

黄河流域资源型城市水—能—碳系统效率时空格局及影响因素研究

王韵¹, 王文彬¹, 伊宁², 张林静³

(1. 华北水利水电大学 管理与经济学院,河南 郑州 450046;2. 石河子大学 经济与管理学院,新疆 石河子 832003;3. 华北水利水电大学 测绘与地理信息学院,河南 郑州 450046)

摘 要:【目的】在黄河流域水资源刚性约束的背景下,揭示水—能—碳系统的协同优化,为推动黄河流域资源型城市的绿色低碳转型与可持续发展提供参考。【方法】采用网络 DEA 模型测算 2010—2023 年黄河流域资源型城市水—能—碳(WEC)系统及各子系统的效率,基于修正后的引力模型构建黄河流域资源型城市 WEC 系统效率关联网络矩阵,使用 QAP 回归分析探究效率差异形成原因。【结果】①流域各城市 WEC 系统效率均值整体呈“M”型变动趋势,且下游与上游效率接近并均显著高于中游;②WEC 系统以及 3 个子系统的网络连通性良好,网络密度均在波动中增长,其中能源系统效率持续提升并超越碳系统及水系统;③WEC 系统效率受经济、地理和科技维度因素的影响较大,且地理相邻或资源禀赋相似的城市间的关联强度明显高于其他城市。【结论】黄河流域资源型城市的 WEC 系统效率存在显著的流域差异与系统间不平衡,应依据上、中、下游的区位特点与发展阶段因地制宜施策,以推动流域内资源型城市高质量发展。

关键词:水—能—碳系统;黄河流域资源型城市;网络 DEA;社会网络分析;QAP 回归

中图分类号:X322;F426.2

文献标识码:A

党的二十届四中全会审议通过的“十五五”规划建议,强调要加快经济社会发展全面绿色转型,协同推进降碳、减污、扩绿、增长,提高水资源集约安全利用水平、持续推进黄河流域生态保护和高质量发展^[1]。这为系统破解黄河流域资源型城市的水资源、能源和碳排放之间的关系研究提供了根本遵循。黄河流域作为我国重要的生态屏障和能源基地,其资源型城市正面临水、能源消耗与碳排放之间的多重压力^[2]。流域内水资源开发强度大,资源型城市经济增长对能源资源的路径依赖明显,由此引发的水资源短缺、能源利用效率不高与碳排放增长等问题相互交织,严重制约了区域的可持续发展与生态安全^[3]。推动水资源、能源和碳排放系统的协同优化,已成为黄河流域实现绿色低碳转型的迫切课题。

水资源、能源和碳排放三者之间密不可分,能源生产环节在消耗水资源的同时,会产生碳与废水排放;水的开发利用需投入大量能源,此过程必然伴随碳排放;而过量碳排放引发的气候异常与环境效应,又会反

向制约水资源的供需平衡与质量安全,并影响可再生能源的开发潜力与利用效率^[4]。因此,水、能和碳三者形成了彼此影响、相互制约的纽带关系(Water-Energy-Carbon Nexus,以下简称为 WEC 系统)^[5]。学术界已围绕水能耦合^[6]、碳水关联^[7]、水—土—能耦合^[8]、食物—水—能纽带关系^[9]等多元系统展开探讨,从不同的关联视角探讨区域多要素空间耦合格局与互馈关系,寻求资源环境制约中的关键因素及破解路径^[10]。其中,水—能—碳系统的矛盾协调与协同调控成为研究焦点。一方面,现有研究多聚焦于讨论资源环境要素的耦合机制^[11]与空间特征识别^[12],致力于揭示区域发展中的关键制约因素;另一方面,针对黄河流域资源型城市,探讨其生态—生产—生活系统的交互影响,指出人口规模^[13]、经济增长^[14]与产业结构^[15]等因素对可持续发展具有显著作用,并呈现明显的空间异质性。综上所述,现有研究对水—能—碳三元系统效率及其空间关联的整体性探讨较为缺乏,尤其在流域尺度下对资源型城市水—能—碳系统效率的时空

收稿日期/Received:2025-09-28

修回日期/Revised:2025-11-12

基金项目:国家社会科学基金一般项目(23BJY062);河南省软科学研究计划项目(252400411224);2023 年度河南省高等学校青年骨干教师培养计划(2023GGJS079);河南省自然科学基金(232300420443)。

第一作者:王韵(1990—),女,讲师,博士研究生,从事资源经济、技术经济方面的研究。E-mail:wangyun@ncwu.edu.cn。

通信作者:王文彬(1983—),男,副教授,博士,从事资源经济、技术经济方面的研究。E-mail:weby191@126.com。

演变与驱动机制分析不足,并不能真正反映 WEC 各子系统相互交织、相互作用的内在特征,尚未形成能够反映水资源、能源和碳排放复合关系的系统。

鉴于此,本文以黄河流域资源型城市为研究对象,构建 WEC 系统,运用网络 DEA 模型测算其整体系统及子系统效率,基于修正引力模型构建效率空间关联网络,并借助 QAP 方法分析效率差异的成因,以系统揭示其时空格局与影响机制,为促进黄河流域生态保护和高质量发展提供决策参考。

1 研究方法

1.1 网络 DEA 模型

水—能—碳系统内关系复杂、互相影响、彼此制约,因此,在投入指标和产出指标间添加连接指标,将 3 个子系统进行关联。其中,水系统在水资源开发、处理、使用过程中需要能源消耗,并伴随二氧化碳排放,因此将水资源生产过程中的能源消费作为连接指标;能源系统中的开发和利用会伴随水资源消耗和二氧化碳产生,故将能源生产过程中的水资源消耗量作为连接指标;碳系统中二氧化碳的产生主要源于用水和耗能,故对应两个连接变量。整体系统中,一方面,水系统与能源系统双向关联,互为输入与输出关系;另一方面,水系统和能源系统分别与碳系统形成单向因果关系^[16]。针对 WEC 系统的构成和特点,构建基于网络 DEA 的 WEC 系统效率评价框架,具体见图 1。

