治理绩效

碳中和目标下河南省环境-经济-能源协同治理研究

张子元，叶云飞

（河南理工大学工商管理学院，焦作 454000）

摘要：随着产业结构调整和绿色转型政策的推进，河南省清洁能源利用和污染治理成效显著，但能源结构转型仍存挑战，环境与经济协调发展任务艰巨，探索河南环境-经济-能源（environment-economy-energy，3E）系统是衡量区域可持续发展水平的核心耦合体系，其协同优化对实现“双碳”目标具有关键意义。聚焦2016—2023年该系统综合发展水平及耦合协调特征，通过指标体系构建、熵权法赋权、莫兰指数模型，探究其空间相关性与溢出效应，再以地理探测器模型分析影响因素及交互作用。研究表明，2016—2023年河南3E系统各子系统及复合系统整体呈上升态势，仅2022年受外部冲击出现波动；系统耦合度长期高位、耦合协调度呈阶段性上升后修复走势；空间上全局集聚性不明显，局部以豫北经济区和中原城市群相关性较强，呈“高值孤岛-低值包围”的异质分化特征；核心驱动因素为治理投入与金融发展水平，环境规制与金融发展的交互驱动作用最显著。

关键词：河南省；环境-经济-能源系统；协同治理；耦合协调度；地理探测器模型

中图分类号：F127 **文献标志码：**A **文章编号：**1671－1807(2026)08－0307－10

《巴黎协定》框架下，“双碳”已成为全球共识，中国积极响应，明确“2030碳达峰、2060碳中和”目标并出台多项绿色发展政策。党的二十届四中全会将“美丽中国建设取得新的重大进展”确立为“十五五”时期经济社会发展的主要目标之一，《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十五个五年规划的建议》明确提出“以碳达峰碳中和为牵引，协同推进降碳、减污、扩绿、增长”的核心部署，构建起“国家统筹-区域落地-行业协同”的双碳目标闭环管理体系，为地方绿色低碳转型提供了根本遵循。作为中部经济与人口大省，河南区位优势显著、产业基础扎实，其高质量发展既契合“十五五”时期区域差异化转型要求，也需依托省内联动配合，但河南环境与能源领域面临严峻挑战。因此，深度剖析三者协调发展关系及驱动因素，既是河南落实党的二十届四中全会精神、衔接“十五五”规划目标的必然要求，也为其绿色低碳转型提供支撑，也能为其他地区提供借鉴。

当前，环境-经济-能源三者相互作用是研究热点。张哲菲和李国平[1]基于2012—2022年中国31省份面板数据，发现系统耦合协调度总体上升、区域差异缩小，工业化起负向作用、城镇化呈正向促进作用。陈丹临[2]从开放经济视角，使用层次分析法探讨了长三角地区三元系统协调发展问题。张垚等[3]以全国和内蒙古为参照，测评得出呼和浩特市3E系统耦合协调度持续上升。Yao和Wang[4]借助系统动力学模型和熵权法，发现海洋经济-资源-环境系统短期环境情景耦合协调度较高，长期资源情景更合理。张力隽等[5]通过耦合协调度模型评价黄河流域系统，发现整体协调水平偏低，环境对经济的制约突出。陆秋雨[6]指出河南省2011—2020年相关系统耦合协调度波动上升，空间存在局部负相关。殷楠楠[7]以黄河流域9省份为研究对象，构建多系统综合指标体系，体现多系统协同推进流域可持续发展的治理内涵；张宗义[8]研究山东省经济高质量与生态保护的耦合协调关系，揭示二者呈“中度协调-高度协调”的上升演进态势，明确创新发展类指标为驱动因素、农用化肥施用量等为阻碍因素。黄竣璇和林昕[9]构建数字-能源-经济-环境评价指标体系，突出数字技术赋能多领域协同发展的治理内涵。张方程等[10]、王晓玲等[11]、陈柔昀等[12]均表明，产

收稿日期：2025-11-20

基金项目：河南省哲学社会科学规划（2024CJJ199）

作者简介：张子元（1995—），男，河南商丘人，博士，副教授，硕士研究生导师，研究方向为协同绿色治理；叶云飞（2001—），男，山西运城人，硕士研究生，研究方向为绿色治理。

业结构优化、清洁能源转型、政策支持是系统协调发展的关键驱动因素，传统能源依赖则是主要制约。

综上所述，环境-经济-能源系统耦合协调发展已获广泛关注，相关研究成果为探究奠定理论基础。但现有研究多侧重经济与环境协调，既未充分衔接“十五五”规划建议的需求，也缺乏煤炭、油气开采视角下的系统耦合及时空演化分析，且河南作为资源型地区，系统协调矛盾突出、存在发展异质性。因此，以河南为对象，从煤炭、油气开发视角探究化石能源、经济、环境协调互动具有重要价值，将通过构建理论框架、开展耦合协调评价与驱动分析，为河南绿色低碳转型提供思路。

1　环境-经济-能源耦合协调机理与指标体系

1.1　耦合协调机理

河南作为经济大省，正依托数字经济与高端制造构建新型产业体系，推动环境-经济-能源（environment-economy-energy，3E）系统协同发展。通过优化能源消费结构，以经济增长红利注入环境治理实践，生态改善已成为新动能，既催生绿色产业，又吸引优质资源助力产业升级；同时管控高耗能产业、完善能源基建、强化技术创新，实现能源高效配置与污染减排，形成能源与经济协同格局。但河南仍面临产业结构偏传统、能源结构以煤为主的突出问题，煤炭、钢铁等行业高耗能高污染，叠加煤炭枯竭、对外依存度上升等能源挑战，对生态环境造成冲击。短期来看，严格环境治理措施可能给部分区域经济和能源需求带来压力，但长远将推动产业结构深度调整与发展模式绿色转型，最终实现环境、经济与能源的协调发展。

1.2　耦合协调评价指标体系

结合河南发展实际，遵循相关原则构建含 3 个子系统、22 项指标的 3E 系统耦合协调评价体系，按绿色低碳转型的影响分正负两类（表 1）。数据取自 2016—2023 年相关统计公报，缺失数据以线性插补或省级数据匹配补充。

