李豪,李继彦,贾昕炽,等.黄河流域城市群水-能-碳系统网络特征及多目标优化[J].中国沙漠,2026,46(5):260-273.

黄河流域城市群水-能-碳系统网络特征及多目标优化

李 豪[1ab,2],李继彦[1bc],贾昕炽[2],包令燕[2],刘秀丽[2]

(1. 太原师范学院 a.经济与管理学院,b.汾河流域地表过程与资源生态安全山西省重点实验室,c.地理科学学院,山西 晋中 030619;2. 山西财经大学 资源型经济转型发展研究院,山西 太原 030006)

摘要:在黄河流域生态保护和高质量发展背景下,城市群间水、能、碳要素关联日益紧密,传统单要素、属地化管理方式已难以适应跨区域协同治理需求。本文以黄河流域七大城市群为研究对象,基于2002、2007、2012、2017年城市间投入产出表及水资源、能源消耗和碳排放数据,运用环境拓展多区域投入产出模型、生态网络分析和多目标优化方法,识别黄河流域城市群隐含水-能-碳流动格局、网络结构特征及其结构优化路径。结果表明:(1)2002—2017年,黄河流域城市群直接用水总量总体波动较小,而能源消耗和碳排放分别增长188.45%和207.60%,水-能-碳隐含流呈现资源型城市群输出、综合型城市群承接的格局。(2)2002—2017年,城市群间水-能-碳隐含流联系增强,但生态网络鲁棒性均呈下降趋势,其中水系统下降幅度最大,为10.91%。资源型城市群多为控制输出和依赖来源地,综合型城市群更多为控制承接和依赖输入地。(3)水资源约束是黄河流域城市群水-能-碳系统优化的关键因素,基于节水-节能-降碳的综合折中方案是最优多目标优化方案,可在降低水-能-碳压力目标的同时提升系统鲁棒性。黄河流域水-能-碳协同治理应强化水资源刚性约束,完善跨区域责任分担与生态补偿机制。

关键词:黄河流域城市群;多区域投入产出;水-能-碳;生态网络分析;多目标优化

文章编号:1000-694X(2026)05-260-14 **DOI**:10.7522/j.issn.1000-694X.2026.00135

中图分类号:F205 **文献标志码**:A

0 引言

黄河流域生态保护和高质量发展是国家重大战略[1],然而,流域水资源短缺、能源开发强度高与生态环境约束趋紧等问题相互叠加,对高质量发展形成重要制约。黄河流域水资源开发利用率已经远超40%的生态警戒线[2],流域各省区以煤炭、冶金、电力等高耗能产业为主,煤化工企业占全国80%,产业倚能倚重,能源消耗总量大,利用效率不高[3],仍存在突出的高耗高碳、低端粗放的传统经济增长模式及路径依赖特征,碳排放增速虽有所放缓,但总量增长、强度偏高等问题仍较突出,碳减排压力依然较大[4]。因此,统筹协调好水-能-碳之间的纽带关系,将节水、能源结构转型、碳减排与经济可持续发展融合,已成为破解流域发展困境的迫切需求[5]。城市群作为流域人口集聚、产业发展和要素流动的核心载体,是推动黄河流域高质量发展的重要空间单元[6]。城市群间的贸易联系进一步改变了水-能-碳系统的流动格局。揭示流域尺度城市群之间水-能-碳跨区域流动规律,识别其网络结构特征并进一步对其进行结构优化,是破解上述矛盾、实现流域协同治理的前提,对支撑黄河流域生态保护和高质量发展具有重要意义。

近年来,水-能-碳研究逐渐由单一要素核算转向资源环境多要素关联,如水-能关联[7]、水-能-碳关联[8],从不同要素关联的视角刻画资源环境系统的相互影响。进一步,有学者将经济发展[9]、土地利用[10]、粮食生产[11]等因素纳入分析框架,探讨了水-能-碳-经济、水-能-碳-土、水-能-碳-粮等复合系

收稿日期:2026-06-09; **改回日期**:2026-07-17

资助项目:国家自然科学基金项目(42001257);山西省留学回国人员科技活动择优资助项目(20250024);教育部人文社会科学研究项目(25YJA790044)

作者简介:李豪(1992—),男,山西太原人,讲师,主要从事资源与环境研究。E-mail: lihao666@tynu.edu.cn

通信作者:刘秀丽(E-mail: lxl820113@163.com)

统的耦合机制。从研究方法看，水-能-碳关系研究已形成多元化的方法体系：(1)核算与足迹分析方法，包括投入产出分析[12-13]、生命周期分析[14]，多用于揭示产业链和消费需求驱动下的资源环境压力；(2)耦合关系识别方法，包括耦合协调度模型[9]、灰色关联模型[15]，用于测度水-能-碳系统的协调水平和关联强度；(3)情景模拟与系统预测方法，包括系统动力学模型[16]、LEAP模型[17]等，刻画不同发展情景下水-能-碳系统演化趋势；(4)网络结构分析方法，包括社会网络分析[13]、生态网络分析[12]等，分析水-能-碳要素流动所形成的网络结构、节点关系和系统稳定性；(5)多目标优化方法，包括数学规划类算法[18]、元启发式算法[19]，用于在水消耗、能源消费、碳排放控制和经济发展等多重目标之间寻求最优方案，为水-能-碳协同治理提供决策依据；(6)驱动机制分析方法，包括结构分解分析[20]、改进贸易引力模型[21]等，用于测度影响区域间隐含流的各因子贡献。黄河流域水-能-碳问题的关键不只在于资源消耗和环境排放本身，也体现为资源环境压力在城市群间的跨区域转移。已有研究从水资源利用、能源消费、碳排放格局等方面揭示了流域资源环境约束，并围绕水能耦合[22]、水-能-碳协同[16]展开了拓展分析。近年来，环境足迹与投入产出方法被逐步应用于黄河流域虚拟水[23]、隐含碳[24]及经济增加值[5]转移研究，为认识流域资源环境压力传导和跨区域责任分担提供了支撑。

总体来看，现有研究为理解水-能-碳系统关联关系提供了重要基础。然而已有研究仍存在以下不足：第一，现有研究多以国家[9]、省域[12,25]或全流域[3]为对象，对流域城市群这一承载人口集聚、产业分工和要素流动的重要空间单元关注不足。第二，现有研究多侧重水资源消耗、能源消费和碳排放的总量核算、协调水平评价或足迹转移测度，对隐含水、隐含能和隐含碳空间网络结构关系揭示仍不充分。此外，如何基于现有水-能-碳系统网络特征对其进行结构优化仍缺少研究。

基于此，本文以黄河流域七大城市群为研究对象，以格局识别-结构分析-优化重构为主线，采用环境拓展多区域投入产出模型突破生产地核算的局限，通过产业链传导来量化城市群间水-能-碳隐含流的跨区域转移规律，从消费侧揭示流域不同城市群水资源、能源消耗与碳排放的资源环境责任。运用生态网络分析方法解析水-能-碳系统网络结构特征，揭示流域三系统的效率-冗余平衡与城市群间控制-依赖关系。进一步构建多目标优化模型，采用输出侧惩罚-输入侧激励的双向调节机制，通过两阶段求解策略，在节水、节能、降碳多方案间识别综合折中方案，探索兼顾资源环境压力缓解与系统鲁棒性提升的优化策略。本文揭示了黄河流域城市群隐含流格局与网络特征并提出优化路径，以期为黄河流域水、能源、碳排放的跨区域协同治理提供决策依据。

