$\boldsymbol{W}$为权重向量；CR为一致性比率，当CR<0.1时，判断矩阵一致性检验通过，否则对判断矩阵做适当修正；RI为随机一致性指标，随矩阵阶数变化的常数。

（2）熵值法。通过量化各评价指标携带的信息量来确定权重[15]。依赖原始数据的特征分布，有效保证了权重计算的客观性。

$$P_{xi} = \frac{l_{xi}^{N}}{\sum_{x=1}^{m} l_{xi}^{N}} \tag{4}$$

$$e_i = -k \sum_{x=1}^{m} P_{xi} \ln P_{xi} \tag{5}$$

$$w_i^{\mathrm{E}} = \frac{1 - e_i}{\sum_{i=1}^{n} (1 - e_i)} \tag{6}$$

式中：P_{xi}为指标比重；l_{xi}^{N}为第N个子系统中第x个评价对象的第i项评价指标的标准化值(N=A，B，C，分别代表区域经济、交通运输通道、生态环境子系统)；m为样本数；e_i为指标的信息熵，$0 \leqslant e_i \leqslant 1$；$k$为常数，$k$=1/ln$m$；$w_i^{\mathrm{E}}$为熵值法计算的指标权重[15]。

（3）组合赋权。采用线性加权求和方法求得指标权重。

$$m_i^{N} = \mu w_i^{\mathrm{D}} + (1 - \mu) w_i^{\mathrm{E}} \tag{7}$$

式中：m_i^{N}表示第N个子系统各指标通过组合赋权求得的第i项指标权重；μ为待定系数，$\mu = 0.5$[15]。

1.1.2　耦合协调度模型

在多系统协同发展研究中，耦合协调度模型关注指标集成的各子系统发展水平之间的匹配程度[14]。

$$U_{\mathrm{A}} = \sum_{i=1}^{n} m_i^{\mathrm{A}} l_{xi}^{\mathrm{A}} \tag{8}$$

$$U_{\mathrm{B}} = \sum_{i=1}^{n} m_i^{\mathrm{B}} l_{xi}^{\mathrm{B}} \tag{9}$$

$$U_{\mathrm{C}} = \sum_{i=1}^{n} m_i^{\mathrm{C}} l_{xi}^{\mathrm{C}} \tag{10}$$

$$G = \sqrt[3]{\frac{U_{\mathrm{A}} U_{\mathrm{B}} U_{\mathrm{C}}}{\left(\frac{U_{\mathrm{A}} + U_{\mathrm{B}} + U_{\mathrm{C}}}{3}\right)^{3}}} \tag{11}$$

式中：U_{A}，U_{B}，U_{C}分别为A，B，C子系统的综合发展程度指数；G为耦合度，取值介于[0，1]之间，取值越大说明系统间的相互作用越大[7]；m_i^{A}，m_i^{B}，m_i^{C}分别为A，B，C子系统指标权重；l_{xi}^{A}，l_{xi}^{B}，l_{xi}^{C}分别为A，B，C子系统中第x个评价对象的第i项评价指标的标准化值。

运用耦合协调度指标评价3个子系统间的协同程度[11]，公式如下。

$$D = \sqrt{GT} \tag{12}$$

$$T = \alpha U_{\mathrm{A}} + \beta U_{\mathrm{B}} + \gamma U_{\mathrm{C}} \tag{13}$$

式中：D为耦合协调度，取值介于[0，1]之间，值越大说明系统间协同程度越高；T为系统整体发展水平；α，β，γ为待定系数，$\alpha = \beta = \gamma = 1/3$[7]。

耦合协调度评价标准如表1所示[7]。

表1　耦合协调度评价标准

Tab.1　Evaluation criteria for coupling coordination

耦合协调度	协同等级	耦合协调度	协同等级
[0，0.1)	极度失调	[0.5，0.6)	勉强协同
[0.1，0.2)	严重失调	[0.6，0.7)	初级协同
[0.2，0.3)	中度失调	[0.7，0.8)	中级协同
[0.3，0.4)	轻度失调	[0.8，0.9)	良好协同
[0.4，0.5)	濒临失调	[0.9，1.0)	优质协同

1.2　演化维度

通过微观层面单项指标对系统协同发展制约程度的量化解析，揭示系统发展中的关键抑制性指标。障碍度模型[11]可以精准识别影响区域经济、交通运输通道与生态环境耦合协同发展的核心阻力因素，以量化方式揭示各评价指标对不同子系统的影响强度。

$$O_i = 1 - l_{xi} \tag{14}$$

$$M_i = \frac{m_i O_i}{\sum_{i=1}^{n} m_i O_i} \times 100\% \tag{15}$$

$$Ni = \sum Mi \tag{16}$$

式中：O_i为指标偏离度，指单个指标与目标之间的差值；M_i为障碍度，表示各指标对研究对象协同水平的阻碍程度；N_i为指标的阻碍程度[6]。

2　山西与周边省份协同演化关系研究

2.1　数据收集与评价指标量化

遵循指标科学性与数据可获得性原则[7]，系统梳理既有研究成果，深入剖析区域经济、交通运输通道与生态环境三大系统的核心内涵及其交互协同关系，构建评价指标体系如表2所示。数据来源于2008—2022年《中国统计年鉴》和《中国能源统计年鉴》[16]，以及《山西省统计年鉴》《河北省统计年鉴》《内蒙古统计年鉴》《河南省统计年鉴》《陕西省统计年鉴》[17]。