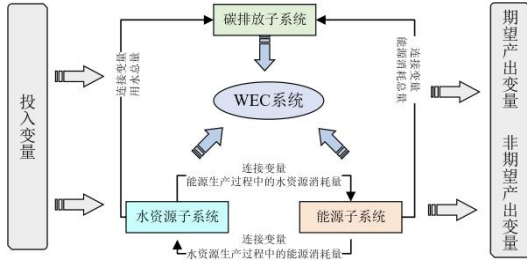


图 1 基于网络 DEA 的 WEC 系统效率评价框架

Fig. 1 Framework for evaluating the efficiency of WEC systems based on network DEA

网络 DEA 模型作为传统 DEA 模型的补充,解决了传统 DEA 模型中变量之间的“黑箱”操作。该方法充分考虑了生产过程研究对象的网络结构,同时也揭示了各子系统的效率及内部关联^[17-18],WEC 系统的网络 DEA 模型如下:

$$\min \theta = \delta^l \theta^l$$

$$s.t. \begin{cases} \sum_{j=1}^n x_j^l \lambda_j^l \leq \theta^l x_j^l, l=1,2,3 \\ \sum_{j=1}^n y_j^l \lambda_j^l \leq y_j^l, l=1,2,3 \\ \sum_{j=1}^n z_j^{(k,l)} y_j^l \leq \theta^l z_0^{(k,l)}, l=1,2,3; k=1,2,3 \\ \sum_{j=1}^n z_j^{(k,l)} y_j^l \geq z_0^{(k,l)}, l=1,2,3; k=1,2,3 \\ \lambda_j^l \geq 0, l=1,2,\dots,n \\ \sum_{l=1}^3 \delta^l = 1 \end{cases} \quad (1)$$

式中: l 代表相应子系统的效率,1、2 和 3 分别对应水、能源和碳系统; δ^l 为相应子系统在总系统中的权重,权重均为 1/3; x_j^l 和 y_j^l 分别对应第 j 个决策单元的投入指标和产出指标; $z_0^{(k,l)}$ 表示网络系统中 l 系统中有关 k 系统的连接指标; λ_j^l 表示相应系统中第 j 个决策单元所占权重。

1.2 社会网络分析

为探究 WEC 系统效率在空间上的演变规律,对引力矩阵进行修改,得到关于黄河流域资源型城市 WEC 系统和各子系统的空间关联网络,模型如下:

$$R_{ij}^l = \left(\frac{\theta_i^l}{\theta_i^l + \theta_j^l} \right) \frac{\sqrt[3]{G_i \theta_i^l P_i} \cdot \sqrt[3]{G_j \theta_j^l P_j}}{\left(D_{ij} / G_{per} - G_{per} \right)^2} \quad (2)$$

式中: R_{ij}^l 表示城市 i 与城市 j 在系统 l 中的关联强度,且 $i \neq j$ (取值范围均为 1~38), $j=0,1,2,3$, 其中 0~3 依次代表 WEC 整体、水、能源和碳系统; θ 代表效率; G 、 P 和 G_{per} 分别代表 GDP 规模、人口数量和人均 GDP; D_{ij} 代表两个城市间的球面距离。基于以上模型测算得到 2010—2023 年的矩阵 R_{ij}^l 和 $\bar{R}_i^l$, 其中 $\bar{R}_i^l$ 表示对应时期下 4 个系统里每一城市与其他城市关联强度的均值,统称为阈值矩阵 $\bar{R}_i^l$, 并通过比较 R_{ij}^l 与阈值矩阵的大小,判断城市间的关联强度。

基于 WEC 系统和各子系统的空间关联网络,利用 Ucinet 软件测算各系统每一年的网络关联度、网络效率、网络密度、外向中心度、内向中心度、中介中心度和接近中心度,以此研究黄河流域资源型城市 WEC 系统效率在时空上的变化趋势。其中,网络关联度用于判断网络中各城市是否存在直接关联,若关联度为 1,则表明系统网络中没有孤立节点,信息与资源等可在整个系统内传递;网络效率用于衡量网络中各城市间最短路径的平均效率,效率值越高,城市间冗余连接越少,资源流动越通畅;网络密度用于量化各城市间的关联程度,密度越高,各城市互动越频繁,系统协同效应越强;外向中心度用于衡量某一城市对其他城市的辐射能力,反映其在资源输出与扩散上的主动性;内向中心度用于评估某一城市吸收其他城市资源的能力,

反映其在资源流通中的受益程度;中介中心度用于测算某一城市在其他城市间合作的参与程度,即充当系统网络的“中介桥梁”;接近中心度用于衡量某一城市到其他城市的平均最短路径,反映该城市获取资源的便捷程度。

1.3 回归分析

QAP 回归是一种适用于社会网络数据分析的方法,通过对网络矩阵数据进行随机置换和重抽样,检验变量之间的关系^[19]。为避免传统回归在数据处理过程中出现信息损失,并进一步探索 WEC 系统中各资源型城市在关联特征与效率差异上的因果关系,将 QAP 回归应用于 WEC 系统中,通过对经济发展、科技投入等因素的量化解析,考虑相关因素对该复合系统的多维影响,从而精准施策,优化系统效率。

2 数据来源与指标体系构建

2.1 数据来源

根据国务院颁布的《全国资源型城市可持续发展规划(2013—2020 年)》,考虑数据的完整性与可得性,

结合杨帆^[20]、陈美景^[21]等学者的研究,最终选取大同、阳泉、长治、晋城等 38 个黄河流域资源型城市作为研究对象,时间范围为 2010—2023 年。相关指标数据来源于《中国城市统计年鉴》《中国城市建设统计年鉴》《中国人口和就业统计年鉴》《中国固定资产投资统计年鉴》《中国能源统计年鉴》以及双碳数据库等公开资料。部分缺失数据采用插值法进行完善。