1　研究区概况

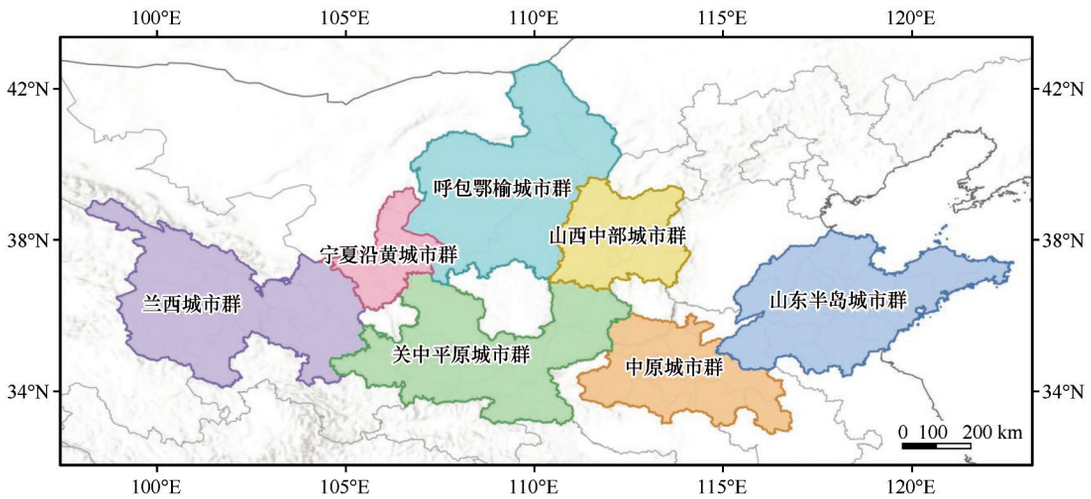
黄河流域城市群由山东半岛城市群、中原城市群和关中平原城市群3个区域级城市群，以及兰西城市群、山西中部城市群、呼包鄂榆城市群和宁夏沿黄城市群4个地区性城市群组成[1]（图1）。作为黄河流域人口集聚、产业发展和要素流动最为活跃的核心区域，七大城市群在流域经济社会发展中具有重要战略地位，其面积约占黄河流域面积的33.6%，人口规模占黄河流域的75%以上，经济总量占黄河流域的80%以上[6]。黄河流域七大城市群既是黄河流域高质量发展的主要承载区，也是资源环境约束最为突出的集中区域。

本研究中黄河流域城市群的范围主要基于《兰州—西宁城市群发展规划（2018—2035年）》《银川市国土空间总体规划（2021—2035年）》《宁夏空间发展战略规划（2021—2035年）》《呼包鄂榆城市群发展规划（2018—2035年）》《关中平原城市群发展规划（2017—2035年）》《山西中部城市群国土空间规划（2021—2035年）》《中原城市群发展规划》《山东半岛城市群发展规划（2021—2035年）》确定，研究中将部分规划涉及的县级行政单元统一统计核算至其所属地级市，并以地级行政区为最小单元进行城市群聚合。本文参考文献[1,26]，将黄河流域七大城市群划分为综合型城市群与资源型城市群两大类型，其中综合型城市群包含山东半岛、中原及关中平原城市群，资源型城市群包含山西中部、呼包鄂榆、宁夏沿黄与兰西城市群。

2　数据来源和研究方法

2.1　数据来源

本文所用多区域投入产出表来源于Wang等[27]



注：基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作，底图边界无修改

图1 黄河流域城市群地理位置

Fig.1 Geographical location of urban agglomerations in the Yellow River Basin

构建的大中华地区城市间投入产出数据库(Greater China inter-city input-output database)，其提供2002、2007、2012、2017年城市间投入产出表，4个年份与我国相应轮次投入产出调查年份一致，且数据库提供了不同年份行业分类的对照关系，能够较好保证跨期分析的一致性与可比性。原始表覆盖中国内地340个城市，包含42个产业部门，本文按城市归属将地级市整合为黄河流域七大城市群及其他地区，构建城市群尺度多区域投入产出表(表1)。

表1 黄河流域城市群多区域投入产出

Table 1 Multiregional input-output for urban agglomerations in the Yellow River Basin

项目		中间使用				最终需求				出口	总产出
		兰西	……	山东半岛	其他地区	兰西	……	山东半岛	其他地区		
中间投入	兰西	$Z^{LX,LX}$	……	$Z^{LX,SDBD}$	$Z^{LX,O}$	$F^{LX,LX}$	……	$F^{LX,SDBD}$	$F^{LX,O}$	E^{LX}	X^{LX}
	……	……	……	……		……	……	……		……	……
	山东半岛	$Z^{SDBD,LX}$	……	$Z^{SDBD,SDBD}$	$Z^{SDBD,O}$	$F^{SDBD,LX}$	……	$F^{SDBD,SDBD}$	$F^{SDBD,O}$	E^{SDBD}	X^{SDBD}
	其他地区	$Z^{O,LX}$	……	$Z^{O,SDBD}$	$Z^{O,O}$	$F^{O,LX}$	……	$F^{O,SDBD}$	$F^{O,O}$	E^{O}	X^{O}
增加值		VA^{LX}	……	VA^{SDBD}	VA^{O}	—	—	—		—	—
总投入		X^{LX}	……	X^{SDBD}	X^{O}	—	—	—		—	—

2002、2007、2012年用水总量数据来源于Zhou等[28]发布的高分辨率用水调查数据集，2017年用水总量数据来源于黄河流域各省水资源公报。能源消耗数据来源于中国城市与县域能源消费数据集(1997—2017年)[29]，碳排放数据来源于中国县域CO_2排放与固碳数据集(1997—2017年)[30]。

2.2 环境拓展的多区域投入产出法

通过核算黄河流域城市群间隐含水、隐含能、隐含碳的流动量，刻画区域间直接经济联系与经由产业链传导形成的间接关联，从消费侧视角识别最终需求驱动下的水-能-碳跨区域转移路径。

2.2.1 经济关联矩阵构建

直接消耗系数反映了生产过程中产出与消耗之间的关联程度[31]。直接消耗系数矩阵$\boldsymbol{A}$可表示为：

$$a_{ij}=\frac{Z_{ij}}{X_j} \tag{1}$$

式中：Z_{ij}为城市群i流向城市群j的中间投入价值量；X_j为城市群j的总产出。里昂惕夫逆矩阵L用于刻画城市群间直接与间接的完全经济关联，是核算隐含水、能、碳的核心：

$$L = (I - A)^{-1} \tag{2}$$

式中：I为单位矩阵；$I–A$为里昂惕夫矩阵，其逆矩阵L的元素L_{ij}代表城市群j最终需求对城市群i的完全需求系数。

2.2.2　直接资源环境强度核算

部分文献采用混合水、混合能计算[7,25]，为避免混合水、混合能处理中耦合项与投入产出间接项可能的重复计算问题，本文采用城市群生产过程中直接用水、直接能耗和直接碳排放构建资源环境扩展系数。城市群i的直接资源环境强度向量为：

$$F_i^k = \frac{R_i^k}{X_i} \tag{3}$$

式中：$k \in \{W, E, C\}$分别表示水、能、碳。R_i^k为城市群i在资源类型k下的直接资源环境消耗或排放总量；X_i是城市群i的总产出。进一步将其写为对角矩阵F_{Diag}^k，作为连接经济系统与资源环境系统的桥梁。