2　环境-经济-能源耦合协调结果与分析

2.1　环境-经济-能源耦合协调综合发展水平分析

2.1.1　综合评价方法

（1）构建原始指标矩阵 $\boldsymbol{X}=(x_{ij})_{m\times n}$，其中 i 为年序，2016 年为第 1 年、2023 年为第 m 年；j、n 分别为指标序号、指标个数（$n=22$）；x_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的原始数据。

（2）对指标数据进行标准化，构建标准化指标矩阵 $\boldsymbol{X}'=(x'_{ij})_{m\times n}$。为消除各指标量纲不同对评价结果的影响，采用极差变化法对各指标进行标准化处理。

正向指标：

表 1　环境-经济-能源系统耦合协调评价指标体系

子系统	准则层	指标层	含义	属性	符号
环境子系统	污染治理	工业废水治理设施数	实际投入运行的处理生产过程中产生废水的各类设施数量	正	x_1
		二氧化硫排放量	人类活动向大气中排放的二氧化硫总量	负	x_2
	资源利用	工业固体废弃物利用率	工业固体废弃物利用量/排放量	正	x_3
		人均水资源量	水资源总量/总人数	正	x_4
	生态效果	园林绿化投资额	开展园林绿化建设与维护活动所投入的资金总额	正	x_5
		建成区绿化覆盖率	建成区的绿地面积/总面积	正	x_6
		碳排放强度	碳排放量/GDP	负	x_7
经济子系统	发展规模	电信业务规模	电信企业为社会提供业务总量	正	x_8
		固定资产总投资额	固定资产投资规模	正	x_9
		信息服务业收入	信息传输、软件和信息技术服务行业规模以上企业收入	正	x_{10}
		电子商务交易额	电子商务平台完成的商品和服务的交易总额	正	x_{11}
	发展质量	数字普惠金融指数	北大数字普惠金融指数	正	x_{12}
		人均国民生产总值	GDP/地区总人数	正	x_{13}
		居民消费贡献率	社会消费品零售总额/地区生产总值	正	x_{14}
	分配公平	城乡收入比	城镇居民人均可支配收入/农村居民人均可支配收入	负	x_{15}
		基尼系数	一个国家或地区居民收入分配公平程度	负	x_{16}
能源子系统	总量利用	综合能源消费量	实际消耗的各类能源的总和	负	x_{17}
		能源消费弹性系数	地区能源消费增长率/地区 GDP 增长率	负	x_{18}
		电、热、燃气和水生产和供应业投资额	地区在能源供应基础设施领域的投入规模	正	x_{19}
	效率提升	单位建设用地 GDP 产出	每平方公里建设用地创造的 GDP	正	x_{20}
		单位水耗 GDP 产出	GDP/水消耗总量	正	x_{21}
		单位电耗 GDP 产出	GDP/用电总量	正	x_{22}

$$x'_{ij}=\frac{x_{ij}-\min\{x_i\}}{\max\{x_i\}-\min\{x_i\}} \tag{1}$$

负向指标:

$$x'_{ij}=\frac{\max\{x_{ij}\}-x_{ij}}{\max\{x_{ij}\}-\min\{x_{ij}\}} \tag{2}$$

式中:$\max\{x_j\}$、$\min\{x_j\}$ 分别为第 j 个指标的最大值、最小值;x'_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的标准化值。

(3)依据矩阵 X',构建指标权重计算矩阵 $\boldsymbol{Y}=(y_{ij})_{m\times n}$,其中 $y_{ij}=\dfrac{x'_{ij}}{\sum_{i=1}^{m}x'_{ij}}$。

(4)计算各评价指标的信息熵 e_j。

$$e_j=-\frac{1}{\ln m}\sum_{i=1}^{m}y_{ij}\ln y_{ij} \tag{3}$$

(5)计算各指标的熵权 ω_j。

$$\omega_j=\frac{1-e_j}{n-\sum_{j=1}^{m}e_j} \tag{4}$$

(6)构建指标综合得分矩阵 $\boldsymbol{Z}=(z_{ij})_{m\times n}$,其中 z_{ij} 为第 i 年第 j 个指标的综合得分,$z_{ij}=\omega_j x'_{ij}$。

(7)分别计算环境、经济、能源 3 个子系统综合评价值(各子系统的所有指标综合得分之和),把 3 个子系统综合评价值的平均值作为环境-经济-能源复合系统的综合评价值。

$$U_{1i}=\sum_{j=11}^{5}\omega_j x'_{ij} \tag{5}$$

$$U_{2i}=\sum_{j=1}^{10}\omega_j x'_{ij} \tag{6}$$

$$U_{3i}=\sum_{j=16}^{20}\omega_j x'_{ij} \tag{7}$$

$$U_i=\frac{U_{1i}+U_{2i}+U_{3i}}{3} \tag{8}$$

式中:U_{1i}、U_{2i}、U_{3i} 分别为环境、经济、能源子系统第 i 年的综合评价值;U_i 为环境-经济-能源复合系统第 i 年的综合评价值。

2.1.2 耦合协调测度模型

结合物理学中的耦合系数模型,提出 2 个及 3 个子系统的耦合度模型。

$$C_i=\begin{cases}\dfrac{2\sqrt{U_{1i}U_{2i}}}{(U_{1i}+U_{2i})},2\text{ 个子系统}\\[2ex]\dfrac{3^3\sqrt{U_{1i}U_{2i}U_{3i}}}{(U_{1i}+U_{2i}+U_{3i})},3\text{ 个子系统}\end{cases} \tag{9}$$

式中:C_i 为第 i 年的耦合度,反映各子系统之间关联性的强弱,C_i 越大关联性越强。因耦合度无法体现子系统综合协调水平,故提出耦合协调度模型。

$$D_i=C_iT_i=C_i(\alpha U_{1i}+\beta U_{2i}+\gamma U_{3i}) \tag{10}$$

式中:D_i 为第 i 年的耦合协调度;T_i 为反映 3 个子系统第 i 年发展水平的综合指标;α、β、γ 分别为环境、经济、能源子系统的权重系数,计算环境-经济-能源复合系统耦合协调度时取 $\alpha=\beta=\gamma=1/3$,计算两两子系统间的耦合协调度时取 $\alpha=\beta=\gamma=1/2$。参考相关研究成果,把耦合协调度分为 10 级,对应的耦合协调状态如表 2 所示。