2.2 指标体系构建

测算效率时,在水、能源和碳 3 个子系统中分别设立投入指标、连接指标、期望产出和非期望产出,共同构成 WEC 整体系统。其中,水资源生产过程中的能源消费作为水系统连接能源系统的指标,数据来自城市生产和生活中普遍存在的天然气和石油气等供气量、供热量和用电量;能源生产过程中的水资源消耗量作为能源系统中连接水系统的指标,数据主要包括城市人工煤气、天然气、石油气和电量消耗过程中需要的水资源;污染指数通过熵权法测算;物质资本存量通过永续盘存法计算;碳排放总量测量参考 IPCC 计算准则。具体评价指标见表 1。

表 1 WEC 系统网络效率评价指标体系

Tab.1 Evaluation index system for network efficiency of the WEC system

子系统	指标类型	指标解释
水资源子系统	投入指标	水的生产及水利管理投资/万元
		用水(生产、生活、生态)总量/亿 m ³
	连接指标	水的生产及水利管理从业人数/万人
		水资源生产过程中的能源消费/万 tce
		国内生产总值/万元
能源子系统	投入指标	期望产出
		国内生产总值/万元
	连接指标	非期望产出
		废水排放总量/万立方米
		能源工业投资/万元
碳排放子系统	投入指标	能源消费总量/万吨标准煤
		采矿业、电力及燃气生产和供应从业人数/万人
	连接指标	能源生产过程中的水资源消耗量/万 m ³
		国内生产总值/万元
		污染指数
	投入指标	户籍人口/万人
		物质资本存量/万元
	连接指标	用水(生产、生活、生态)总量/亿 m ³
		能源消费总量/万吨标准煤
		国内生产总值/万元
	非期望产出	碳排放总量/亿 t

3 WEC 系统效率的时空演变及网络

特征分析

3.1 时空演变特征

经 Maxdea 软件测算得到 WEC 系统的整体效率以及 3 个子系统的效率。通过二次整理,分别从整体系统和子系统两个维度对黄河流域资源型城市的水—能—碳效率进行时空分析。

3.1.1 整体系统分析

从整体角度出发,黄河流域资源型城市 WEC 系统效率易受政策规划影响。2010—2023 年,黄河流域资源型城市的 WEC 系统整体效率呈“M”型变动,并于 2010 年、2015 年和 2020 年向好发展。这 3 个时间恰处于我国五年规划的关键转折点,2010 年作为“十一五”收官阶段,2015 年作为“十二五”转折深化期,2020 年作为“十三五”和“十四五”过渡期,整体系统效率均呈稳步提升状态,WEC 系统效率的流域变化趋势见图 2。

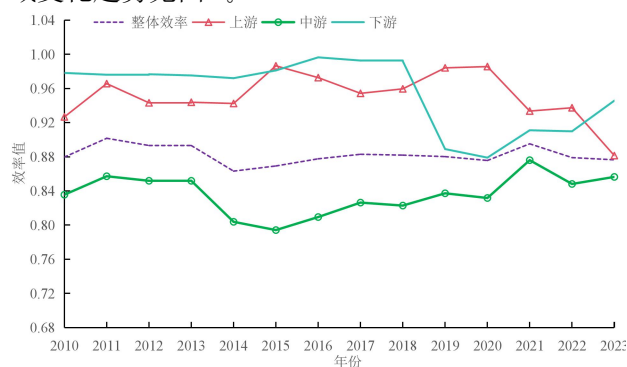


图2 WEC系统效率流域变化趋势

Fig. 2 The trend of WEC system efficiency across different river basins

本研究依据《黄河年鉴》各城市在地理位置上的邻近性以及区域发展定位等特征,将黄河流域按照城市划分为上游(包头、乌海、鄂尔多斯、金昌、白银、武威、张掖、平凉、庆阳)、中游(大同、阳泉、长治、晋城、朔州、晋中、运城、忻州、临汾、吕梁、洛阳、平顶山、鹤壁、焦作、濮阳、三门峡、南阳、铜川、宝鸡、咸阳、渭南、延安、榆林)和下游(淄博、枣庄、东营、济宁、泰安、临沂)三个区域段,并对其展开实证研究。基于流域角度,下游的WEC系统效率明显高于上游,中游效率相对较低。其中,黄河流域上游和中游的整体效率呈“M”型变动,下游呈“N”型变动。对于上游而言,在“十二五”和“十三五”期间,整体系统效率分别在2015年(0.986 5)和2020年(0.985 7)最高;“十四五”期间,整体系统效率出现下降。对于中游而言,“十二五”期间整体系统效率在波动中下降;“十三五”和“十四五”期间,系统效率稳步上升,并于2021年出现峰值(0.876 1),但整体效率相较其他流域仍是最低。对于下游而言,“十二五”和“十三五”期间,整体系统效率稳定维持在较高水平,但2019年出现骤降;进入“十四五”时期,整体系统效率回升且稳定增长。

3.1.2 各子系统分析

从个体角度分析,水和能源两个子系统的效率呈上升趋势,碳系统效率普遍高于水系统,WEC系统效率时间变化趋势见图3。2020年之后水系统效率上升趋势明显;能源系统效率亦呈上升趋势,且2019年以后其效率明显高于水系统和碳系统。碳系统效率在“十二五”和“十三五”期间呈倒“U”型,2020年以后效率逐渐恢复并呈上升趋势,且在此期间碳系统效率普遍高于水系统效率。由此可见,随着五年规划的深入开展,黄河流域资源型城市在水和能源的消耗利用方面开始稳定向好,但碳系统的优化仍面临挑战。



图3 WEC系统效率时间变化趋势

Fig. 3 The trend of WEC system efficiency over time

3.2 网络特征

根据改良后的引力矩阵,利用 Ucinet 软件分别计算整体以及 3 个子系统的网络密度及网络效率,以求深入探索该复杂系统在空间上的关联特征和协同演化规律。经逐步测算,整体和水—能—碳 3 个子系统在研究期间的关联度均为 1,且各网络中并无孤立节点,可见黄河流域各资源型城市之间均能进行良好的信息传递。