2.2.3　消费端完全隐含流核算

在环境拓展的多区域投入产出框架下，由最终需求Y所引致的完全隐含水、隐含能和隐含碳流量可统一表示为：

$$M^k = F_{Diag}^k L Y_{Diag} \tag{4}$$

式中：M^k为资源类型k的消费端完全隐含流矩阵；F_{Diag}^k为直接资源环境强度对角矩阵；L为里昂惕夫逆矩阵；Y_{Diag}为最终需求对角矩阵。

2.3　生态网络分析

生态网络分析可揭示系统的鲁棒性和节点间控制–依赖关系[12]。以黄河流域内部七大城市群为网络节点，以前述隐含水、隐含能和隐含碳完全流矩阵为有向边，分别构建黄河流域城市群水、能、碳生态网络。

本文仅保留网络构建、系统鲁棒性及控制–依赖分析所需的核心定义和公式。其中，系统鲁棒性分析所涉及的平均互信息、上升度、发展容量和冗余度等信息论指标主要参考Ulanowicz[32]；控制–依赖关系分析所涉及的积分流矩阵、直接与间接效应及节点间非对称作用关系主要参考Fath等[33]，具体计算过程与生态网络分析工具实现参考Borrett等[34]。

2.3.1　网络构建与平衡化

消费端完全隐含流矩阵为M，其中m_{ij}表示城市群j的最终需求对城市群i所引致的完全隐含资源环境流量。为构建生态网络，将其转化为有向流量矩阵$F=[f_{ij}]$，其中f_{ij}表示城市群i流向城市群j的隐含流量。进一步提取黄河流域内部七大城市群之间的流量，构成内部流量矩阵F_{int}。

考虑到该内部子系统仍与其他地区存在联系，本文将其他地区流向城市群i的隐含流记为边界输入z_i，城市群i流向其他地区的隐含流记为边界输出y_i。对网络进行平衡化处理，使其满足生态网络分析所需的稳态条件。

2.3.2　系统鲁棒性

系统鲁棒性（SR）可以反映黄河流域城市群水–能–碳系统的网络效率与冗余之间的协调程度。通常采用平均互信息（AMI）、香农熵（H）、上升度（ASC）、发展容量（DC）、系统冗余（OH）等指标测算。其中，AMI为网络流动的组织化程度，H表示流动路径的多样性，ASC表示系统已实现的组织化功能规模，CAP表示给定总吞吐规模下系统潜在的最大组织能力，OH则反映系统尚未被组织化完全占用的缓冲空间。系统鲁棒性定义为：

$$SR = -\alpha \ln \alpha \tag{5}$$

式中：$\alpha = ASC/CAP$，为系统组织化程度占发展容量比重，适度的值可兼顾效率与冗余，使系统均衡最优、抗扰动适应性更强。结合ASC与CAP的变化，可识别黄河流域城市群水–能–碳系统的效率与冗余平衡程度。

2.3.3　控制–依赖关系

为识别黄河流域城市群水–能–碳网络中节点间的非对称作用关系，采用控制分析与依赖分析方法，对城市群之间通过直接与间接路径形成的综合影响进行刻画。其中，控制矩阵（CA）用于表征各城市群对其他节点的控制作用分配结构，依赖矩阵（DA）用于表征各城市群对不同来源节点的依赖构成。不同研究对控制矩阵和依赖矩阵的具体构造方式存在差异，本文采用的CA矩阵与DA矩阵均为在原始控制–依赖关系基础上进一步进行非负化和归一化处理后的结果矩阵[7]。其中，CA矩阵用于反映各城市群对外控制作用的投向分配，其行向量更能表征某一城市群控制输出的主要方向。DA矩阵用于反映各城市群依赖来源的构成结构，其列向量表征某一城市群对不同来源节点的依赖。

2.4　多目标优化

资源配置优化是水–能–碳协同治理的核心目标之一，多目标优化能够对实际问题进行量化，整

合潜在的相互冲突目标。在流量核算与生态网络分析基础上，通过调整基准年城市群间中间投入货币流联系强度，使用多目标优化探索兼顾资源环境压力缓解与网络鲁棒性提升的路径。

考虑到水–能–碳压力目标及对应网络鲁棒性之间存在明显权衡关系[19]，且单次高维多目标统一求解易导致解集分散、区分程度不够，本文采用两阶段优化的思路求解：首先分别构建节水、节能和降碳三类双目标模型，通过非支配排序遗传算法（NSGA-II）获得三套解集；将三类解集合并、去重，再基于最大遗憾值最小化识别最终方案。

2.4.1 目标函数

考虑到黄河流域不同城市群在资源环境禀赋、产业结构和经济发展水平方面存在显著差异，本文以城市群单位地区生产总值所对应的资源环境负担表征其约束强弱。城市群 i 的资源环境强度可表示为：

$$I_i^k = \frac{R_i^k}{GDP_i} \tag{6}$$

式中：资源类型 $k \in \{w, e, c\}$ 分别表示水、能、碳；R_i^k 分别表示城市群 i 的总用水量、能源消耗总量和碳排放总量；GDP_i 为城市群 i 的地区生产总值。为消除量纲差异，进一步采用最小–最大标准化得到资源环境约束系数 ϕ_i^k。在此基础上，构建资源环境压力目标函数：

$$Fun^k = \sum_{i=1}^{7}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{7} \phi_i^k M_{ij}^{k,opt} + \sum_{i=1}^{7}\sum_{\substack{j=1\\ j\neq i}}^{7} \left(1-\phi_i^k\right) M_{ji}^{k,opt} \tag{7}$$

式中：$M_{ij}^{k,opt}$ 分别表示优化后城市群 i 流向城市群 j 的隐含资源环境流量，该目标函数借鉴输出侧惩罚–输入侧激励的双向调节思想[18]。第一项为输出侧惩罚项，提高高强度约束城市群承担对外隐含流输出时的目标代价；第二项为输入侧激励项，对高负担地区输入补偿的相对鼓励。

除资源环境压力目标外，将生态网络系统鲁棒性纳入优化框架。Rob_k 表示资源类型 k 对应生态网络的鲁棒性指标，则分别构建水、能、碳三类双目标主导模型：

$$Model_k: \min\left(Fun^k - Rob^k\right) \tag{8}$$

2.4.2 约束条件

本文以城市群间中间投入流的调节系数为决策变量，对基准年贸易联系进行比例调整，其中黄河流域内部城市群之间的联系作为主要调整对象，城市群与其他地区之间的联系作为次要调整对象。