2.2　协同分析

分别计算山西与邻省(河北、内蒙古、河南、陕西)每一个配对研究单元内部区域经济-交通运输通道-生态环境复合系统的耦合协调度，反映各配对区域内部的协同水平。

2.2.1　综合评价模型结果

依据式(1)—(7)计算得出评价指标权重如表3所示。

表2　评价指标体系

Tab.2　Evaluation indicator system

系统	二级指标	符号	属性
区域经济子系统A	地区生产总值/亿元	A_1	正向
	一般公共预算收入/亿元	A_2	正向
	进出口贸易总额/万美元	A_3	正向
	社会消费品零售总额/亿元	A_4	正向
	全体居民人均可支配收入/元	A_5	正向
交通运输通道子系统B	货运量/万t	B_1	正向
	客运量/万人	B_2	正向
	公路通车里程/km	B_3	正向
	铁路营业里程/km	B_4	正向
	货物周转量/(万t·km)	B_5	正向
	旅客周转量/万人公里	B_6	正向
生态环境子系统C	二氧化硫排放量/万t	C_1	负向
	氮氧化物排放量/万t	C_2	负向
	颗粒物/万t	C_3	负向
	一般工业固体废物产生量/万t	C_4	负向
	碳排放/万t	C_5	负向

表3　评价指标权重

Tab.3　Weights of evaluation indicators

指标	山西—河北指标权重	山西—内蒙古指标权重	山西—河南指标权重	山西—陕西指标权重	性质
A_1	0.211	0.180	0.207	0.192	正向
A_2	0.212	0.166	0.204	0.182	正向
A_3	0.167	0.142	0.182	0.250	正向
A_4	0.177	0.150	0.189	0.170	正向
A_5	0.234	0.363	0.219	0.207	正向
B_1	0.169	0.194	0.172	0.200	正向
B_2	0.141	0.125	0.126	0.137	正向
B_3	0.150	0.150	0.146	0.126	正向
B_4	0.235	0.205	0.239	0.175	正向
B_5	0.200	0.221	0.211	0.251	正向
B_6	0.105	0.104	0.106	0.111	正向
C_1	0.315	0.352	0.352	0.340	负向
C_2	0.185	0.218	0.206	0.209	负向
C_3	0.120	0.112	0.133	0.131	负向
C_4	0.180	0.161	0.165	0.174	负向
C_5	0.200	0.158	0.145	0.146	负向

2.2.2　耦合协调分析

基于表3的权重数据，运用式(8)—(13)分别计算山西及周边省份的耦合度G、综合发展指数T及耦合协调度D。山西—河北协同评价结果如表4所示，山西—河北复合系统的综合发展指数整体呈上扬态势。其中，区域经济子系统发展持续增长；交通运输通道子系统呈现波动增长趋势；生态环境子

表4　山西—河北协同评价结果

Tab.4　Evaluation results of Shanxi-Hebei coordination

年份	U_A	U_B	U_C	耦合度G	综合发展指数T	耦合协调度D	协同程度	类型划分
2008	0.028	0.220	0.566	0.561	0.272	0.390	轻度失调	经济滞后型
2009	0.032	0.211	0.595	0.570	0.280	0.399	轻度失调	经济滞后型
2010	0.129	0.325	0.526	0.858	0.327	0.530	勉强协同	经济滞后型
2011	0.241	0.442	0.188	0.935	0.290	0.521	勉强协同	生态滞后型
2012	0.308	0.533	0.201	0.923	0.347	0.566	勉强协同	生态滞后型
2013	0.372	0.626	0.209	0.908	0.402	0.604	初级协同	生态滞后型
2014	0.432	0.616	0.231	0.926	0.427	0.629	初级协同	生态滞后型
2015	0.450	0.594	0.337	0.974	0.461	0.670	初级协同	生态滞后型
2016	0.493	0.623	0.532	0.995	0.550	0.740	中级协同	经济滞后型
2017	0.585	0.693	0.569	0.996	0.616	0.783	中级协同	生态滞后型
2018	0.672	0.747	0.543	0.991	0.654	0.805	良好协同	生态滞后型
2019	0.694	0.785	0.445	0.972	0.642	0.790	中级协同	生态滞后型
2020	0.727	0.708	0.621	0.998	0.686	0.827	良好协同	生态滞后型
2021	0.923	0.790	0.603	0.985	0.772	0.872	良好协同	生态滞后型
2022	0.947	0.724	0.627	0.985	0.766	0.869	良好协同	生态滞后型