3.2.1 整体特征

在网络效率方面,发现整体和 3 个子系统的变动趋同,说明水、能源和碳排放等要素流动的优化程度相对稳定。

进一步整理网络密度后发现,黄河流域资源型城市关于水—能—碳整体系统以及 3 个子系统的网络密度发展趋势相似,见图 4。在“十二五”期间,水和碳两个系统以及整体系统的密度值呈“M”型变动,能源系统呈“N”型变动,且水系统密度值普遍高于其他三个系统,可见黄河流域各资源型城市间在水资源管理协作方面的紧密程度,亦符合资源型城市依黄河发展的现实情况。一方面,源于资源型城市依托黄河干支流发展的空间地理属性,使得水资源调度、跨区域补水等刚性需求形成紧密的合作网络;另一方面,“十二五”期间,《黄河流域水资源综合规划》等政策的

落地,进一步强化了流域内城市在水资源统筹配置中的联动性,也印证了资源型城市“依水布局、因水协同”的发展现实。在“十三五”期间,4个系统的密度值均在0.17~0.21区间波动,2016—2018年和2019—2020年出现明显上升状态,本质上是因为“十二五”期间协作机制的深化与“十三五”期间流域治理政策的衔接。2016年,《黄河流域生态保护和建设规划》明确将水—能—碳协同纳入流域治理框架,使城市间协作从水资源单一领域向能源节约、碳排放协同管控拓展,推动四类系统密度同步提升;2019—2020年的第二轮上升,则与“十三五”收官阶段地方政府为完成能耗双控、碳排放强度降低等约束性指标,强化跨区域产业协作密切相关。2020年开始,4个系统的密度值均出现下降趋势,尤其在2020—2021年的下降趋势十分明显。从驱动机制看,黄河流域资源型城市WEC系统网络密度下降是多重因素叠加的结果:其一,经济下行压力增大,部分城市暂缓跨区域协同,削弱了系统连接;其二,“十四五”初期产业结构调整进入关键期,传统高耗能产业退出与新兴产业培育存在“空窗期”,导致原有协作网络断裂;其三,资源禀赋差异加剧利益分化,上中游能源型城市(如榆林市、鄂尔多斯市)与中下游加工制造型城市(如郑州市、济南市)在能耗指标分配、碳排放责任界定上分歧扩大,弱化了区域间的协作意愿。若这种下降趋势持续,甚至会削弱黄河流域资源型城市在资源统筹管理和协同发展方面的优势。

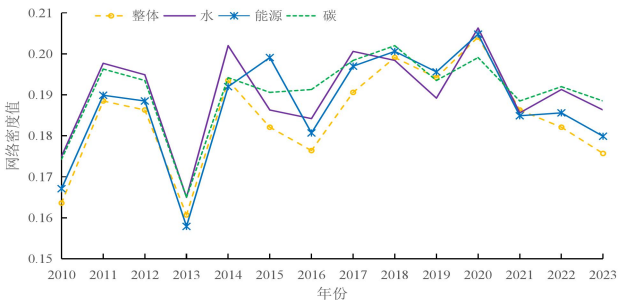


图4 WEC系统空间关联网络密度变化特征

Fig.4 The density variation characteristics of the spatial association network in the WEC system

绘制关于2010年、2015年和2020年的空间关联网络图(图5)。研究发现,各城市的网络中心度和关联度之间相互促进、彼此影响,使得地理相邻或资源禀赋相似的城市间的关联强度明显高于其他城市。一方面,黄河流域资源型城市中鄂尔多斯、东营等城市长期处于网络核心地位,且各城市的网络中心度均在逐步增加;另一方面,各城市间的关联强度开始趋向均匀分布,各城市的比重逐渐增加。从城市个体出发,鄂尔多斯和东营的网络中心度长期处于较高地位,后期榆林、运城和三门峡等城市的网络中心地位愈发明显;从城市关联度出发,2010年鄂尔多斯与榆林、东营与淄博、鄂尔多斯与包头的关联强度相较最大,2015年东营与淄博、鄂尔多斯与三门峡、鄂尔多斯与榆林、鄂尔多斯与包头的关联强度相较最大,2020年运城与三门峡、鄂尔多斯与榆林、东营与淄博、鄂尔多斯与包头的关联强度相较最大。由此印证了各城市的网络中心度与关联度之间存在相互促进、彼此影响的关系,导致地域上相邻的城市和资源类型相似的城市之间关联强度明显高于其他城市间的关联强度,榆林、运城和三门峡等城市的崛起就是网络中心度与关联度之间相互影响的最好说明。

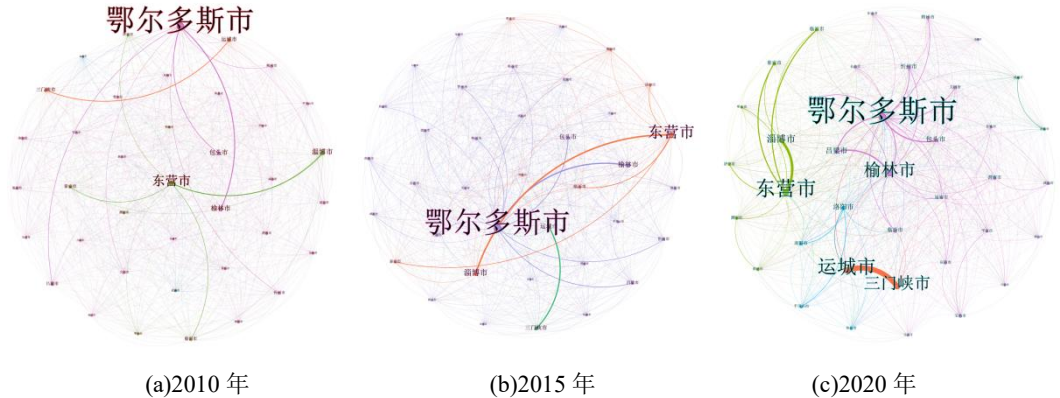


图5 WEC系统效率空间关联网络

Fig.5 WEC system efficiency space correlation network

3.2.2 个体特征

黄河流域资源型城市的水—能—碳整体系统在空间上呈现多中心和层级化并重的格局,其中以鄂尔多斯为核心城市,东营、榆林为次级枢纽;同时,区域间功能分化明显,上游和中游以能源为主的城市主导资源流动,下游城市更侧重资源流通控制。基于中心度进行分析,外向中心度方面,乌海、鄂尔多斯和渭南等城市对外输出资源的影响力较强;内向中心度方面,鄂尔多斯、东营、榆林等城市受外部资源的影响程度较大;接近中心度方面,鄂尔多斯、东营和榆林在整体系统网络中处于较为核心的位置,信息传播效率越高;中介中心度方面,鄂尔多斯、东营和延安等城市在整体系统网络中具有较强的信息控制和资源流动能力。基