为直观观测 2016—2023 年 3 个子系统综合发展指数趋势,构建三系统指标体系后,利用式(1)和式(2)进行数据处理,先求得各指标权重(表 3)。

通过这些权重,与各指标标准化后数据,采用式(3)~式(8),对河南省三个子系统进行综合发展评测,得到河南省环境,经济和能源综合发展评价指数(表 4)。

如图 1 所示,2016—2023 年河南 3E 系统各子系统均波动上升:2016—2021 年,农业基础、新兴产业崛起与产业结构转型带动经济平稳增长,能源消

表 2 耦合协调度分级和状态

D	耦合协调状态	D	耦合协调状态
0.0~0.1	极度失调	0.5~0.6	勉强协调
0.1~0.2	严重失调	0.6~0.7	初级协调
0.2~0.3	中度失调	0.7~0.8	中级协调
0.3~0.4	轻度失调	0.8~0.9	良好协调
0.4~0.5	濒临失调	0.9~1.0	优质协调

表 3 指标权重

环境		经济		能源	
指标	权重	指标	权重	指标	权重
x_1	0.184 3	x_8	0.083 6	x_{17}	0.079 3
x_2	0.014 7	x_9	0.032 4	x_{18}	0.012 5
x_3	0.040 0	x_{10}	0.104 1	x_{19}	0.326 8
x_4	0.294 5	x_{11}	0.057 7	x_{20}	0.151 7
x_5	0.414 1	x_{12}	0.008 9	x_{21}	0.299 5
x_6	0.013 8	x_{13}	0.028 2	x_{22}	0.130 3
x_7	0.038 7	x_{14}	0.649 6		
		x_{15}	0.015 8		
		x_{16}	0.019 7		

表 4 各子系统及复合系统逐年综合评价值

年份	U_{1i}	U_{2i}	U_{3i}	U_i
2016	0.166 156	0.046 020	0.238 613	0.150 263
2017	0.205 308	0.052 375	0.269 237	0.175 640
2018	0.207 978	0.064 825	0.266 342	0.179 715
2019	0.207 041	0.075 111	0.306 087	0.196 079
2020	0.243 808	0.085 486	0.308 761	0.212 685
2021	0.319 571	0.111 497	0.294 283	0.241 784
2022	0.233 901	0.079 673	0.319 294	0.210 956
2023	0.259 855	0.082 953	0.297 386	0.213 398

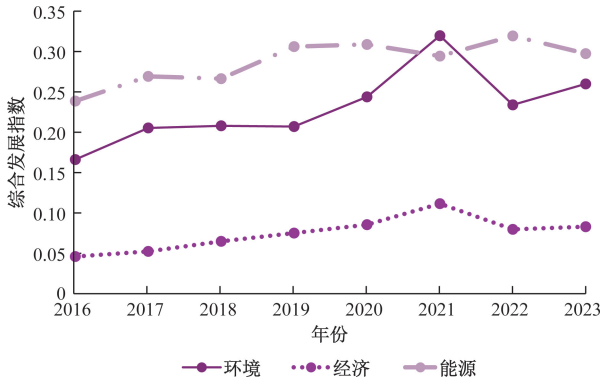


图 1　河南省环境、经济和能源综合发展水平

耗因基建与投资需求维持高位，环境子系统积累后 2021 年达峰，政策扶持与生态修复支撑指数上升，仅能源结构转型受自然条件、储能技术及新旧能源衔接问题制约；2021—2023 年，环境与经济子系统小幅波动回落但整体稳定，经济 2022 年下滑受产业转型与疫情冲击影响，环境回落因前期治污效益递减，能源子系统 2022 年因传统能源政策强化、新基建能源投资及可再生能源落地实现上升，且未加剧环境压力。

2.2　环境-经济-能源耦合协调时空演变特征分析

2.2.1　耦合及耦合协调时序演变特征

图 2 展示了 2016—2023 年河南 3E 系统耦合度与耦合协调度的动态演变。耦合度长期处于高位，2016—2017 年平稳运行，2018 年起小幅攀升，2019—2020 年持续走高并于 2020 年达到阶段峰值；2021 年小幅回落但仍处高位，2022—2023 年趋于平稳，说明系统间紧密绑定的格局未因外部冲击改变。耦合协调度呈现“稳步起步-加速提升-短期回调-逐步修复”的轨迹，2016—2018 年随初期绿色转型举措缓慢上升，协同质量开始改善；2018—2020 年因能源结构优化、经济绿色升级与环境治理形成合力，协同质量突破瓶颈；2021—2022 年受疫情导致，协同质量小幅回落；2023 年逐步修复。当前河南 3E 系统虽受外部因素干扰，且存在关联性强但协同质量待提升的现状，但长期向好趋势未变，正稳步迈向更高水平的协调发展阶段。

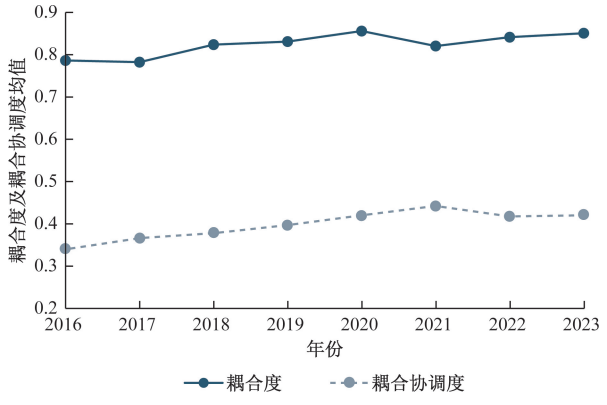


图 2　河南省耦合度和耦合协调度变化

2.2.2　分区域耦合协调空间演变特征

基于时间序列分析，探究河南全省及不同区域 3E 系统相互作用强度的动态演变。结合区域功能定位、产业结构与资源禀赋差异，将 17 个地级市及济源示范区划分为四大经济区开展对比研究，完成四大经济区 2016 年、2018 年、2020 年、2023 年耦合协调发展阶段的空间制图。