约束条件的设置主要借鉴 Zhang 等[18]关于能–水关联多目标优化和空间资源再配置的研究思路，即在投入产出优化过程中同时考虑投入产出平衡、经济结构稳定性、贸易联系波动范围和资源消耗上限，以保证优化结果具有经济可行性和现实约束意义。在此基础上，结合黄河流域城市群水–能–碳系统特征，本文设置以下约束。其一，优化后系统仍满足多区域投入产出平衡关系，且在比较静态优化框架下最终需求保持不变；其二，为避免内部经济规模偏离基准情景过大，对黄河流域内部 7 个城市群总产出之和设置波动上限 5%；其三，对内部城市群之间以及城市群与其他地区之间的联系强度设定允许波动范围 40%；其四，各城市群内部本地自用量及其他地区内部贸易联系保持基准值不变；其五，三类主导模型设置差异化刚性边界，节水、节能、降碳模型分别以对应要素总量为硬约束，其余两类要素放宽至基准值的 1.5 倍，既突出单要素主导目标，也预留其他要素调整空间。

2.4.3 求解策略

本文采用 MATLAB 的多目标遗传算法函数 gamultiobj 对三类双目标主导模型分别进行求解。其基于 NSGA-II 算法，通过快速非支配排序、拥挤距离保持与精英保留机制，能够在多个相互冲突目标之间搜索 Pareto 最优前沿，可有效求解具有显著非线性和强约束特征的优化问题。由于本文每次目标函数评价均需经历联系强度调整、投入产出重算、隐含流核算和生态网络评价的完整过程，基于群体搜索的进化算法对此类非线性问题更为适用。

获得节水、节能、降碳三套非支配解集后，将其合并形成总候选解集，进一步设置底线筛选条件，剔除不满足底线约束的方案：主导资源及放宽后的非主导资源总量不突破约束边界，且三类系统鲁棒性相对基准情景的下降幅度均不超过 0.05，以保证进入综合折中识别的候选解同时满足资源环境压力降低和系统鲁棒性提升的要求。

对候选解的三类压力目标及对应鲁棒性指标进行无量纲化处理，构造水、能、碳三个维度的综合损失值。采用最大遗憾值最小化原则识别综合折中方案。最大遗憾值越小，说明该方案在三维目标上越不存在明显短板，能够更好兼顾资源环境压力缓解与网络系统鲁棒性提升。

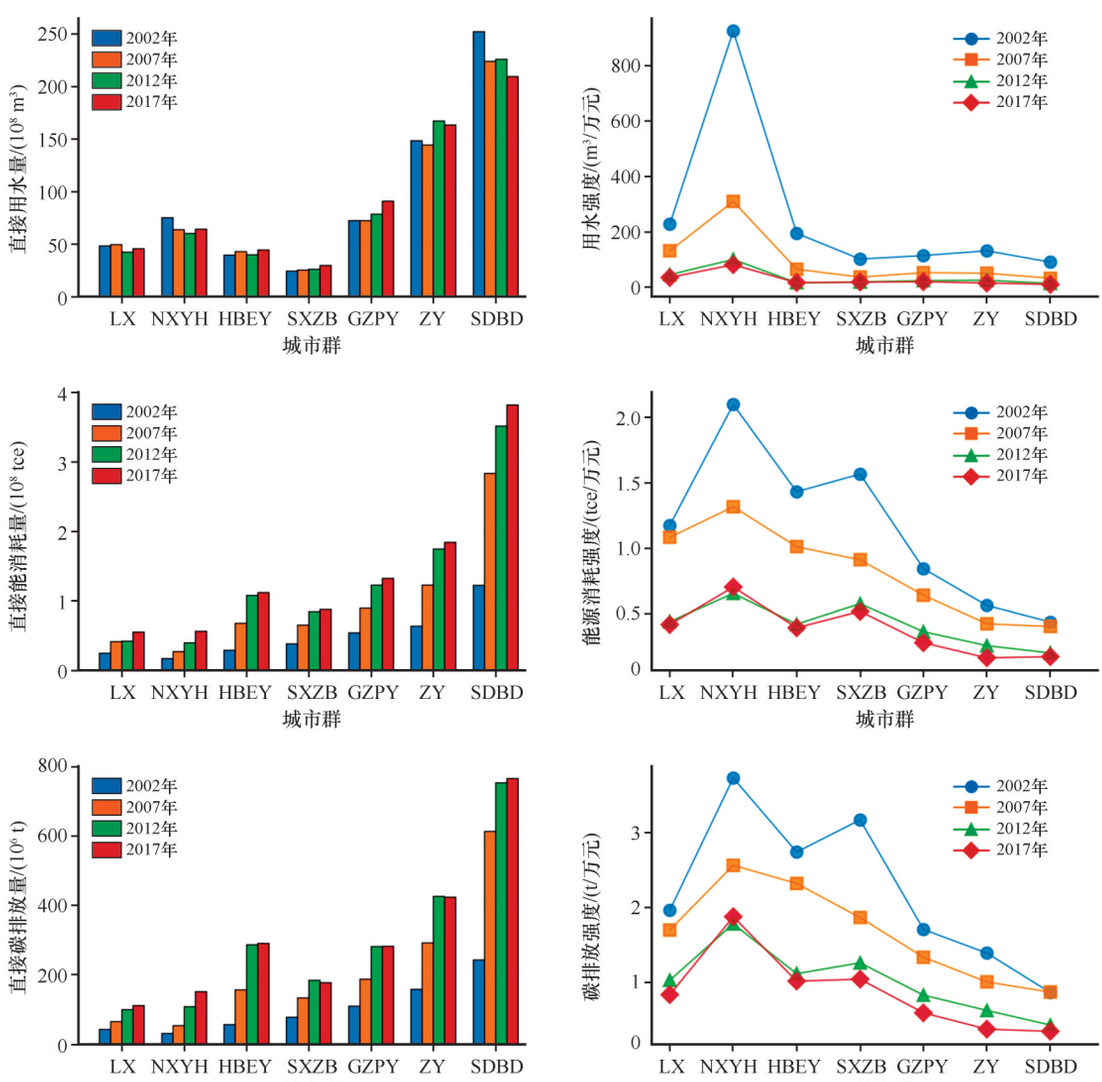
3　结果与分析

3.1　黄河流域城市群水–能–碳流动格局

3.1.1　水–能–碳直接消耗特征

研究期内，除用水总量以外，黄河流域城市群水–能–碳直接消耗基本呈现出总量增加但强度降低的演变特征（图 2）。用水总量波动相对平稳，由 2002 年 662.15×10^8 m^{3}降至 2007 年 623.52×10^8 m^3，随后回升至 2017 年的 649.41×10^8 m^3；能源消耗和碳排放持续增长，分别由 2002 年 3.51×10^8 tce 和 715.83×10^6 t 增长至 2017 年 10.12×10^8 tce 和 2201.90×10^6 t，增幅较大。与总量变化不同，水、能、碳单位产出强度总体呈下降趋势，平均直接水强度、能源消耗强度和碳排放强度分别由 2002 年的 124.47 m^3/万元、0.66 tce/万元和 1.35 t/万元降至 2017 年的 14.52 m^3/万元、0.23 tce/万元和 0.49 t/万元，降幅分别为 88.34%、65.69% 和 63.42%。研究期内资源利用效率和减排效率有所提升。