系统则经历先降后升的V型轨迹。尽管经济与社会发展水平稳步提升，但生态系统长期滞后，暴露出区域生态治理面临严峻挑战。

山西—内蒙古协同评价结果如表5所示，山西与内蒙古在区域经济、交通运输通道和生态环境复合系统中，整体呈现向好发展态势，综合发展指数稳步提升。分系统来看，区域经济与交通运输通道子系统发展势头强劲，保持持续增长态势；生态环境子系统呈现明显的波动特征。在系统协同关系方面，协同类型以“经济滞后型”为主导，表明区域经济增长速度成为制约复合系统协同发展的关键因素。

山西—河南协同评价结果如表6所示，山西与河南区域经济、交通运输通道及生态环境复合系统的动态分析显示，其综合发展指数整体呈上升态势，但各子系统呈现显著异质性。区域经济子系统发展态势稳健，保持持续增长；交通运输通道子系统发展指数呈现周期性波动；生态环境子系统则经历先抑后扬的V型轨迹。系统协同类型呈现“经济滞后型”与“生态滞后型”交替演变特征。

表5　山西—内蒙古协同评价结果

Tab.5　Evaluation results of Shanxi-Inner Mongolia coordination

年份	U_A	U_B	U_C	耦合度G	综合发展指数T	耦合协调度D	协同程度	类型划分
2008	0.031	0.196	0.467	0.608	0.232	0.376	轻度失调	经济滞后型
2009	0.026	0.219	0.503	0.570	0.249	0.377	轻度失调	经济滞后型
2010	0.093	0.322	0.454	0.823	0.290	0.488	濒临失调	经济滞后型
2011	0.167	0.435	0.269	0.928	0.290	0.519	勉强协同	经济滞后型
2012	0.211	0.539	0.276	0.925	0.339	0.560	勉强协同	经济滞后型
2013	0.254	0.493	0.301	0.960	0.349	0.579	勉强协同	经济滞后型
2014	0.295	0.557	0.296	0.954	0.383	0.604	初级协同	经济滞后型
2015	0.295	0.546	0.329	0.963	0.390	0.613	初级协同	经济滞后型
2016	0.317	0.611	0.664	0.951	0.530	0.710	中级协同	经济滞后型
2017	0.359	0.713	0.701	0.955	0.591	0.751	中级协同	经济滞后型
2018	0.429	0.781	0.668	0.970	0.626	0.779	中级协同	经济滞后型
2019	0.467	0.720	0.506	0.982	0.564	0.744	中级协同	经济滞后型
2020	0.782	0.670	0.671	0.997	0.708	0.840	良好协同	交通滞后型
2021	0.626	0.776	0.668	0.996	0.690	0.829	良好协同	经济滞后型
2022	0.675	0.738	0.667	0.999	0.693	0.832	良好协同	生态滞后型

表6　山西—河南协同评价结果

Tab.6　Evaluation results of Shanxi-Henan coordination

年份	U_A	U_B	U_C	耦合度G	综合发展指数T	耦合协调度D	协同程度	类型划分
2008	0.014	0.148	0.444	0.480	0.202	0.311	轻度失调	经济滞后型
2009	0.029	0.200	0.461	0.601	0.230	0.372	轻度失调	经济滞后型
2010	0.097	0.332	0.470	0.826	0.300	0.498	濒临失调	经济滞后型
2011	0.192	0.458	0.224	0.927	0.292	0.520	勉强协同	经济滞后型
2012	0.283	0.572	0.246	0.931	0.367	0.585	勉强协同	生态滞后型
2013	0.355	0.398	0.242	0.979	0.332	0.570	勉强协同	生态滞后型
2014	0.419	0.505	0.236	0.952	0.387	0.607	初级协同	经济滞后型
2015	0.469	0.476	0.335	0.988	0.427	0.649	初级协同	生态滞后型
2016	0.511	0.566	0.648	0.995	0.575	0.756	中级协同	经济滞后型
2017	0.598	0.640	0.694	0.998	0.644	0.802	良好协同	经济滞后型
2018	0.695	0.712	0.667	0.999	0.691	0.831	良好协同	生态滞后型
2019	0.763	0.750	0.547	0.989	0.687	0.824	良好协同	生态滞后型
2020	0.793	0.663	0.707	0.997	0.721	0.848	良好协同	交通滞后型
2021	0.947	0.765	0.712	0.993	0.808	0.896	良好协同	生态滞后型
2022	0.992	0.769	0.691	0.988	0.817	0.899	良好协同	生态滞后型

山西—陕西协同评价结果如表7所示，山西与陕西在区域经济、交通运输通道及生态环境复合系统中，整体呈现综合发展指数稳步攀升态势。其中，区域经济与交通运输通道子系统保持持续增长；生态环境子系统则呈现不规则波动特征。系统协同类型呈现“经济滞后型”与“生态滞后型”交替演变特征。