如图 3 所示，2016—2023 年河南省 3E 系统耦合协调度整体呈改善态势，但区域发展不均衡特征显著。2016 年绿色低碳转型初期，全省多数区域处于轻度失调，仅郑州和许昌略优，原因在于转型初期政策传导不足、产业结构调整尚未启动，系统协同效应尚未显现；2018 年格局略有分化，焦作从轻度失调下滑至中度失调，多数城市仍停滞于轻度失调，仅洛阳、南阳等少数城市进阶至濒临失调，主要因部分传统工业城市依赖高耗能产业，转型动力薄弱，且区域间未形成有效协同机制；2020 年整体协同成效显现，多数城市迈入濒临失调、郑州升级为初级协调，但平顶山、焦作等仍处于轻度失调，问题在于资源型城市产业结构固化、环境治理难以推进，转型难度大；2023 年高协调区域持续巩固、低协调区域有所缩减，但郑州回落至勉强协调，焦作、济源、三门峡等仍停留在轻度失调，本质是部分城市转型后续动力不足、区域间资源要素流动不畅，加之部分核心城市受外部冲击与内部产业转型瓶颈影响，导致区域进度差异始终存在。

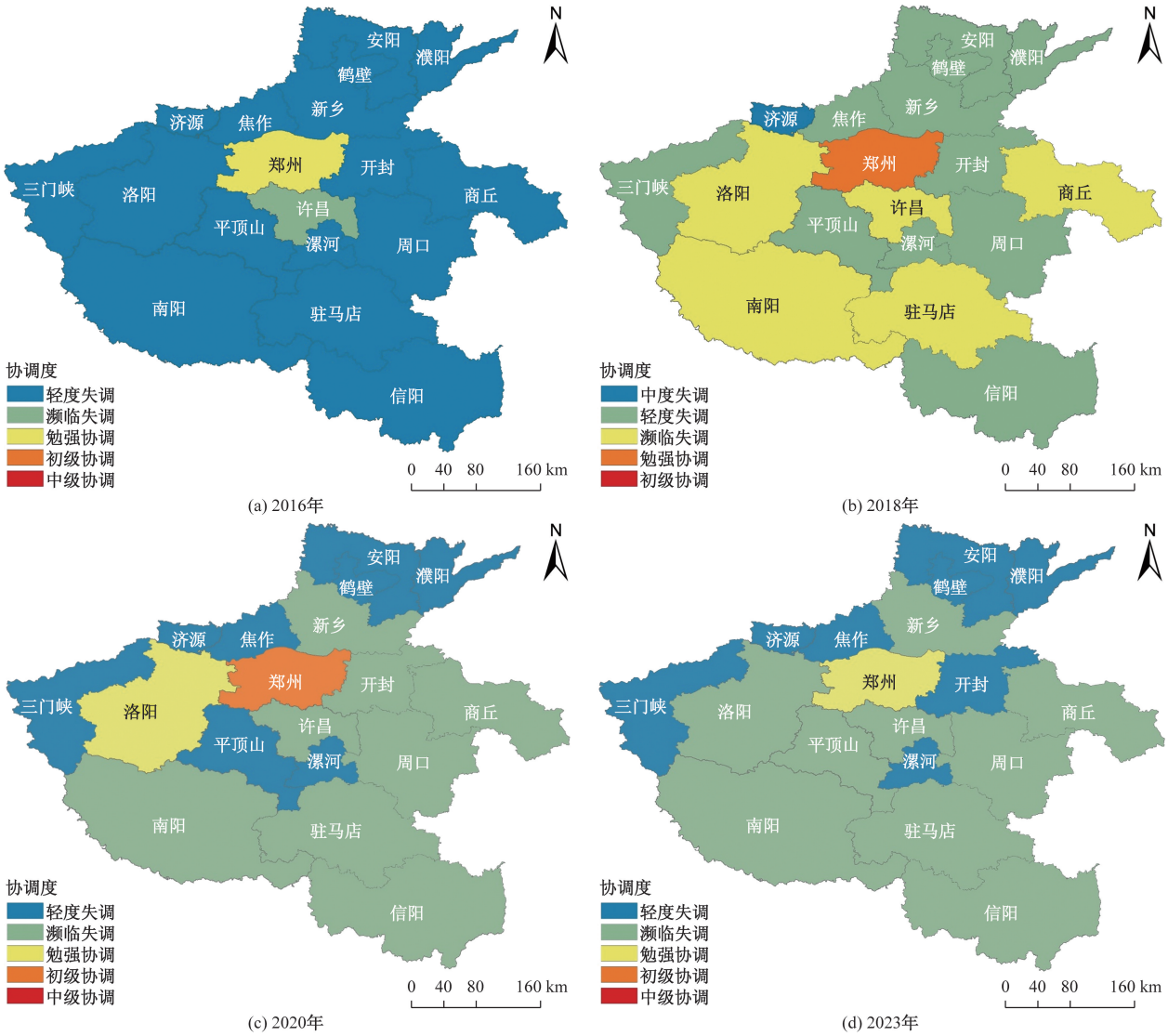
2.3　环境-经济-能源耦合协调空间相关性

2.3.1　全局空间自相关

根据空间自相关理论可知，Moran’s I 指数模型可以检验研究对象在空间上是否具有集聚的分布特征，其计算公式为

$$I=\frac{N\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}(X_i-\bar{X})(X_j-\bar{X})}{\left(\sum_{i=1}^{n}\sum_{j=1}^{n}W_{ij}\right)\sum_{i=1}^{n}(X_i-\bar{X})_i^{2}} \tag{11}$$

式中：X_i、X_j 分别为 i 区域和 j 区域的研究单元值；W_{ij} 为空间权重矩阵元素；N 为研究对象个数。全局莫兰指数的通用取值范围为－1～1，其取值范围为－1～1，数值越接近 1 正空间自相关越强，越接近－1 负空间自相关越显著。



审图号：GS(2024)0650号

图 3　分区域耦合协调度空间变化

为探究河南 3E 系统耦合协调度的全局空间关联与集聚特征，采用邻接矩阵全局 Moran's I 指数模型检验 2016—2023 年区域数据(表 5)。结果显示，部分年份呈正向空间相关、其余为负向，指数均接近 0，且未通过显著性检验，表明系统空间异质性存在、集聚性不明显、分布离散但整体差异小，与李治国等[13]的结论基本一致，即 3E 系统耦合协调的内部演化差异更突出，需通过三者有序调配打破单一系统束缚，实现综合有机体和谐发展。该结果受系统复杂性及三者相互博弈影响，因全局指数难以细致剖析区域关联，故进一步采用局部 Moran's I 指数探究区域空间集聚性。