空间格局上，黄河流域城市群水–能–碳消耗表现出综合型城市群总量高、资源型城市群强度高的分异特征。2017 年综合型城市群直接用水、能源消耗和碳排放总量分别为 464.25×10^8 m^3、6.99×10^8 tce 和 1 473.17×10^6 t，分别占七大城市群总量的 71.5%、



注：LX 为兰西城市群，NXYH 为宁夏沿黄城市群，HBEY 为呼包鄂榆城市群，SXZB 为山西中部城市群，GZPY 为关中平原城市群，ZY 为中原城市群，SDBD 为山东半岛城市群（下同）

图 2　2002—2017 年黄河流域城市群直接用水、能源消耗与碳排放及其强度变化

Fig.2　Changes in direct water use, energy consumption, carbon emissions, and their intensities of urban agglomerations in the Yellow River Basin from 2002 to 2017

69.1% 和 66.9%；4 期平均占比也分别达到 71.8%、69.8% 和 69.8%。宁夏沿黄、呼包鄂榆、山西中部和兰西等资源型城市群总量占比较低，但单位产出强度明显偏高。2017 年资源型城市群直接水强度、能源消耗强度和碳排放强度分别为 27.76 m³/万元、0.47 tce/万元和 1.09 t/万元，分别为综合型城市群的 2.28 倍、2.55 倍和 2.79 倍，表明资源型城市群仍面临更突出的资源环境效率约束。

3.1.2 隐含水–能–碳流动格局

2017 年，黄河流域城市群内部隐含水–能–碳流动呈现出上中游资源型城市群输出、中下游综合型城市群承接的格局（图 3）。隐含水、隐含能和隐含碳流动总量分别为 50.57×10^8 m³、0.77×10^8 tce 和 172.62×10^6 t。其中，山东半岛、关中平原和中原城市群在三类隐含流系统中普遍表现为净流入；宁夏沿黄、呼包鄂榆和山西中部城市群则为净流出，承担了较强的生产端隐含资源环境压力；兰西城市群流动规模较小，但整体亦表现为净输出。城市群间联系中，中原城市群与山东半岛城市群之间的隐含流联系最为紧密。黄河流域城市群隐含水–能–碳与其他地区的联系显示（图 4），七大城市群整体净流入隐含水 105.71×10^8 m³，而净流出隐含能 1.23×10^8 tce、净流出隐含碳 315.70×10^6 t，黄河流域城市群在全国分工中水资源为输入依赖，同时承担了隐含能、隐含碳转移责任。资源型城市群能源资源禀赋优越，煤炭、电力、冶金、化工等资源密集型高耗能产业占主导地位，在黄河流域产业链中承担能源原材料供给与中间品生产职能，本地水耗、能耗与碳排放随跨区域产品贸易向外转移。综合型城市群经济总量较大、最终需求规模大，对上游资源型地区的能源与中间投入依赖较强，其最终需求通过投入产出联系拉动上游地区的资源消耗。表明黄河流域城市群之间存在生产地承压–消费地受益的空间错位关系。

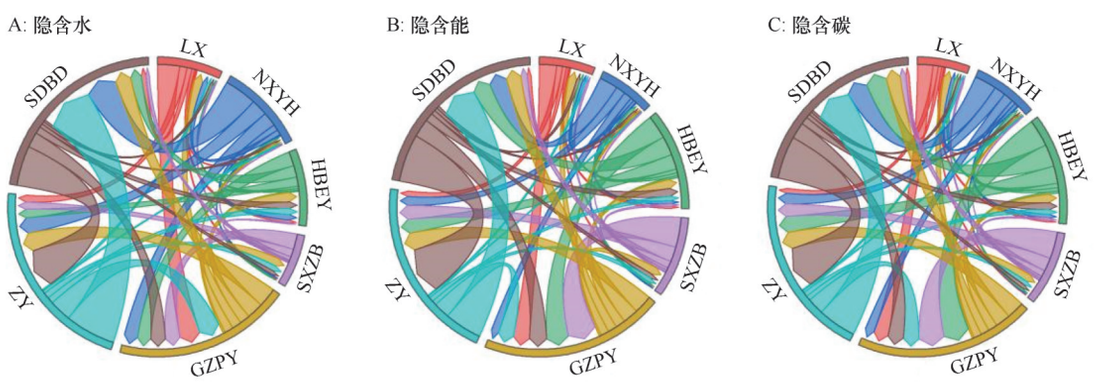


图 3 2017 年黄河流域城市群隐含水-能-碳流动和弦图

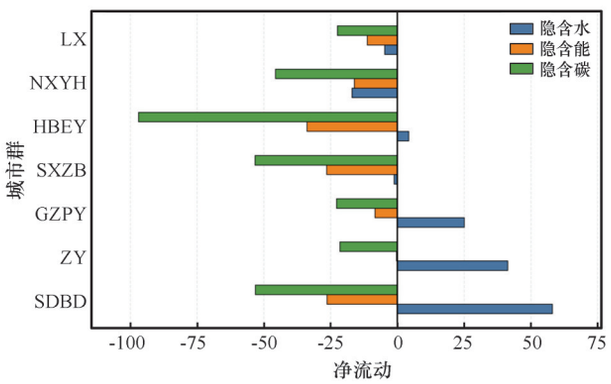
Fig.3 Chord diagram of embodied water-energy-carbon flows among urban agglomerations in the Yellow River Basin in 2017

不同资源环境要素的隐含流动格局存在一定差异。宁夏沿黄城市群隐含水净流出规模最大，山东半岛城市群和关中平原城市群是隐含水的主要流入地。山西中部、呼包鄂榆和宁夏沿黄城市群隐含能净流出规模较大，关中平原城市群和中原城市群隐含能净流入规模较大。呼包鄂榆、宁夏沿黄和山西中部城市群隐含碳净流出规模居前，关中平原、中原和山东半岛城市群隐含碳净流入规模较大。隐含能和隐含碳流动方向一致性较高，反映出能源消费仍是碳排放空间转移的基础载体。以煤炭、电力、冶金、化工等为代表的高耗能产业，不仅推动隐含能源向综合型城市群转移，也同步带来隐含碳排放责任的空间转移。相比之下，隐含水流动受水资源禀赋、产业用水强度和产业结构的共同影响，其空间格局与隐含能、隐含碳并不完全一致。黄河流域水–能–碳关系并非简单同向变化，而是在资源禀赋、产业结构和消费需求共同作用下表现出一定的协同与权衡。

3.2 黄河流域城市群水–能–碳生态网络结构特征

3.2.1 系统鲁棒性

2002—2017 年，黄河流域城市群水–能–碳生态网络系统鲁棒性均呈下降趋势，其中水系统由 0.3604 降至 0.3211，能源系统由 0.3649 降至 0.3331，