2.3　演化分析

通过对年度障碍度数值最大的5个指标进行排序[7]，统计出影响区域协同发展的主要影响因子。山西—河北障碍度指标排序结果如表8所示，山西—河北区域协同发展的障碍因子呈现阶段性变化。2008—2015年，二氧化硫排放量、铁路营业里程的数值较高，这与此阶段粗放式经济增长模式下的工业污染排放量大、交通基础设施网络尚不完善的现实相符[18]。2016—2019年，碳排放取代传统污染成为首要障碍，同时进出口贸易和一般工业固体废物产生量压力凸显，这表明发展障碍已从传统的工业

表7　山西—陕西协同评价结果

Tab.7　Evaluation results of Shanxi-Shaanxi coordination

年份	U_A	U_B	U_C	耦合度G	综合发展指数T	耦合协调度D	协同程度	类型划分
2008	0.004	0.179	0.488	0.313	0.224	0.264	中度失调	经济滞后型
2009	0.027	0.246	0.539	0.567	0.271	0.392	轻度失调	经济滞后型
2010	0.084	0.369	0.538	0.773	0.330	0.505	勉强协同	经济滞后型
2011	0.164	0.490	0.263	0.904	0.306	0.526	勉强协同	经济滞后型
2012	0.221	0.572	0.286	0.919	0.360	0.575	勉强协同	经济滞后型
2013	0.272	0.640	0.296	0.924	0.403	0.610	初级协同	经济滞后型
2014	0.392	0.639	0.278	0.943	0.436	0.642	初级协同	生态滞后型
2015	0.429	0.585	0.358	0.979	0.457	0.669	初级协同	生态滞后型
2016	0.457	0.616	0.654	0.988	0.575	0.754	中级协同	经济滞后型
2017	0.564	0.708	0.680	0.995	0.650	0.805	良好协同	经济滞后型
2018	0.680	0.782	0.660	0.997	0.707	0.840	良好协同	生态滞后型
2019	0.730	0.802	0.519	0.983	0.684	0.820	良好协同	生态滞后型
2020	0.748	0.727	0.684	0.999	0.720	0.848	良好协同	生态滞后型
2021	0.938	0.787	0.777	0.996	0.834	0.912	优质协同	生态滞后型
2022	0.979	0.852	0.742	0.994	0.857	0.923	优质协同	生态滞后型

表8　山西—河北障碍度指标排序结果

Tab.8　Ranking results of Shanxi-Hebei obstacle factor indicators

年份	首要障碍因子		次要障碍因子		三级障碍因子		四级障碍因子		五级障碍因子	
2008	C_1	0.621	B_4	0.301	B_5	0.256	C_2	0.256	A_5	0.240
2009	C_1	0.622	B_4	0.287	B_5	0.243	A_5	0.233	C_2	0.224
2010	C_1	0.479	B_4	0.321	B_5	0.245	A_5	0.244	A_2	0.218
2011	B_4	0.370	C_1	0.296	A_5	0.255	B_5	0.224	A_2	0.218
2012	B_4	0.405	C_1	0.277	A_5	0.254	B_5	0.230	A_1	0.218
2013	B_4	0.442	C_1	0.261	A_5	0.259	C_5	0.256	B_5	0.235
2014	B_4	0.316	A_5	0.259	C_1	0.147	A_1	0.245	C_5	0.226
2015	C_1	0.269	A_1	0.245	A_5	0.239	B_4	0.225	B_5	0.222
2016	C_5	0.305	A_1	0.247	A_3	0.235	A_5	0.230	C_1	0.223
2017	C_5	0.418	C_4	0.257	A_3	0.271	A_1	0.250	B_4	0.245
2018	C_5	0.461	B_2	0.308	A_3	0.298	A_1	0.270	B_4	0.251
2019	C_5	0.421	B_2	0.383	A_3	0.294	C_4	0.260	B_5	0.238
2020	C_5	0.592	B_2	0.421	C_4	0.333	A_3	0.279	B_6	0.270
2021	B_2	0.602	C_5	0.564	C_4	0.397	B_6	0.348	A_1	0.276
2022	A_3	0.632	C_5	0.598	B_2	0.509	C_4	0.402	B_6	0.381

污染和基建短板转向更为深层次的能源结构高碳化、外向型经济绿色竞争力不足及固废处置能力滞后等系统性挑战。2020—2022年，碳排放量持续加剧，客运量障碍度翻倍，进出口贸易总额跃居首位，揭示了区域经济活跃度提升与人口流动加剧所带来的新一轮交通与环境压力。