于城市层面进行分析,鄂尔多斯的4个中心度排名均居前列,可见其作为黄河流域资源型城市网络核心枢纽的重要地位,结合空间关联网络图亦能发现其对系统中其他城市的强辐射作用;乌海作为外向中心度排名第1位的城市,但中介中心度排名仅在第6位,这可能与其经济发展大多依赖资源型产业,且产业结构相对单一,资源输出集中但缺乏跨区域流通有关;榆林市的内向中心度和接近中心度均排第3,中介中心度排名亦靠前,但外向中心度排名靠后,说明其在资源接收、地理区位和资源流通方面具有较大优势;东营、淄博等位于下游地区的城市,中介中心度普遍较高,可见东部地区作为资源流通枢纽,所属城市在资源调配方面具有先天优势。

表2 WEC系统关联网络个体特征

Tab.2 Individual characteristics of the WEC system's associated network

城市	外向中心度		内向中心度		接近中心度		中介中心度	
	中心度	排名	中心度	排名	中心度	排名	中心度	排名
大同市	5.29	32	3.93	20	0.51	11	8.38	28
阳泉市	6.57	19	1.14	35	0.28	36	0.43	37
长治市	7.71	13	2.57	30	0.28	34	8.27	29
晋城市	8.71	6	4.14	18	0.32	33	17.13	24
朔州市	5.57	29	3.79	22	0.51	12	2.49	35
晋中市	6.07	23	4.43	17	0.52	10	19.40	20
运城市	5.36	31	8.57	6	0.50	13	34.16	15
忻州市	6.50	21	5.79	11	0.53	8	34.01	17
临汾市	8.64	7	7.71	8	0.54	6	109.23	7
吕梁市	3.93	37	4.79	14	0.52	9	6.10	32
包头市	6.00	24	24.79	4	0.76	4	69.46	9
乌海市	11.57	1	4.64	15	0.49	14	118.16	6
鄂尔多斯市	9.43	2	35.07	1	0.95	1	310.94	1
淄博市	4.43	35	13.57	5	0.57	5	17.30	23
枣庄市	5.50	30	2.21	32	0.45	20	6.27	31
东营市	6.00	24	28.14	2	0.80	2	181.61	2
济宁市	5.93	26	3.71	23	0.46	18	14.19	25
泰安市	4.00	36	3.50	25	0.46	19	8.66	27
临沂市	5.00	34	3.93	20	0.46	16	10.04	26
洛阳市	8.86	5	8.21	7	0.45	21	79.19	8
平顶山市	7.93	11	2.71	29	0.34	30	4.90	33
鹤壁市	6.57	19	0.43	38	0.11	38	0.21	38
焦作市	9.00	4	5.71	12	0.39	27	44.19	13
濮阳市	8.00	10	3.71	23	0.47	15	45.01	12
三门峡市	3.64	38	5.21	13	0.40	25	18.18	22
南阳市	8.14	9	4.57	16	0.39	28	19.24	21
铜川市	7.79	12	0.79	37	0.24	37	1.62	36
宝鸡市	7.50	14	3.50	25	0.32	32	34.04	16
咸阳市	7.29	16	3.29	28	0.34	29	29.01	18

渭南市	9.43	2	7.50	9	0.46	17	124.52	5
延安市	8.43	8	7.07	10	0.54	7	163.98	3
榆林市	7.21	17	26.14	3	0.77	3	124.88	4
金昌市	5.14	33	2.29	31	0.42	22	21.09	19
白银市	6.36	22	1.57	34	0.39	26	8.22	30
武威市	5.71	28	2.00	33	0.41	23	38.36	14
张掖市	5.86	27	0.93	36	0.28	35	2.77	34
庆阳市	7.00	18	4.00	19	0.33	31	63.22	10
平凉市	7.36	15	3.36	27	0.41	24	52.43	11

4 WEC 系统效率的影响因素分析

为进一步揭示影响水—能—碳整体系统效率的因素,参考相关文献从中心度(接近中心度、内向中心度、外向中心度和中介中心度)、经济、产业、科技、城市发展和地理区位维度选取相关指标的差值,构建 QAP 模型进行回归^[22]。其中,经济类指标为人均 GDP;产业类指标为第二产业产值与总产值的比重;科技类指标为城市科技投入支出;城市发展类指标为常住人口城镇化率;地理类指标为各城市之间的地理邻接关系,相邻取 1,反之取 0。因 Ucinet 软件对矩阵的要求,故以上变量通过差值测算最终以矩阵形式呈现。

4.1 分时段回归

利用 Ucinet 软件进行回归分析,对水—能—碳系统整体效率进行 2 000 次的随机置换。从时间维度,主要以五年规划为结点,选取 2010 年、2015 年、2020 年和 2023 年这 4 年的回归结果,具体见表 3(Intercept 为截距项系数,主要反映数据预处理的标准化,故将不呈现于表格中)。

首先, R^2 的结果呈稳步提升状态,表明该模型的解释能力逐渐增强。其次,经济和地理维度的因素对系统效率的影响始终正向显著,表明经济和地理区位因素是影响系统效率的关键指标;科技和人口对整体系统效率的影响具有不稳定性,尤其人口出现由正到负的转变,这与前期人口红利促进水—能—碳高效利用,后期人口压力反而阻碍资源的合理配置有关。最后,接近中心度对系统效率的负向影响长期显著,表明资源型城市过度依赖技术、资金和政策等外部要素反而抑制了自身的整体效率;中介中心度早期显著为负,后期影响虽不显著但趋势缓和。