2.3.2　局部空间相关性

全局自相关检验仅反映宏观整体特征，难以体现局部空间聚集效应，局部 Moran's I 指数检验可弥补此局限，其计算公式为

$$I_i' = \frac{Z_i}{S^2}\sum_{i\neq j}^{n} W_{ij}Z_j \tag{12}$$

式中：$Z_i = X_i - \bar{X}$，$Z_j = X_j - \bar{X}$，$S^2 = \frac{1}{n}\sum(X_i - \bar{X})$。其中，与全局空间自相关类似，当指数值大于 0，则表明其在空间上存在空间集聚效应，相反，如

表 5　环境、经济和能源耦合协调全局 Moran's I 指数

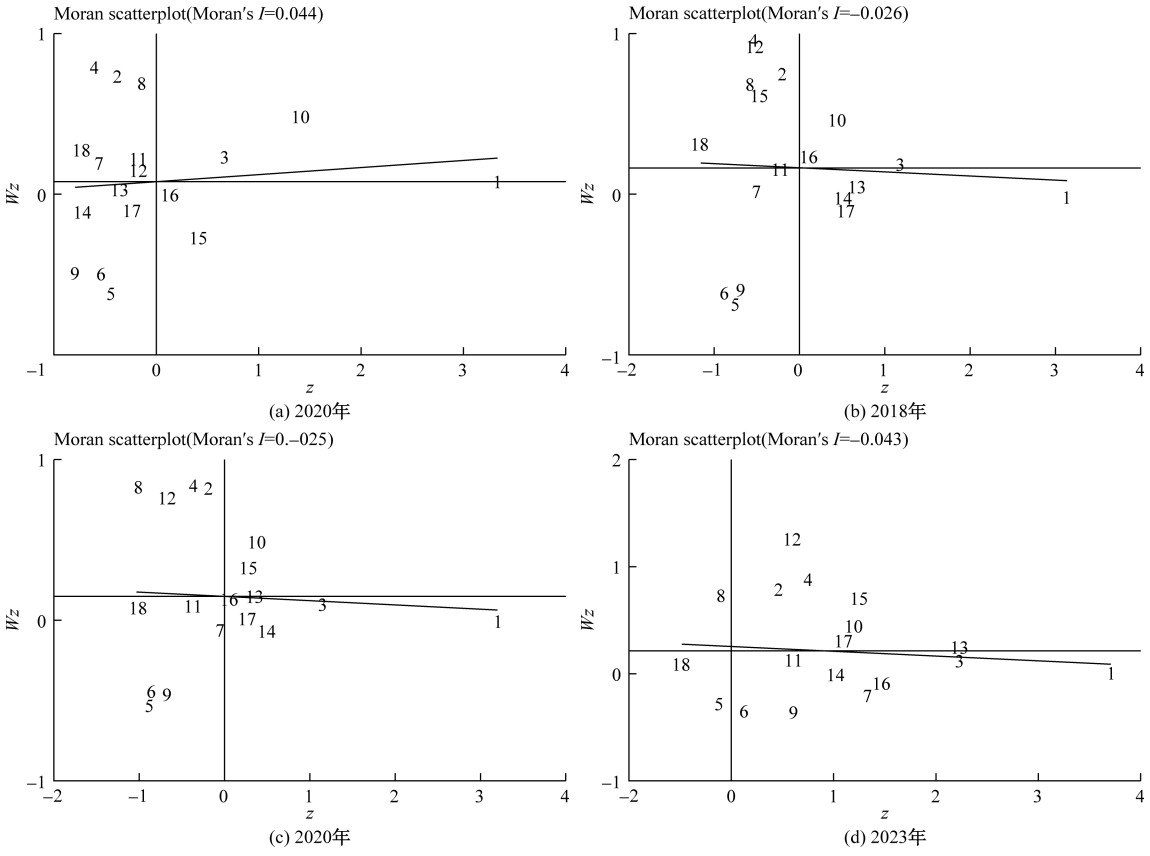
年份	Moran's I	$E(I)$	sd(I)	z	P^*
2016	0.044	−0.059	0.120	0.853	0.197
2017	0.036	−0.059	0.124	0.763	0.223
2018	−0.026	−0.059	0.131	0.253	0.400
2019	0.052	−0.059	0.125	0.889	0.187
2020	−0.025	−0.059	0.128	0.262	0.397
2021	−0.079	−0.059	0.146	−0.138	0.445
2022	−0.085	−0.059	0.134	−0.199	0.421
2023	−0.043	−0.059	0.145	0.109	0.456

果指数值小于 0，则说明其在空间上存在空间离散现象。

为深入探究河南省不同区域间是否存在空间依赖性与关联性，通过局部 Moran's I 指数模型，检验 2016—2023 年河南省 3E 系统耦合协调度的空间关联性，分别对河南省 2016 年、2018 年、2020 年及 2023 年 3E 系统的耦合协调度开展局部空间相关性检验，结果如图 4 所示。2016 年局部莫兰指数为 0.044，呈微弱正向自相关，反映区域协同存在极弱的初步聚集趋势；2018 年、2020 年、2023 年指数分别为－0.026、－0.025、－0.043 的微弱负向自相关，且负向趋势逐步增强，空间关联模式转向异质分化。从整体来看，在 2016—2017 年，河南省不同区域之间的各子系统间的关联程度，为正向的且接近 0，说明河南省环境-经济-能源协同水平存在初步聚集趋势，但关联性极弱。2018 年之后，呈现出负向空间影响趋势，并且这一趋势在逐渐增大；2020 年受新冠肺炎疫情影响进一步拉大差距，2023 年双碳目标下区域能源转型路径差异，加剧了负向相关。

莫兰散点分布清晰呈现演变轨迹，2016 年散点稀疏随机，多集中于第二、三象限，高值聚集辐射弱，聚集效果弱，协同处于初级阶段；2018—2020 年异质性扩散，第二象限高值包围低值出现在豫北城市，第四象限低值包围高值，中原城市未带动周围城市，显现中原城市孤岛化现象，两象限点密度上升，区域间负向牵制增强；2023 年第二、四象限点集群化明显，豫西、豫北更多城市进入第二象限，传统能源产业形成负向溢出与反向锁定，第四象限高值与低值区域相互遏制，点向右侧延伸，中原城市与东部城市差距扩大，空间对峙格局成型，协同难度加大。