山西—内蒙古障碍度指标排序结果如表9所示，制约山西—内蒙古协同效能的关键因素发展趋势，深刻揭示了两省区作为重要能源基地面临的共性民生与生态难题。2008—2013年，以二氧化硫排放量和货物周转量为主导。2014—2022年，全体居民人均可支配收入跃居首位且数值持续攀升，成为绝对主导指标，碳排放量和一般工业固体废物产生量成为核心障碍因子，凸显了能源重化工基地绿色转型的艰巨性。与此同时，二氧化硫排放量、货物周转量、全体居民人均可支配收入等指标的障碍度数值在后期趋于接近。其背后深层机制在于资源型经济固有的“资源诅咒”[12]效应与收入分配失衡问题。两省区过度依赖煤炭等资源产业，对本地居民收入的带动效应有限[15]；加之产业结构单一，共同导致了经济增长成果未能充分转化为居民福祉，从而对消费拉动和社会均衡发展构成核心制约。

山西—河南障碍度指标排序结果如表10所示，山西—河南协同的主要障碍因子演变呈现“长期稳定，渐进更替”的特征。2008—2016年，二氧化硫排放量长期保持核心影响力，这与两省作为传统工业基地的产业结构密切相关。同期铁路营业里程在2008—2013年稳居次要核心位次，且2012年与二氧化硫排放量持平，可见二者构成前期区域协同发展的关键制约双元。一般工业固体废物产生量在2017年首次进入前五并位居第一，2020年后数值

表9　山西—内蒙古障碍度指标排序结果

Tab.9　Ranking results of Shanxi-Inner Mongolia obstacle factor indicators

年份	首要障碍因子		次要障碍因子		三级障碍因子		四级障碍因子		五级障碍因子	
2008	C_1	0.643	A_5	0.374	C_2	0.319	B_5	0.274	B_4	0.255
2009	C_1	0.665	A_5	0.370	C_2	0.292	B_5	0.273	B_1	0.249
2010	C_1	0.600	A_5	0.394	B_5	0.302	C_2	0.291	B_1	0.249
2011	C_1	0.480	A_5	0.424	C_2	0.298	B_4	0.291	B_1	0.263
2012	C_1	0.461	A_5	0.442	B_4	0.304	C_2	0.294	B_1	0.260
2013	C_1	0.463	A_5	0.462	C_2	0.283	B_5	0.267	B_4	0.255
2014	A_5	0.484	C_1	0.441	B_5	0.292	C_2	0.248	B_4	0.236
2015	A_5	0.479	C_1	0.427	B_5	0.332	C_2	0.217	B_1	0.102
2016	A_5	0.490	C_1	0.413	B_5	0.356	C_4	0.204	B_1	0.196
2017	A_5	0.516	C_1	0.373	C_4	0.302	B_5	0.301	C_5	0.233
2018	A_5	0.571	C_1	0.336	C_5	0.308	B_2	0.283	C_4	0.273
2019	A_5	0.603	B_5	0.323	C_4	0.267	C_5	0.259	B_2	0.239
2020	C_5	0.438	C_4	0.397	A_1	0.318	B_2	0.313	A_2	0.300
2021	A_5	0.836	B_2	0.466	C_4	0.465	C_5	0.447	B_6	0.336
2022	A_5	0.950	C_4	0.480	B_2	0.476	C_5	0.473	B_6	0.396

表10　山西—河南障碍度指标排序结果

Tab.10　Ranking results of Shanxi-Henan obstacle factor indicators

年份	首要障碍因子		次要障碍因子		三级障碍因子		四级障碍因子		五级障碍因子	
2008	C_1	0.629	B_4	0.280	C_2	0.248	B_5	0.248	A_5	0.222
2009	C_1	0.614	B_4	0.292	C_2	0.269	B_5	0.247	A_5	0.218
2010	C_1	0.615	B_4	0.316	B_5	0.259	C_2	0.234	A_5	0.220
2011	C_1	0.453	B_4	0.389	C_2	0.265	B_5	0.243	A_5	0.223
2012	C_1	0.431	B_4	0.431	C_2	0.262	B_5	0.251	A_5	0.227
2013	C_1	0.416	B_4	0.306	B_5	0.244	C_2	0.242	A_5	0.227
2014	C_1	0.395	B_5	0.282	B_4	0.246	A_1	0.231	A_5	0.226
2015	C_1	0.425	B_5	0.297	A_1	0.239	A_5	0.220	B_4	0.216
2016	C_1	0.352	B_5	0.333	A_1	0.237	B_4	0.215	A_5	0.212
2017	C_4	0.325	B_5	0.322	C_1	0.298	B_4	0.256	A_1	0.229
2018	B_5	0.329	B_4	0.305	C_4	0.298	C_1	0.274	C_5	0.267
2019	B_5	0.390	C_4	0.321	A_3	0.319	B_2	0.264	A_1	0.229
2020	C_4	0.453	C_5	0.397	B_2	0.305	A_3	0.266	A_1	0.238
2021	C_4	0.525	B_2	0.458	C_5	0.435	A_1	0.372	A_2	0.326
2022	A_3	0.866	B_2	0.541	C_4	0.534	C_5	0.466	B_6	0.457

进一步提升。深层原因在于煤炭等行业产生的固体废物的治理问题日益凸显。这暴露了两省在固废资源化综合利用技术、产业链衔接等方面存在短板，成为制约区域生态环境质量改善的新瓶颈[10]。