注：图中隐含水单位为亿立方米，隐含能单位为百万吨标准煤，隐含碳单位为百万吨（图 7A、图 8 同）

图 4　2017 年黄河流域城市群与其他地区隐含水-能-碳净流动

Fig.4　Net embodied water-energy-carbon flows between urban agglomerations in the Yellow River Basin and other regions in 2017

碳系统由 0.3646 降至 0.3341，三类系统鲁棒性整体减弱（图 5）。分阶段看，2002—2007 年变化较小，2007—2012 年开始回落，2012—2017 年下降最为明显。能源和碳系统鲁棒性整体略高于水，但到 2017 年三者差距缩小，且水系统降幅最大，其稳定性下降更突出。

黄河流域能源重化工业布局与水资源短缺的空间错配是核心矛盾，水资源受自然流域约束，无法像能源、碳排放权那样通过市场交易、技术替代实现灵活调节，因此网络对核心供给节点和通道的依赖更强，抗扰动能力更弱。

3.2.2　控制与依赖关系

2017 年黄河流域城市群水–能–碳生态网络的控制–依赖关系总体有较强一致性，即上中游资源型城市群多为控制输出和依赖来源地，中下游综合型城市群则更多表现为控制承接和依赖输入，形成由资源供给区向需求承接区传导的格局。

从控制–依赖关系来看，3 类网络的主导节点与作用方向异同并存（图 6）。控制关系方面，隐含水网络中兰西、宁夏沿黄和山西中部城市群对关中平原、中原和山东半岛城市群控制作用较强，控制关系相对分散；隐含能网络中呼包鄂榆、宁夏沿黄和山西中部城市群的控制作用更突出，控制关中平原、中原和山东半岛城市群；隐含碳与隐含能网络较相似。依赖关系方面，隐含水网络主要表现为宁夏沿黄城市群的单核心支撑特征；隐含能网络中宁夏沿黄和山西中部城市群共同构成主要依赖来源；隐含碳网络中宁夏沿黄、山西中部和呼包鄂榆城市群是主要依赖来源。碳排放是能源消费的伴生产物，随能源产品供给、工业原材料生产与贸易流转同步转移，因此碳系统与能源网络的控制格局高度协同，均沿能源基地向消费市场同向传导。

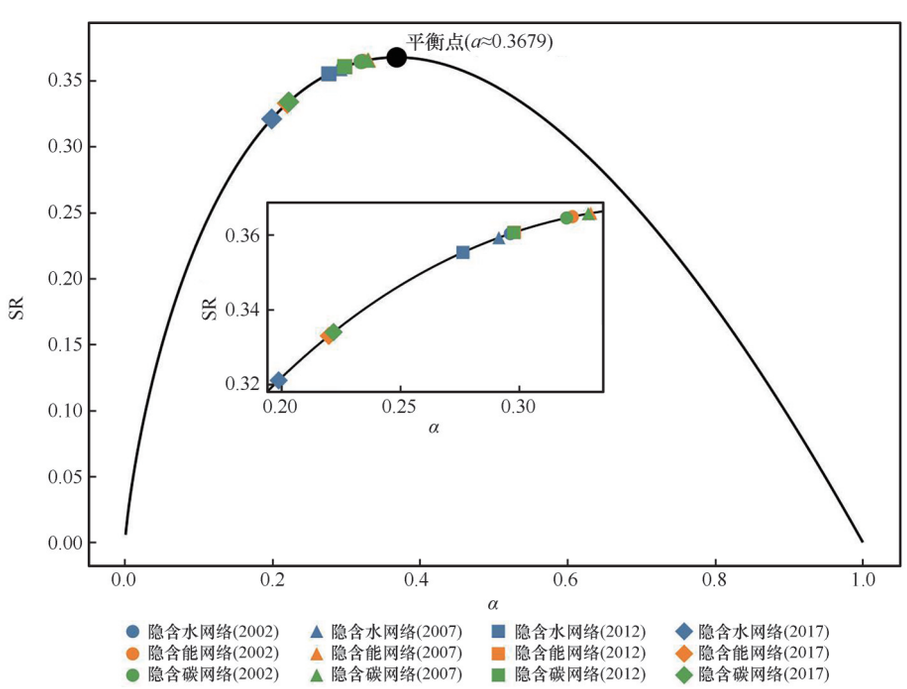


图 5　黄河流域城市群水-能-碳系统鲁棒性指数（SR）曲线

Fig.5　SR curves of water-energy-carbon of urban agglomerations in the Yellow River Basin