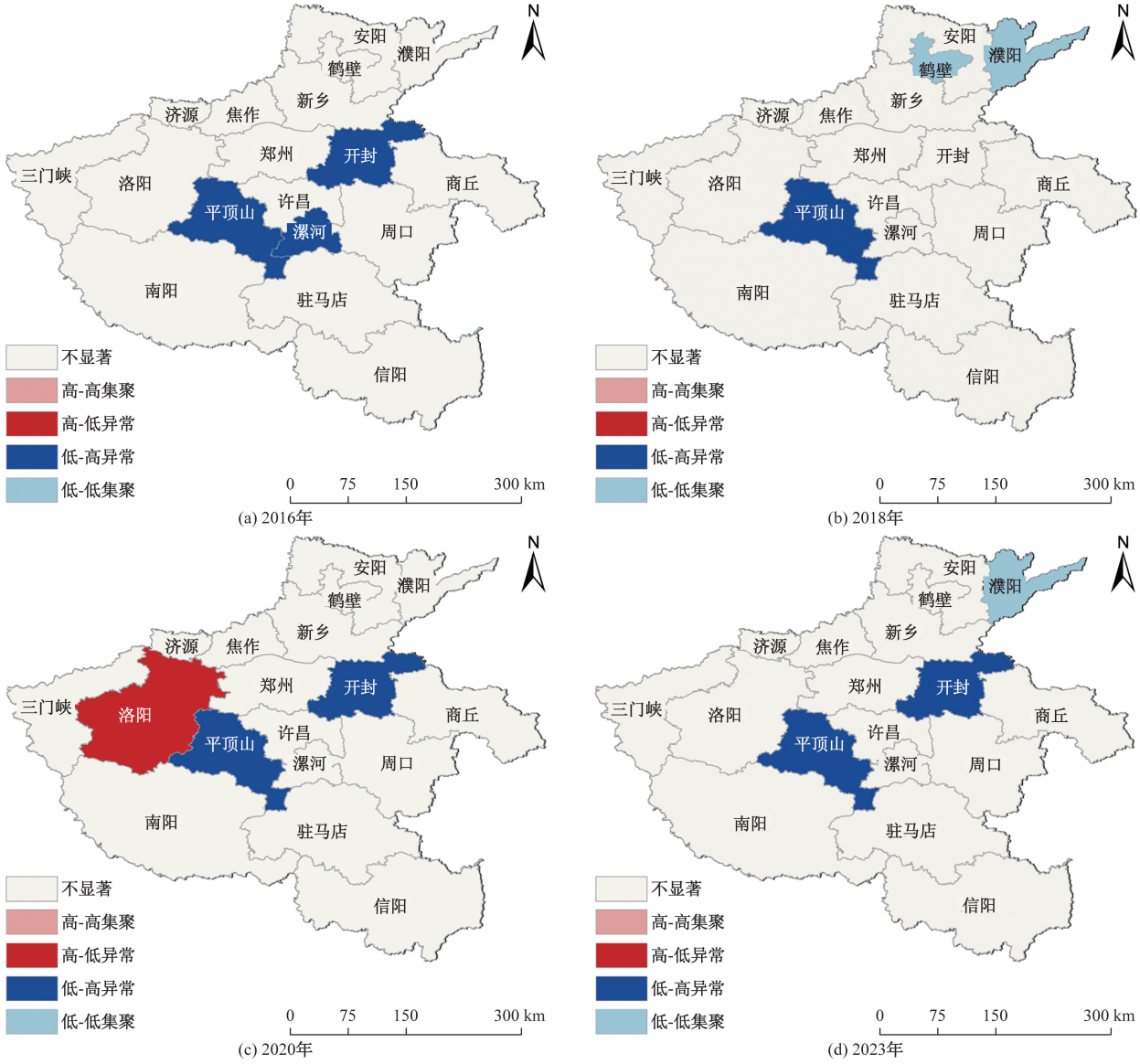
在 Moran's I 指数空间自相关分析基础上，结合冷热点分析，生成耦合协调度空间 Lisa 聚类图（图 5），进一步揭示河南 3E 系统耦合协调度的空间分异特征。豫北经济区与中原城市群的局部空间相关性尤为突出，2016—2023 年空间格局历经“低值锁定-分化冲突-高值聚集-格局固化”的演变：2016 年平顶山、许昌、漯河等为低值集中区；2018 年高值孤岛初现，平顶山仍被高值包围，豫北安阳、鹤壁形成低值聚类现象，区域协同差异加剧；2020 年豫西区的洛阳呈现“自身高值、周边低值”特征，平顶山持续处于低值聚类，高低值空间冲突激化；2023 年低值区收缩，豫北部分城市低值异常消退，但洛阳高值异常与平顶山低值困境未根本改变而



(a) 2020年　(b) 2018年

(c) 2020年　(d) 2023年

图 4　分区域耦合协调度莫兰散点图



审图号：GS(2024)0650号

图 5　河南省分区域耦合协调度 Lisa 聚类图

且平顶山长期陷入“高值包围”，核心原因是郑州、洛阳等借数字经济与智能制造实现产业升级，平顶山受传统产业占比高、环境治理难制约发展滞后形成空间落差，未来需打破“高值孤岛-低值包围”固化格局，提升全域耦合协调度。

3　环境-经济-能源耦合协调驱动因素分析

此研究主要采用地理探测器模型进行因子探测和交互探测，其计算公式为

$$q = 1 - \frac{1}{N\sigma^2}\sum_{k=1}^{L} N_k \sigma_k{}^2 \tag{13}$$

式中：q 为各影响因子对城市韧性与低碳发展两系统耦合协调度的解释力的大小，值域为 $[0,1]$，q 越大，代表该因子的解释力越强；k 为因子的分层；N、N_k 分别为全部和层 k 的样本数量；σ^2、$\sigma_k{}^2$ 分别为全部样本的方差及层 k 的方差；L 为所选取的指标的个数。

交互探测是通过对比单因子与双因子的 q 值，能判断两因子共同作用时对因变量 Y 的解释力变化，具体判断依据如表 6 所示。

表 6　判断依据

判断依据	因子交互作用类型
$q(X_1 \cap X_2) < \min[q(X_1), q(X_2)]$	非线性减弱
$\min[q(X_1), q(X_2)] < q(X_1, X_2) < \max[q(X_1), q(X_2)]$	单因子非线性减弱
$q(X_1 \cap X_2) > \max[q(X_1), q(X_2)]$	双因子增强
$q(X_1 \cap X_2) = q(X_1) + q(X_2)$	独立
$q(X_1 \cap X_2) > q(X_1) + q(X_2)$	非线性增强