山西—陕西障碍度指标排序结果如表11所示，影响山西—陕西协同水平提升的主要因素中，2008—2015年，二氧化硫排放量长期占据首位，但其数值呈波动下降趋势。2016—2019年，货物周转量持续稳居首位且数值稳步上升，成为这一阶段的核心指标，反映了货运需求增长带来的物流与环境压力。2020—2021年，一般工业固体废物产生量取代货物周转量占据首位，这表明两省协同发展面临的挑战进入以绿色低碳转型为核心的高级阶段[10]。2022年，社会消费品零售总额的障碍度显著跃升至首位，形成新的主导格局，反映了消费结构升级与绿色转型之间的张力，需通过绿色消费政策引导平衡，预示着迫切需要探索绿色消费与经济增长的新平衡点，这也与全国倡导的绿色低碳生活趋势相契合。

表11　山西—陕西障碍度指标排序结果

Tab.11　Ranking results of Shanxi-Shaanxi obstacle factor indicators

年份	首要障碍因子		次要障碍因子		三级障碍因子		四级障碍因子		五级障碍因子	
2008	C_1	0.627	B_5	0.304	C_2	0.270	A_3	0.248	B_1	0.232
2009	C_1	0.652	B_5	0.333	C_2	0.284	B_1	0.265	A_3	0.257
2010	C_1	0.635	B_5	0.369	B_1	0.270	A_3	0.268	C_2	0.233
2011	C_1	0.461	B_5	0.372	A_3	0.291	C_2	0.283	B_1	0.278
2012	C_1	0.438	B_5	0.387	A_3	0.312	C_2	0.280	B_1	0.265
2013	C_1	0.425	B_5	0.403	A_3	0.330	C_2	0.257	B_4	0.242
2014	C_1	0.398	B_5	0.384	A_3	0.272	C_2	0.223	A_5	0.213
2015	C_1	0.415	B_5	0.383	A_3	0.272	A_1	0.219	B_1	0.217
2016	B_5	0.383	C_1	0.374	A_3	0.276	A_1	0.220	C_4	0.208
2017	B_5	0.380	C_1	0.328	C_4	0.313	A_3	0.257	A_1	0.224
2018	B_5	0.409	C_1	0.309	C_4	0.295	B_2	0.259	C_5	0.252
2019	B_5	0.517	C_4	0.314	B_2	0.295	A_2	0.263	A_3	0.259
2020	C_4	0.460	B_2	0.384	C_5	0.355	A_2	0.293	B_6	0.260
2021	C_4	0.543	B_2	0.542	A_2	0.491	C_5	0.420	B_6	0.327
2022	A_4	0.999	C_4	0.545	B_2	0.531	C_5	0.455	B_6	0.433

3　结论及启示

3.1　结论

（1）协同维度的演进特征与对比分析。研究区域内各省份的协同水平均呈现从“失调”向“协同”的演进趋势，这一总体规律与多数已有研究[7-8]结论相符。然而本研究独有发现，资源型地区存在协同水平整体提升，但系统长期表现为“生态滞后型”。特别是在协同水平进入高位阶段后，提升速度明显放缓，揭示了资源型地区协同发展存在显著的“边际效益递减”规律。这一发现为判断区域转型阶段提供了新的理论依据。

（2）演化维度的机理揭示与创新发现。在演化机制解析方面，本研究通过障碍度模型的动态分析，揭示了制约因子从传统污染治理向系统性绿色转型问题演变的完整路径。本研究首次发现并验证了社会性障碍因子在特定区域(如山西—内蒙古)的主导作用，将制约因素拓展至社会分配领域，揭示了“资源诅咒”在协同层面的深层影响，为理解资源型地区转型困境提供了新的视角。同时，通过系统追踪碳排放从“潜在压力”到“首要制约”的角色转变过程，弥补了现有文献对关键指标动态演变轨迹解析不足的缺陷。

3.2　启示

本研究的实证分析表明，资源型地区与不同邻省的协同演化路径及障碍因子存在显著差异，因此基于协同水平评估与障碍因子诊断结果，提出以下更具针对性和差异化的协同发展路径。

3.2.1　实施差异化精准治理，破解省际协同核心矛盾

山西—河北：应对后期结构性环境压力，应推动产业结构深度绿色转型，逐步降低对化石能源的依赖[9]；优化交通结构[19-20]，提升铁路在货运中的比重，推广低碳客运模式；强化固废资源化利用能力建设，并深化跨省协同治理机制[7]，形成区域内政策和技术的有效联动。

山西—内蒙古：着力破解“资源诅咒”下的民生与生态双重困境。主要障碍因子表明山西—内蒙古发展问题在于资源型经济转型滞后，表现为居民人均可支配收入低，以及生态环境协同治理难题[18]。建议加速产业多元化，培育非煤产业体系，实施严格的碳与固废管控策略[17]，完善生态保护与长效治理机制；提升交通系统效率和绿色化水平，推动智能交通发展，并保障转型过程中民生问题的解决。