表 3 分时段 WEC 系统效率 QAP 回归分析

Tab.3 Periodic-time WEC system efficiency QAP regression analysis

项目	2010 年	2015 年	2020 年	2023 年
接近中心度	-0.170***	-0.187***	-0.111***	-0.091***
内向中心度	0.329***	0.339***	0.036	0.143**
外向中心度	-0.005	0.004	-0.043**	-0.012

中介中心度	-0.091***	-0.023	0.054	0.006
经济	0.365***	0.309***	0.500***	0.466***
产业	0.072***	0.054***	0.009	-0.010
科技	0.004	0.016	-0.009	0.031
人口	0.029	0.073***	-0.013	-0.046*
地理临近性	0.230***	0.327***	0.367***	0.331***
Adj R^2	0.332	0.355	0.350	0.358

注:***、**、*分别表示在 1%、5%和 10%的水平上显著,下同。

4.2 分系统回归

为进一步揭示黄河流域资源型城市在水—能—碳系统上的影响因素,将研究视角聚焦到水、能源和碳 3 个子系统,考虑五年规划的长期性,以十年为期限进行 QAP 检验,具体结果见表 4。

从中心度看,接近中心度对 3 个子系统的负向影响长期显著,但影响系数明显下降。可见,各资源型城市间要素流通的便捷性目前还不能有效地转化为系统效率,且各资源型城市仍存在对外部资源过度依赖的问题。内向中心度在 2010 年对 3 个子系统的影响正向显著,2020 年显著性消失,碳系统甚至出现负向驱动,可见高碳产业转移受限后,资源型城市吸纳外部要素的能力显著弱化。中介中心度的影响前期显著为负,后期出现转折,尤其能源子系统出现从抑制到促进的显著变化。一方面,各资源型城市在能源系统中的效率得到改善;另一方面,各城市的“中介桥梁”角色定位已发生转变,开始由最初的不合理配置转向了资源跨区域协调。

从经济角度出发,其对 3 个子系统的正向影响长期显著,且影响程度逐年增加,其中对碳系统的影响强度跃升 65.8%,表明经济与各系统之间关联密切,侧面也反映出 GDP 增长严重依赖资源消耗。从地理临近性角度分析,其对各子系统的影响持续增强,且长期保持稳定正向的驱动作用。从产业角度出发,2010 年 3 个子系统具有正向显著的影响,可见早期产业发展过程中对水、能源和碳的高度依赖。从科技角度出发,近年来其对能源和碳系统出现显著负向影响,这与技术的发展进步加大了对能源的开采和碳排放的强度有关,导致能源和碳的利用效率低下。从人口角度出发,其

对能源系统的显著影响出现由正到负的变化,这是因为持续的人口增长,加之高碳生活方式的趋同,以及老龄化带来的结构性挑战,使得人口因素从过去的发展动力转变为对能源节约和碳减排目标的巨大压力。

表 4 分系统的 WEC 系统效率 QAP 回归分析

Tab.4 Regression analysis of WEC system efficiency for the subsystems						
项目	2010 年			2020 年		
	水	能源	碳排放	水	能源	碳排放
接近中心度	-0.220***	-0.198***	-0.206***	-0.105**	-0.158***	-0.101***
内向中心度	0.373***	0.348***	0.378***	0.078	0.053	-0.030
外向中心度	0.004	-0.017	0.008	-0.040*	-0.042*	-0.026
中介中心度	-0.094***	-0.069**	-0.082***	0.015	0.085**	0.048
经济	0.365***	0.345***	0.333***	0.488***	0.522***	0.552***
产业	0.063***	0.073***	0.073***	0.016	0.020	0.002
科技	-0.018	0.003	0.011	-0.034	-0.041**	-0.065**
人口	0.262	0.049**	0.065**	-0.023	-0.061**	-0.043
地理临近性	0.304***	0.311***	0.322***	0.370***	0.370***	0.369***
Adj R ²	0.317	0.326	0.333	0.353	0.358	0.345

4.3 稳健性检验

为检验回归的稳健性,从替换变量和更改转换次数两个角度展开验证。一方面,在经济维度,用固定资产投资差值进行替换;在人口维度,用人口密度差值进行替换;再考虑同时替换两个维度指标的情况。另一方面,在 2 000 次转换次数的基础上,分别进行减少 50%和增加 50%的处理,具体结果见表 5。与表 3 的基

准回归结果进行对比,结果更显著,且经济指标作为其中的关键,无论是仅替换经济指标还是同时替换经济和人口指标,其稳健性的结果都优于基准回归结果;外向中心度、内向中心度和产业这 3 个维度的影响效果都由不显著转变为显著。综上,验证了回归结果的稳健性。

表 5 稳健性检验

Tab.5 Robustness test					
项目	替换经济 指标	替换人口 指标	替换经 济和人 口指标	减少 50%转 换次数	增加 50%转 换次数
接近中心度	-0.081***	-0.091***	-0.081***	-0.091***	-0.091***
内向中心度	0.434***	0.143**	0.434***	0.143**	0.143**
外向中心度	-0.051**	-0.012	-0.051**	-0.012	-0.012
中介中心度	0.097**	0.006	0.097**	0.006***	0.006***
经济	0.040*	0.466***	0.040*	0.467***	0.466***
产业	0.056**	0.010	0.056**	-0.010	-0.010
科技	0.022	0.031	0.022	0.031	0.031
人口	0.064***	-0.046*	0.064***	-0.046*	-0.046*
地理临近性	0.332***	0.331***	0.332***	0.331***	0.331***
Adj R ²	0.317	0.354	0.317	0.354	0.354

5 结论与建议

5.1 结论

本文测算 WEC 系统效率后,基于修正后的引力模型得到 4 个系统 2010—2023 年的矩阵和阈值矩阵,整合其中的网络关联度、网络密度、网络效率、外向中心度、内向中心度、接近中心度和中介中心度,采用 QAP 回归分析探讨影响各系统效率差异的因

素,得到以下研究结论:

第一,从系统效率维度看,研究期间各系统效率的变动与政策规划存在一定关联。WEC 系统效率整体呈“M”型趋势,且下游效率显著高于上游和中游效率,其中中游效率最低;水系统与能源系统效率大体上升,其中能源系统在“十四五”期间提升最快;碳系统效率在“十二五”和“十三五”期间呈倒“U”型趋势,后期逐步回升,且研究期内其效率普遍高于水系统。

第二,从网络特征与空间关联维度看,黄河流域资源型城市 WEC 系统的网络结构与城市中心度呈协同演进、正向反馈的关系。基于网络特征分析,除“十二五”期间能源系统密度呈“N”型外,其余3个系统为“M”型,反映城市间水资源管理协作更紧密,2020年后各系统密度下降则揭示区域协作与经济联系弱化。基于空间关联分析,地域相邻和资源类型相似的城市之间,其关联强度明显高于其他城市之间的关联强度,同时亦可提升相关城市的网络中心度。

第三,从影响因素维度看,WEC 系统效率和各子系统效率受经济、地理和科技的影响较大。整体系统中,GDP 与地理临近性差值的正向影响长期存在;在子系统中,接近中心度持续抑制系统效率,内向中心度驱动作用消失,中介中心度对能源子系统的影响成功实现“由负转正”。

5.2 建议

第一,遵循系统效率的时空演变规律,实施差异化流域治理策略。针对不同系统的效率变动规律与流域空间差异变化,以强化政策精准性。一是围绕“十四五”能源系统效率快速提升的优势,持续加大能源清洁化利用、节能技术研发的政策支持,推动能源系统效率向更高水平迈进。二是针对碳系统“十二五”“十三五”倒“U”型波动特征,以优化碳减排政策的连续性与稳定性为目标,通过完善碳交易市场、推广低碳产业模式,巩固碳系统效率回升态势。三是立足流域空间差异,针对下游 WEC 系统效率较高区域,重点打造绿色发展标杆,总结经验向中上游推广;面对中游区域系统效率低下问题,聚焦产业结构调整和资源利用效率提升,打造产业集群以缩小其与上下游的效率差距。例如,洛阳市构建“一核三带五集群”发展格局,以主城区为创新服务核心,沿黄河建设生态经济带,沿洛河布局文旅融合带,沿二广高速发展先进制造带。

第二,强化流域内区域协作,完善网络关联与空间布局。结合网络特征与空间关联规律,构建紧密的区域协同机制。一方面,针对近年来各系统网络密度下降、区域协作不足等问题,建立黄河流域资源型城市联动发展平台,打破信息、资源壁垒,以水资源联合管理为纽带,带动 WEC 系统及能源、碳系统的跨区域协作;另一方面,对于关联强度高的城市,重点强化鄂尔多斯、榆林、包头、东营等核心城市的辐射带动作用,通过完善交通物流网络、建立产业协同联盟,提升核心城市的网络中心度,进而带动周边城市效率提升,形成“核心引领、联动发展”的空间格局。

第三,聚焦经济与创新双轮驱动,优化网络结构。依据影响因素的作用机制,针对性优化要素配置。在整体系统层面,持续夯实经济基础,通过培育绿色低碳产业、提升经济发展质量,强化经济对 WEC 系统效率的正向驱动作用;同时,利用地理临近性的积极影响,推动相邻城市开展资源共享、技术共建,放大地理区位优势。在子系统层面,针对接近中心度抑制效率的问题,优化城市网络结构,减少资源配置中的“路径依赖”与“垄断效应”,提升资源流动的公平性与高效性;针对内向中心度驱动作用不佳的情况,加强城市间的技术交流与经验互鉴,激活内部协作潜力;抓住中介中心度对能源子系统“由负转正”的机遇,完善能源跨区域调配,发挥中介城市的桥梁作用,提升能源系统效率。

提升水—能—碳系统效率是驱动黄河流域资源型城市可持续发展的关键路径,本研究采用网络 DEA 模型构建水—能—碳系统评价指标体系,然而连接变量只是水—能之间的双向连接,与碳系统之间仅是单向连接,使得结果不够全面,有待进一步完善。下一步将实现3个子系统间的交互双向连接,从而更真实地反映整体系统的发展现状,推动差异化、针对性的流域生态治理策略与城市转型政策。

参 考 文 献

- [1] 中共二十届四中全会在京举行[N].人民日报,2025-10-24(1).
- [2] 宋冬凌,卢文字.黄河流域城市群碳排放时空演变多尺度分析[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2024,45(5):48-59.[SONG D L,LU W Y.Multi-scale analysis of spatial and temporal evolution of carbon emissions in urban agglomerations in the Yellow River Basin[J].Journal of North China University of Water Resources and Electric Power(Natural Science Edition),2024,45(5):48-59.]
- [3] 孙久文,崔雅琪,张皓.黄河流域城市群生态保护与经济发展耦合的时空格局与机制分析[J].自然资源学报,2022,37(7):1673-1690.[SUN J W,CUI Y Q,ZHANG H.Spatio-temporal pattern and mechanism analysis of coupling between ecological protection and economic development of urban agglomerations in the Yellow River Basin[J].Journal of Natural Resources,2022,37(7):1673-1690.]
- [4] 王文彬,许冉,桂黄宝.中国水—能源—碳排放系统效率的时空差异及影响因素[J].软科学,2024,38(11):102-111.[WANG W B,XU R,GUI H B.The

temporal-spatial differences and influencing factors of water-energy-carbon system efficiency in China[J].Soft Science,2024,38(11):102-111.]

[5] LI H,ZHAO Y H,LIN J,et al.A review of the energy-carbon-water nexus: concepts, research focuses, mechanisms, and methodologies[J].Wiley Interdisciplinary reviews-Energy and Environment,2020,9(1):e358.

[6] CHEN S Q,CHEN B.Urban energy-water nexus: a network perspective[J].Applied Energy,2016,184:905-914.

[7] QIN Y,WANG Y P,LI S Y,et al.Global assessment of the carbon-water trade off of dry cooling for thermal power generation[J].Nature Water,2023,1(8):682-693.

[8] VENKATESH G,CHAN A,BRATTEBØ H.Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: comparison of four city case studies and the relevant influencing factors[J].Energy,2014,75:153-166.