3.1　驱动因素指标确立

构建环境-经济-能源系统耦合协调度驱动因素指标过程中，指标的选取需要紧密围绕研究需求，结合河南省发展实际，综合理论基础、系统关联性、数据可行性等多维度考量，最终从金融、经济、政策、治理四大要素维度筛选指标变量（表 7）。

3.2　驱动因素分析

2016—2023 年河南 17 个地级市及济源示范区 3 系统驱动因素数据，取自《河南统计年鉴》《河南环境统计年鉴》及各地国民经济与社会发展统计公报，缺失数据以插值法补齐。

3.2.1　因子探测

先通过 Stata 软件的 K 均值方法，对各年份驱动因素指标数据进行离散化处理，再将处理结果与对应耦合协调度数据导入 Excel 地理探测器模型，得到因子探测结果（表 8）。检验显示，X_1、X_2、X_4、X_5、X_6 的 P 均小于 0.05，通过 95%的显著性水平检验，对耦合协调空间分异具有显著影响；X_3 的 P 接近 1，影响完全不显著可忽略。

作为影响力衡量指标的 q 显示，X_6 与 X_1 解释力最强，是主导因素：治理投入通过升级污染防治技术、改善环境质量反哺经济可持续发展；金融资本则支持新能源产业融资与传统产业节能改造，推动能源结构清洁化与经济环境协同。X_5、X_2、X_4 解释力中等：环境规制通过单位 GDP 能耗约束企业创新与产业低碳转型；经济发展水平与政府科技投入则分别通过人均 GDP 提升、节能减排技术研发，助力能源效率优化与污染物减排。

3.2.2　交互探测

从交互探测结果（表 9）可知，多数因子交互呈现双因子增强或非线性增强特征。双因子增强指交互解释力大于单个因子，非线性增强则指交互解释力超过各因子单独作用之和，其中经济发展（X_2）、金融发展（X_1）、环境规制（X_5）与治理投入（X_6）的交互作用尤为突出，印证河南省 3E 系统耦合优化需依托多因子协同调控。

由此可以看出，环境规制与其他因子的强交互效应，$X_5 \cap X_1$ 的 q 为全矩阵最高，其协同作用通过规制驱动与资本驱动双优化路径，推动高耗能产业转型与清洁能源投资；$X_5 \cap X_2$ 的 q 接近峰值，体现经济发展水平提升与环境规制强化的双向促进，人均 GDP 提升可能倒逼地方政府强化环境规制，同时助力经济向低碳高效转型。X_6 的协同效应明显，$X_6 \cap X_4$ 表明污染治理经费与科技支出结合可加速环保技术落地，$X_6 \cap X_3$ 显示外商直接投资与治理投入联动能引入先进技术，推动产业绿色升级。经济与金融因子交互即 $X_1 \cap X_2$ 凸显两者协同价值，经济发展带动金融集聚，金融资本又助力新兴产业，但需防范资金流向高耗能领域。X_3 的独立解释力与交互效应均较弱，推测与河南外商直接投资集中于传统制造业、未充分联动环保与能源转型相关。

4　结论与建议

4.1　结论

本文遵循指标体系构建原则，搭建河南 3E 系统指标框架，先赋权测定 17 个地级市及济源示范区 2016—2023 年三系统综合发展水平，再借耦合度与耦合协调度模型分析全省及分区域耦合发展水平，随后检验耦合协调度空间相关性，最后通过地理探测器模型探究影响因素及交互作用，主要结论如下。

（1）2016—2023 年河南 3E 系统各子系统及复合系统整体上升但存阶段性波动：环境子系统 2021

表 8　因子探测结果

变量	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
q	0.541	0.268	0.045	0.253	0.315	0.561
P	0.000	0.035	0.998	0.047	0.000	0.000

表 9　交互探测结果

因子	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6
X_1	0.541					
X_2	0.665	0.268				
X_3	0.648	0.570	0.045			
X_4	0.651	0.462	0.321	0.253		
X_5	0.771	0.766	0.498	0.558	0.315	
X_6	0.678	0.647	0.655	0.720	0.670	0.561

表 7　耦合协调度驱动因素指标

变量	一级指标	二级指标	三级指标	代码
被解释变量	耦合协调度	相互关联程度	发展水平协调度	Y
解释变量	金融要素	金融发展水平	金融机构存贷款总额/GDP	X_1
	经济要素	经济发展水平	人均 GDP	X_2
		对外开放水平	外商直接投资占 GDP 比例	X_3
	政策要素	政府支持力度	科学技术支出占财政支出	X_4
	治理要素	环境规制水平	单位 GDP 能耗	X_5
		治理投入水平	污染治理经费	X_6

年达峰后回落再回升,反映环保政策成效与治理效益波动;经济子系统稳步上升,2022 年受外部冲击下降后 2023 年恢复,彰显发展韧性;能源子系统波动中保持高位,2022 年因可再生能源新增及政策调整增长,体现转型成效与传统能源依赖。2021—2023 年复合系统增速放缓,受产业转型瓶颈与外部冲击制约。

(2)河南 3E 系统耦合度长期高位,呈“升-降-缓升”态势;耦合协调度整体为“缓升-加速-波动回落-逐步修复”走势。时间上,2016—2023 年协调水平逐步提升,2023 年高协调区域巩固、低协调区域缩减,但空间差异仍存。空间上,中原城市群核心城市协调度较高,豫北豫西部分传统产业城市较低,黄淮经济区多为中等水平。

(3)河南 3E 系统耦合协调全局集聚不明显、整体差异小,但空间异质性突出。局部空间自相关从 2016 年微弱正向转为 2018—2023 年微弱负向,空间关联由弱聚集转向异质分化,中原城市群与传统产业区域的差距加剧空间冲突,形成“高值孤岛”与“低值聚类”。冷热点分析显示,豫北经济区与中原城市群局部相关性较强,平顶山等为长期低值聚类,洛阳等为高值异常,凸显区域发展不均衡。