山西—河南：核心矛盾在于污染物形态转变与交通模式转型。主要障碍因子表明客运压力逐步上

升。随着气态污染初步控制，固废治理与客运结构问题成为新挑战。应加强生态环境的综合治理[12]，将固废资源化作为下一阶段环保重点；加快降低煤炭依赖，发展清洁能源、高端装备制造等新兴产业，增强转型动力[15]；引导外向型经济实现低碳绿色发展，特别是关注进出口贸易总额障碍的绿色低碳化；平衡客货运发展，推进多式联运，有针对性地降低客运交通的碳排放压力。

山西—陕西：障碍因子中表明需要警惕后期经济增长模式带来的高碳化与交通模式高碳化。建议加强生态脆弱区的保护和修复[7]；推动经济绿色低碳转型[17]，发展新兴产业；加速交通能源结构的调整与低碳技术应用；完善固废治理与资源化利用体系，建立跨周期调控机制，以平衡短期经济发展与长期可持续性的关系。

3.2.2　明确协同发展优先序，打造区域转型样板区

山西—陕西协同水平最高，已进入“优质协同”阶段。两省同属黄河流域生态保护和高质量发展国家重大战略核心覆盖区[13]，在黄河“几字弯”治理、能源革命协同、基础设施互联互通等方面积累了良好的合作基础。因此，建议将山西—陕西协同作为区域发展的优先方向。具体路径包括：共建黄河流域生态保护示范带；加强在煤炭清洁利用、新能源、高端装备制造等领域的产业协作[12]；推进交通能源结构共调共控，联合布局绿色交通走廊与充电基础设施网络；构建固废区域协同处置与资源化利用体系，共同打造全国省际协同绿色低碳转型的样板区。

参考文献：

[1] 刘　晶，杨怡帆．数据要素流动对区域协调发展的影响机理研究[J]．管理学刊，2025，38(3)：133-148.
LIU Jing，YANG Yifan. The Influence Mechanism of Data Element Flow on Regional Coordinated Development[J]. Journal of Management，2025，38(3)：133-148.

[2] Duranton G，Turner M A. The Role of Transportation Speed in Economic Growth and Productivity[J]. Nature Communications，2023，14：6103.

[3] 孙朝阳．成渝地区双城经济圈交通优势度与经济发展水平耦合协调评价研究[D]．重庆：重庆交通大学，2024.

[4] JIA R N，SHAO S，YANG L L. High Speed Rail and CO_2 Emissions in Urban China：A Spatial Difference-in-Differences Approach[J]. Energy Economics，2021，99：105271.

[5] WANG W，HU K，GONG L. Spatial-Temporal Coupling Relationship and Driving Factors between Transportation-Environment-Technology-Economy：A Case Study of the Backward U-Shaped Bend Metropolitan Area in the Yellow River Basin[J]. Environmental and Sustainability Indicators，2025，26：100666.

[6] 赵领娣，孙兆旭．海岸带城市经济发展质量与生态韧性协同发展演化及空间收敛特征[J]．经济地理，2023，43(7)：119-129，240.
ZHAO Lingdi，SUN Zhaoxu. Evolution of Coordinated Development between Economic Development Quality and Ecological Resilience in Coastal Cities and Its Spatial Convergence Features[J]. Economic Geography，2023，43(7)：119-129，240.

[7] 肖　红，胡宇航，王孝坤，等．西部陆海新通道区域经济-交通运输-生态环境耦合协调发展及障碍度研究[J]．铁道运输与经济，2022，44(7)：1-7.
XIAO Hong，HU Yuhang，WANG Xiaokun，et al. Coupling and Coordinated Development and Obstacle Degree of Regional Economy，Transportation，and Ecological Environment of New Western Land-Sea Corridor[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(7)：1-7.

[8] 冯晓兵．成渝地区交通运输与区域经济耦合协调发展研究[J]．铁道运输与经济，2022，44(3)：92-98.
FENG Xiaobing. Research on the Coupling and Coordinated Development of Transportation and Regional Economy in Chengdu-Chongqing Area[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(3)：92-98.

[9] LI J J，WANG P X，MA S. The Impact of Different Transportation Infrastructures on Urban Carbon Emissions：Evidence from China[J]. Energy，2024，295：131041.

[10] 刘那日苏，黄　杰．自然资源依赖对碳全要素生产率增长效应的统计检验[J]．统计与决策，2025，41(1)：87-92.

[11] 洪　蕾，孙　杰，刘　冬，等．长三角中心城市群生态环境与社会经济耦合协调发展及其影响因素研究[J]．生态与农村环境学报，2024，40(9)：1155-1166.
HONG Lei，SUN Jie，LIU Dong，et al. Research on the Development of Coupling Coordinated Relationship and the Affecting Factors of Eco-Environment and Socio-Economy in

Central Urban Agglomeration of Yangtze River Delta Region[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2024, 40(9): 1155-1166.