[9] HUNTINGTON H P,SCHMIDT J I,LORING P A,et al.Applying the food-energy-water nexus concept at the local scale[J].Nature Sustainability,2021,4(8):672-679.

[10] 赵荣钦,姬宇飞,冯薇,等.基于土地利用的水—能—碳关联研究:理论框架与关键问题[J].中国土地科学,2024,38(8):97-108.[ZHAO R Q,JI Y F,FENG W,et al.Research on water-energy-carbon nexus of land use: theoretical framework and key issues[J].China Land Science,2024,38(8):97-108.]

[11] 刘同超.黄河流域数字经济与生态效率的耦合机制及演化特征[J].统计与决策,2025,41(3):123-128.[LIU T C.The coupling mechanism and evolutionary characteristics of digital economy and ecological efficiency in the Yellow River Basin[J].Statistics & Decision,2025,41(3):123-128.]

[12] 徐辉,师诺,武玲玲,等.黄河流域高质量发展水平测度及其时空演变[J].资源科学,2020,42(1):115-126. [XU H,SHI N,WU L L.High-quality development level and its spatiotemporal changes in the Yellow River Basin[J].Resources Science,2020,42(1):115-126.]

[13] WANG Y R,SONG J X,LI Q,et al.Exploration of the development of water-energy-food nexus and its endogenous and exogenous drivers in the Yellow River Basin, China[J].Journal of Environmental Management, 2025,378:124735.

[14] 李前锦,张泽雅,白英臣,等.新质生产力视角下黄

河中游地区生态效率时空演变及影响因素[J].环境工程技术学报,2025,15(5):1776-

1788.[LI Q J,ZHANG Z Y,BAI Y C,et al.Analysis of the spatio-temporal evolution and influencing factors of ecological efficiency in the middle reaches of the Yellow River from the perspective of new quality productivity forces[J].Journal of Environmental Engineering Technology,2025,15(5):1776-1788.]

[15] SUN X,ZHANG H,AHMAD M,et al.Analysis of influencing factors of carbon emissions in resource-based cities in the Yellow River basin under carbon neutrality target[J].Environmental Science and Pollution Research,2022:1-14.

[16] FENG M Y,ZHAO R Q,HUANG H P,et al.Water-energy-carbon nexus of different land use types: the case of zhengzhou, China[J].Ecological Indicators,2022,141:109073.

[17] 程昀,杨印生.矩阵型网络DEA模型及其实证检验[J].中国管理科学,2013,21(5):103-109.[CHENG Y,YANG Y S.Network DEA for Matrix-type Organization with Application[J].Chinese Journal of Management Science,2013,21(5):103-109.]

[18] 郝帅,孙才志.基于网络DEA及SNA模型的中国水资源-能源-粮食纽带系统效率研究[J].地理研究,2022,41(7):2030-2050.[HAO S,SUN C Z.Water resources-energy-food nexus system efficiency in China based on network DEA and SNA model[J].Geographical Research,2022,41(7):2030-2050.]

[19] 刘军.QAP:测量“关系”之间关系的一种方法[J].社会,2007(4):164-174,209.[LIU J.QAP:A Unique Method of Measuring "Relationships" in Relational Data[J].Chinese Journal of Sociology,2007(4):164-174,209.]

[20] 杨帆,甄江红.黄河流域资源型城市绿色转型绩效评价研究[J].软科学,2025,39(3):128-136.[YANG F,ZHEN J H.Green Transformation Performance of Resource-based Cities in the Yellow River Basin[J].Soft Science,2025,39(3):128-136.]

[21] 陈美景,白中科,于潇,等.黄河流域资源型城市国土空间转型特征与影响机制研究[J].中国土地科学,2025,39(2):69-81.[CHEN M J,BAI Z K,YU X,et al.Study on territorial space transition and impact mechanism of resource-based cities in the Yellow River Basin[J].China Land Science,2025,39(2):69-81.]

[22] ZHAO P J,ZENG L G,LI P L,et al.China's transportation sector carbon dioxide emissions efficiency

and its influencing factors based on the EBM DEA model[J].Energy,2022,238:121934.
model with undesirable outputs and spatial durbin

The Temporal-spatial Pattern and Influencing Factors of Water-energy-carbon System Efficiency in Resource-based Cities of the Yellow River Basin

WANG Yun¹, WANG Wenbin¹, YI Ning², ZHANG Linjing³

(1. School of Management and Economics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China; 2. College of Economics and Management, Shihezi University, Shihezi 832003, China; 3. College of Surveying and Geo-Informatics, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450046, China;)

Abstract: [Objective] Under the background of rigid water resource constraints in the Yellow River Basin, revealing the collaborative optimization of the water-energy-carbon system provides a reference for promoting the green and low-carbon transformation and sustainable development of resource-based cities in the Yellow River Basin. [Methods] This study uses the network DEA model to calculate the efficiency of the water-energy-carbon (WEC) system and its sub-systems of resource-based cities in the Yellow River Basin from 2010 to 2023. Based on the modified gravity model, the WEC system efficiency correlation network matrix of resource-based cities in the Yellow River Basin is constructed. QAP regression analysis is used to explore the reasons for the efficiency differences. [Results] ① The average efficiency of the WEC system of each city in the basin shows an "M" shape trend. The efficiency of the downstream and upstream was close and both were significantly higher than that of the middle section. ② The network connectivity of the WEC system and its three subsystems was good, and the network density was increasing in a fluctuating manner. Among them, the efficiency of the energy system continued to improve and surpassed that of the carbon system and water system. ③ The efficiency of the WEC system was greatly influenced by economic, geographical and technological factors, and the correlation strength between cities that were geographically adjacent or had similar resource endowments was significantly higher than that of other cities. [Conclusion] There are significant differences in the WEC system efficiency of resource-based cities in the Yellow River Basin and imbalances among the systems. Policies should be tailored to the location characteristics and development stages of the upper, middle and lower reaches to promote high-quality development of resource-based cities within the basin.

Keywords: water-energy-carbon system; resource-based cities of the Yellow River Basin; network DEA; social network analysis; QAP regression