(4)河南 3E 系统耦合协调驱动因素因子探测显示,治理投入与金融发展是主要驱动因素,分别通过污染防治技术升级、支持新能源及传统产业改造推动系统协同;环境规制、经济发展、政府支持力度影响中等,对外开放水平影响不显著。交互探测表明,多数因子交互呈非线性增强或双因子增强,环境规制与金融发展、经济发展与环境规制交互作用最强,治理投入与科技支出等交互效应显著,需多因子协同调控,而对外开放水平因外商直接投资集中于传统制造业,与其他因子协同效应有限。

4.2 建议

结合河南各区域发展实际与 3E 系统特征,实施分区管治以破解不均衡问题:中原城市群聚焦数字经济、高端装备制造等低碳产业,加速清洁能源替代;豫北经济区推动重化工业节能改造,降低煤炭依赖,布局新兴能源产业;豫西及豫西南经济区推进资源型城市矿山修复与循环经济,培育生态旅游,优化能源供需匹配;黄淮经济区做强农业的同时,补齐农村环保设施短板,通过节能治污技术提升产业附加值。

优化 3E 系统协同机制,提高整体协调发展的水平。深化政策协同,联动环境规制与绿色金融政策,引导企业发力绿色技术研发与能源效率提升,结合区域行业污染特点,统筹科技与治污经费优化配置。强化污染防治技术研发扶持,定向开发适配河南产业的高效治污技术,降低成本、提升治理实效。建立环境治理信息公开机制,引导公众参与监督,构建政府主导、企业主体、公众参与的多元治理格局,夯实治理持续性根基。

不同地方要互相联动发展,缩小各地发展的差距。基础设施方面,完善跨区域能源输送网络和交通联通,助力产业转移与要素高效流动。生态环保领域,构建跨区域生态保护屏障,统一环保标准、强化联合执法,协同处置跨界污染。经济发展层面,制定产业协同规划,深化区域产业协作与产业链互补,全面强化联动效能。

强化科技创新,给长期稳定发展打牢根基。围绕节能减排、清洁能源、污染防治等关键领域,组织实施重大科技专项,突破新核心技术。完善科技成果转化激励机制,加速科技成果产业化进程。推动大数据、人工智能等技术在 3E 系统管理中的应用,建立 3E 系统的良性循环,提升决策的精准性。

加强对外合作交流,给绿色发展创造更多机会。引导外资投向新能源、节能环保等绿色产业。加大对域外管理经验和先进技术的引进力度,通过项目落地促进先进理念与创新方法的本土化转化。同时积极参与区域绿色发展协作,在国内参与国家黄河流域生态保护和高质量发展战略,和其他地区一起搞绿色产业合作。

参考文献

[1] 张哲菲,李国平. 经济-能源-环境系统耦合的动态演化规律与空间溢出效应研究[J]. 经济问题探索,2025(3):49-67.

[2] 陈丹临. 开放经济环境下长三角地区能源-环境-经济系统协调度评价[J]. 现代经济探讨,2020(12):74-79.

[3] 张垚,丁玉贤,丁超. 呼和浩特资源-环境-经济承载和协调发展研究[J]. 环境科学与技术,2021,44(2):221-228.

[4] YAO W, WANG X. A Dynamic simulation andevaluation of the coupling coordination degree of the marine economy-resource-environment system in China[J]. Water, 2024, 16(18): 2686.

[5] 张力隽,王余枫,夏永波,等. 黄河流域资源-环境-经济耦合协调发展研究[J]. 人民黄河,2022,44(3):11-15.

[6] 陆秋雨. 河南省能源、环境与经济 3E 系统耦合协调时空演变特征研究[D]. 郑州:河南财经政法大学,2022.

[7] 殷楠楠. 黄河流域可持续发展水平耦合协调度及影响因素[J]. 科技和产业,2024,24(23):64-67.

[8] 张宗义. “双碳”背景下山东省黄河流域经济高质量与生

态保护协同发展研究[J]. 科技和产业，2025，25(3)：99-105.
[9] 黄竣璇，林昕. 中国省域数字-能源-经济-环境耦合协调的时空特征[J]. 科技和产业，2024，24(16)：93-102.
[10] 张方程，张锦宗，衣依，等. 中部地区人口-经济-资源环境系统耦合协调发展与障碍度分析[J]. 科技和产业，2025，25(4)：249-254.
[11] 王晓玲，郭琛璇，郭亚宁，等. 山西省经济-能源-环境耦合协调发展分析[J]. 山西大同大学学报(自然科学版)，2024，40(6)：41-47.
[12] 陈柔昀，王珊，王智苑，等. 关于能源-经济-环境耦合协调发展评价——以近15年的福建省为例[J]. 环渤海经济瞭望，2022(4)：61-64.
[13] 李治国，李兆哲，高玮浓. 黄河流域城市群能源-经济-环境-科技耦合协调水平评价[J]. 统计与决策，2023，39(18)：88-91.

Research on the Synergistic Governance of Environment-Economy-Energy in Henan Province under the Goal of Carbon Neutrality

ZHANG Ziyuan, YE Yunfei
(School of Business Administration, Henan Polytechnic University, Jiaozuo 454000, China)

Abstract: With the advancement of industrial restructuring and green transformation policies, clean energy utilization and pollution control in Henan Province have achieved remarkable results. However, there are still challenges in the transformation of energy structure, and the task of coordinated development of environment and economy is arduous. Exploring Henan environment-economy-energy (3E) system is the core coupling system to measure the level of regional sustainable development, and its collaborative optimization is of great significance to achieve the goal of "double carbon". Focusing on the comprehensive development level and coupling coordination characteristics of the system from 2016 to 2023, through the index system construction, entropy weight method weighting, and Moran's index model, its spatial correlation and spillover effects was explored, and then the influencing factors and interactions with the geographical detector model were analyzed. The results show that the subsystems and composite systems of Henan 3E system are on the rise as a whole from 2016 to 2023, and only fluctuate in 2022 due to external shocks. The coupling degree of the system is high for a long time, and the coupling coordination degree shows a trend of periodic rise and then repair. The global agglomeration in space is not obvious, and the correlation between the North Henan Economic Zone and the Central Plains Urban Agglomeration is strong, showing the heterogeneous differentiation characteristics of "high value island-low value surround". The core driving factors are governance investment and financial development level, and the interaction between environmental regulation and financial development is the most significant.

Keywords: Henan Province; environment-economy-energy system; synergistic governance; coupling coordination degree; geodetector model