[12] 徐　亚，王京京，李　淑，等. 黄河流域固废治理现状、问题与对策建议[J]. 环境科学研究，2023，36(2)：373-380.
XU Ya, WANG Jingjing, LI Shu, et al. Present Situation, Problems and Countermeasures of Solid Waste Management in the Yellow River Basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2023, 36(2): 373-380.

[13] 中华人民共和国中央人民政府. 习近平在山西考察时强调：努力在推动资源型经济转型发展上迈出新步伐 奋力谱写三晋大地推进中国式现代化新篇章[EB/OL]. [2025-07-31]. https://www.gov.cn/yaowen/liebiao/202507/content_7031043.htm.

[14] DU Q, WANG X Q, LI Y, et al. An Analysis of Coupling Coordination Relationship between Regional Economy and Transportation: Empirical Evidence from China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2022, 29(23): 34360-34378.

[15] 阮芳丽，王　锋. 协同推进资源型城市“降碳—增长”的动态平衡及实现路径：基于系统理论的综述[J]. 现代城市研究，2025(6)：11-17，23.
RUAN Fangli, WANG Feng. Dynamic Balance and Realization Paths for the Synergy of “Carbon Reduction-Economic Growth” in Resource-Based Cities: A Review Based on System Theory[J]. Modern Urban Research, 2025(6): 11-17, 23.

[16] 国家统计局，科学技术部. 中国科技统计年鉴2008[M]. 北京：中国统计出版社，2008.

[17] 山西省统计局，国家统计局山西调查总队. 山西统计年鉴2008[M]. 北京：中国统计出版社，2008.

[18] 赵丽霞，魏梦迪. 蒙晋陕煤炭足迹测算与经济增长低碳路径研究[J]. 干旱区资源与环境，2025，39(4)：13-21.
ZHAO Lixia, WEI Mengdi. Calculation of Coal Footprint and Research on Low-Carbon Path of Economic Growth Regards to Inner Mongolia-Shanxi-Shaanxi Regions[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2025, 39(4): 13-21.

[19] 胡弼丞，梁　栋，宋浚哲. 陕北地区煤炭运输“公转铁”形势及对策建议[J]. 铁路物流，2026，44(6)：24-30.
HU Bicheng, LIANG Dong, SONG Junzhe. Situation and Countermeasures of “Road-to-Rail Transition” for Coal Transportation in Northern Shaanxi[J]. Railway Logistics, 2026, 44(6): 24-30.

[20] 申嘉琪，郑平标，张　戎，等. 基于市场细分的白货运输“公转铁”对策研究[J]. 铁路物流，2025，43(5)：7-15.
SHEN Jiaqi, ZHENG Pingbiao, ZHANG Rong, et al. Measures for Modal Shit from Road to Rail in Non-Bulk Cargo Transportation Based on Market Segmentation[J]. Railway Logistics, 2025, 43(5): 7-15.

(责任编辑　李丹丹)

(上接第198页)

19-26.

[24] 黄　洁，熊美成，王姣娥，等. 多情景模拟下的跨境铁路运输时效研究：以中老铁路为例[J]. 地理科学，2024，44(1)：91-98.
HUANG Jie, XIONG Meicheng, WANG Jiaoe, et al. Temporal Efficiency of Cross-Border Railways with Multiple Simulation Scenarios: A Case Study of the China-Laos Railway[J]. Scientia Geographica Sinica, 2024, 44(1): 91-98.

[25] 宋玉阳，耿元芳，卢　旭，等. 中老铁路跨境物流货源组织策略与运作模式研究[J]. 铁道运输与经济，2023，45(4)：14-19.
SONG Yuyang, GENG Yuanfang, LU Xu, et al. Freight Source Organization Strategy and Operation Mode for Cross-Border Logistics of China-Laos Railway[J]. Railway Transport and Economy, 2023, 45(4): 14-19.

[26] LI X, ZHOU Y, ZHAO M, et al. A Harmonized Global Nighttime Light Dataset 1992—2018[J]. Scientific Data, 2020, 7(1): 1-9.

[27] 顾朝林，庞海峰. 基于重力模型的中国城市体系空间联系与层域划分[J]. 地理研究，2008，27(1)：1-12.
GU Chaolin, PANG Haifeng. Study on Spatial Relations of Chinese Urban System: Gravity Model Approach[J]. Geographical Research, 2008, 27(1): 1-12.

[28] 宗会明，杜　瑜，黄　言. 中国西南地区-东南亚国家陆路交通可达性与城市空间联系格局[J]. 经济地理，2020，40(5)：90-98.
ZONG Huiming, DU Yu, HUANG Yan. Accessibility and Spatial Linkage of Cities between Southwest China and SEA Countries Based on Land Transportation[J]. Economic Geography, 2020, 40(5): 90-98.

(责任编辑　金　晶)