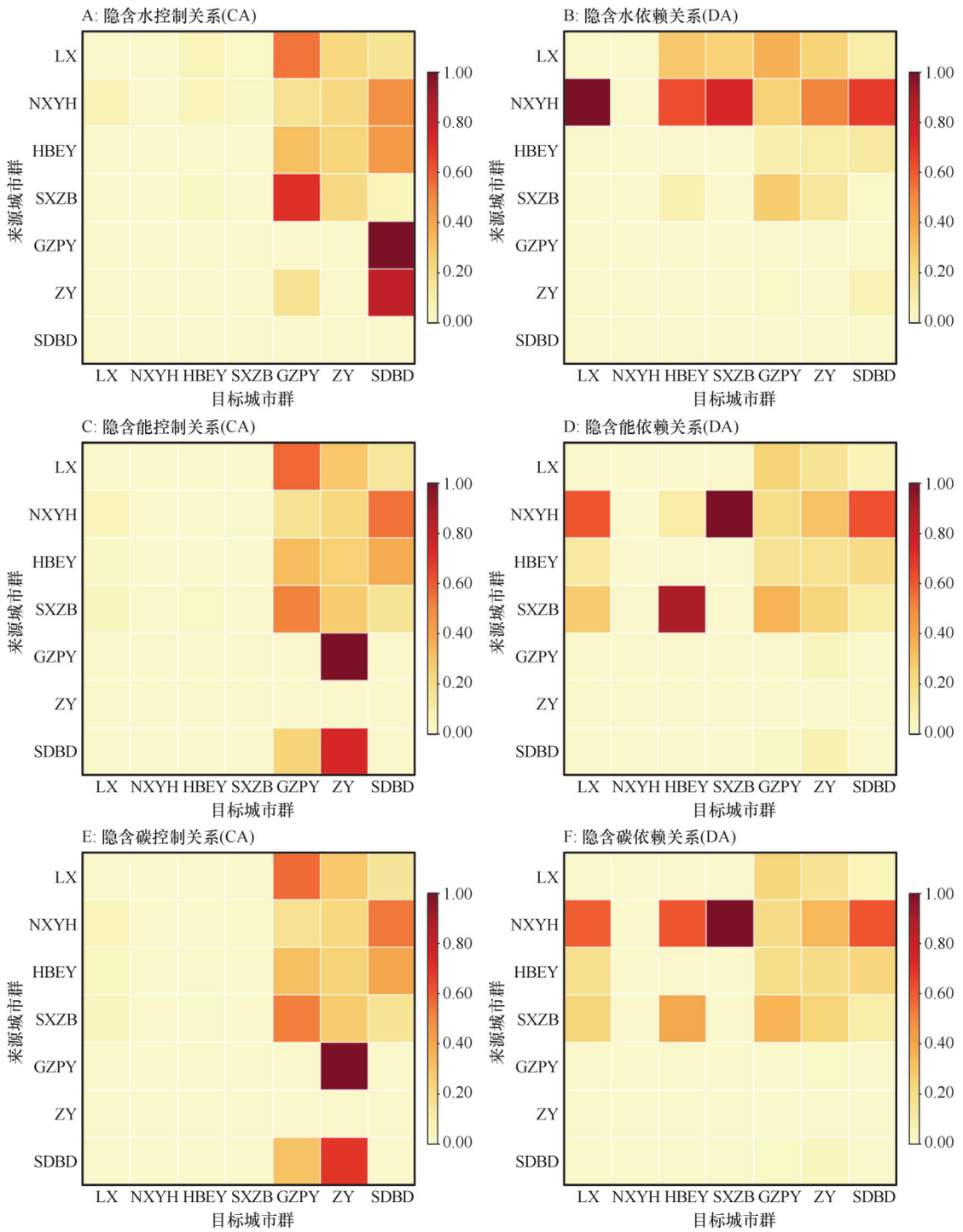


图 6　2017 年黄河流域城市群水、能、碳控制与依赖矩阵

Fig.6　Control and dependency matrices of water, energy, and carbon among urban agglomerations in the Yellow River Basin in 2017

3.3　黄河流域城市群水–能–碳网络结构优化结果

3.3.1　优化方案比较

为比较不同资源环境偏好下优化方案的差异特征，本文选取节水方案、节能方案和降碳方案作为单一资源的代表解，并与综合折中方案进行对比分析。结果表明，不同方案在综合压力目标、网络鲁棒性以及资源环境总量控制方面表现出明显差异，其中节水方案在三类综合压力缓解上整体最优，而综合折中方案则在保持较强优化效果的同时体现出更好的综合均衡性。

三类方案优化效果存在差异。从三类综合压力目标看(图 7A)，节水方案表现最优，其水压力目标、能压力目标和碳压力目标较基准情景分别下降 28.57%、27.73% 和 27.74%。节能方案、降碳方案降幅较低，但分别对能源和碳压力目标具有更强针对性。节水方案不仅对水压力缓解最有效，而且对能、碳压力也具有更强的协同改善作用，综合优化效果优于节能和降碳方案。从网络鲁棒性看(图 7B)，节水方案的水系统鲁棒性最高，达到 0.3393，较基准值 0.32115 提高 5.66%；其对能系统和碳系统鲁棒性亦较基准有所提高。节能方案与降碳方案亦对三类系统鲁棒性有所提升，但幅度不及节水方案。

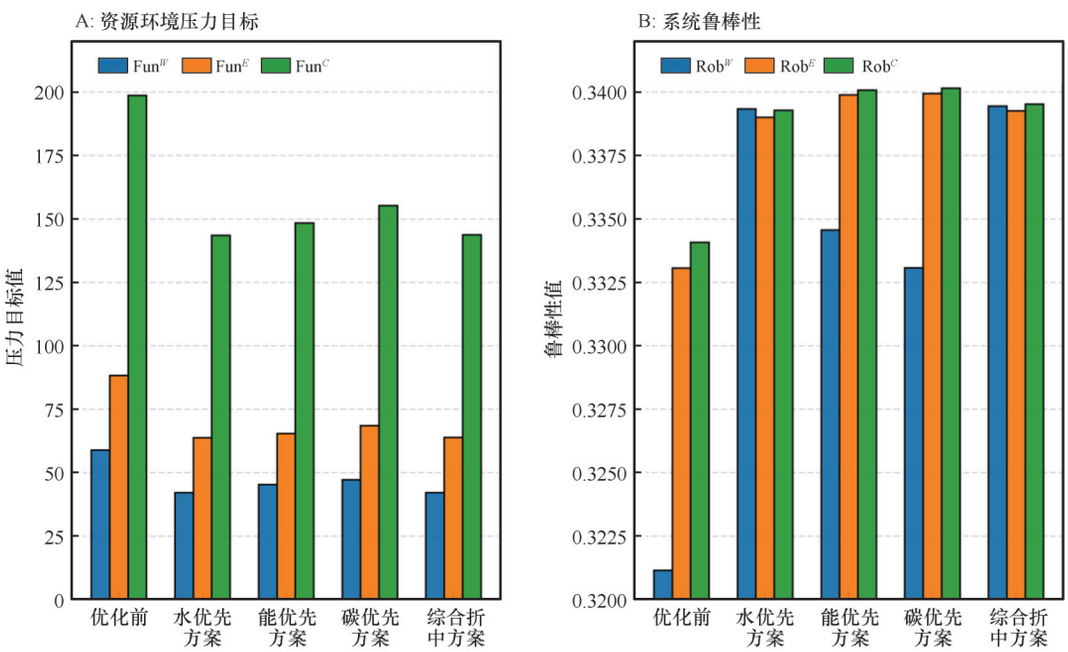


图 7　4 种优化方案的压力目标与网络鲁棒性对比

Fig.7　Comparison of pressure objectives and network robustness for four optimization schemes

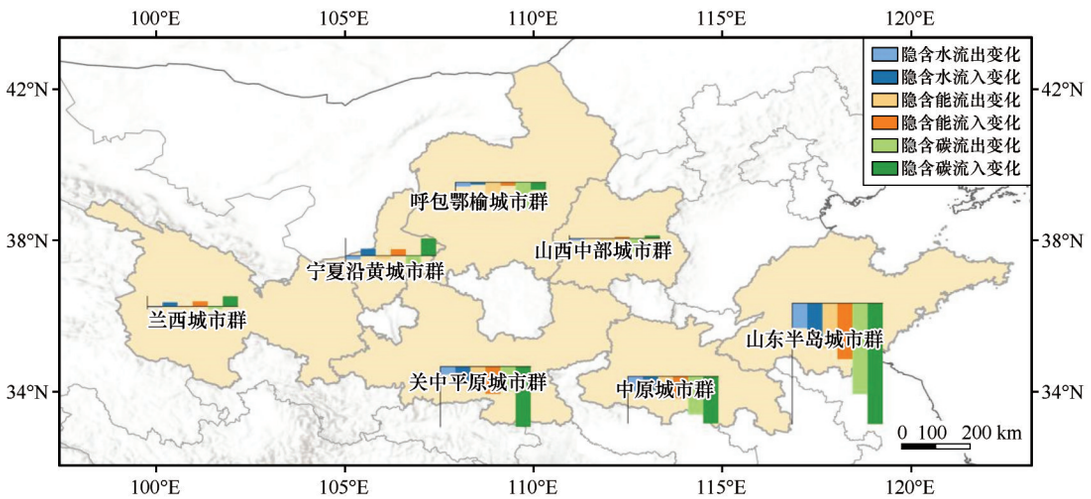
综合折中方案是在水、能、碳三类压力削减与网络鲁棒性提升之间通过最大遗憾值最小化权衡得到。该方案水、能、碳压力目标分别为 42.10×10^8 m³、63.86×10^6 tce、143.76×10^6 t，较基准分别下降 28.48%、27.66%、27.64%，与节水方案基本一致；其水、能、碳系统鲁棒性较基准分别提高 5.70%、1.86%、1.63%，并略高于节水方案。尽管该方案在能、碳系统鲁棒性上略低于节能和降碳方案，但其三类压力目标明显更低，综合折中方案在保持较强压力削减效果时，兼顾了系统鲁棒性提升，其均衡性最好。

节水方案不仅能够明显降低水压力目标，同时对能源消耗和碳排放压力也具有较强的同步削减作用，说明水资源约束在黄河流域水–能–碳系统中具有明显牵引效应。对水资源压力的约束会通过产业链关联同步传导至能源消耗和碳排放环节。

3.3.2　水–能–碳系统优化成效

综合折中方案对资源型城市群形成了较明显的减负效应，尤其是宁夏沿黄、兰西和山西中部城市群表现出流出减少、流入增加的双向调节特征。说明本文构建的多目标优化模型能够较好体现输出侧惩罚–输入侧激励的调控思想，在控制高强度地区对外隐含资源环境输出的同时，通过调整区域间联系结构增强其输入补偿，从而推动黄河流域水–能–碳责任分担由资源型城市群单向承压，转向资源型城市群减负与综合型城市群需求调节相结合的协同治理模式。

资源型城市群表现出较明显的减少输出、增加输入的特征(图 8)。兰西、宁夏沿黄、呼包鄂榆和山西中部 4 个资源型城市群隐含水、隐含能和隐含碳流出量分别减少 3.10×10^8 m³、5.94×10^6 tce 和 14.19×10^6 t；与此同时，其流入量分别增加 2.39×10^8 m³、2.72×10^6 tce 和 6.31×10^6 t，优化方案在降低其对外输出压力的同时增强了输入侧补偿。其中，宁夏沿黄城市群调节效果最突出，三类隐含流流出量分别减少 1.05×10^8 m³、0.92×10^6 tce 和 2.44×10^6 t，流入量则分别增加 1.92×10^8 m³、1.82×10^6 tce 和 4.76×10^6 t。综合型城市群主要表现为隐含流输入输出均收缩的



注:基于自然资源部标准地图服务网站审图号GS(2024)0650号标准地图制作,底图边界无修改

图8 综合折中方案下黄河流域城市群隐含水、能、碳流入流出变化

Fig.8 Changes in embodied water-energy-carbon inflows and outflows of urban agglomerations in the Yellow River Basin under the comprehensive compromise scheme

特征,但流入量比流出量减少更多,即净流入明显降低。关中平原、中原和山东半岛城市群隐含水、隐含能和隐含碳流入量分别减少 18.52×10^{8} m^3、28.84×10^{6} tce 和 62.67×10^{6} t,流出量分别减少 13.03×10^{8} m^3、20.17×10^{6} tce 和 42.17×10^{6} t。其中,山东半岛城市群调整幅度最大,三类隐含流流入量分别减少 10.08×10^{8} m^3、15.34×10^{6} tce 和 33.21×10^{6} t,流出量分别减少 6.83×10^{8} m^3、12.46×10^{6} tce 和 24.98×10^{6} t。

多目标优化结果体现了资源环境效率约束下要素流动的调整方向。优化方案在维持经济产出和网络基本稳定的前提下,对高强度输出关系进行调整。对于资源型城市群,优化过程倾向于降低其输出,缓解其长期被动承载外部需求转嫁的资源环境压力。对于综合型城市群,优化结果则表现为责任再分配,反映出消费端应在资源环境协同治理中承担更多责任。

4 讨论

黄河流域城市群水-能-碳流动格局,是资源禀赋的先天差异、区域产业分工的深化以及消费需求空间错位共同驱动的结果。上中游资源型城市群依托能源、原材料和高耗能产业基础,在区域产业链中更多承担生产端供给功能,隐含水、能、碳网络中表现出较强的输出特征;而山东半岛、中原和关中平原等综合型城市群经济规模较大、产业体系较完整、最终需求较强,其消费和加工需求通过投入产出联系持续拉动上游地区资源消耗和碳排放,更多表现为隐含流承接端。

与长江经济带类似,黄河流域城市群间也存在由发达地区最终需求驱动的隐含水-能-碳压力转移现象。长江经济带中上海、浙江、江苏等发达省市凭借产业结构和市场需求优势,将部分隐含水、隐含能和隐含碳压力转移至贵州、云南等相对欠发达省份,形成一定程度的环境不公平,消费受益地区应对其外部化的资源消耗和环境污染承担相应责任[35]。与之相比,黄河流域的资源型输出-综合型承接格局具有更强的资源约束属性。黄河流域与长江经济带轴线发展模式不同[36],能源富集与水资源短缺并存[37],资源型城市群亦是水资源约束和生态环境压力较强的地区。相较于长江流域下游水土资源匹配较好、经济集聚条件较优的情形,黄河流域"土多水少"的地区占比较大,缺水是制约人地关系协调的核心短板。因此,黄河流域下游山东半岛、中原等综合型城市群虽同样具有消费端和承接端特征,但其上游宁夏沿黄、呼包鄂榆、山西中部等资源型城市群同时承受能源供给、水资源短缺和生产端碳排放压力,形成了多重资源环境约束叠加的复合输出格局。

本文以城市群间水-能-碳隐含流为决策变量,采用非支配排序遗传算法进行多目标优化。与 Zhang 等[18]采用等权加权和法将能源、水资源压力合并为单目标线性规划相比,本文将输出侧惩罚-输入侧激励的资源再配置思想由水-能关系拓展至水-能-碳系统,且避免了固定权重可能掩盖目标冲突的问题。与 Zou 等[38]针对单城市水代谢系统开展

能耗-鲁棒性双目标优化相比，本文将研究尺度拓展至城市群水-能-碳隐含流网络，将资源环境压力最小化与网络鲁棒性最大化设置为双目标进行权衡。在此基础上，本文采用分要素优化与综合折中方案优选的两阶段求解策略，分别比较节水、节能和降碳方案，再从合并解集中识别综合折中方案，从而辨识黄河流域资源环境系统的主导约束，凸显水资源的牵引作用。

本文优化分析基于2017年基准现状开展，属于比较静态优化，重点刻画在既定经济结构、最终需求条件下，调整城市群间联系结构对资源环境压力和网络鲁棒性的影响。研究采用的地级市多区域投入产出表5年更新一次，本文采用的最新数据止于2017年，数据的时效性存在不足，难以完全反映2017年以后黄河流域生态保护和高质量发展战略深入推进、能源转型以及“双碳”目标约束强化背景下的最新变化。因此，本文结论更适合当年的结构优化方向。但投入产出关系所反映的区域产业分工、资源禀赋约束具有结构惯性和稳定性，本文识别出的资源型输出-综合型承接格局及水资源约束的关键作用，仍可对当前黄河流域跨区域资源环境责任分担提供重要价值。后续研究可在更新的城市间投入产出表基础上，进一步结合情景分析，将经济增长、产业结构调整、技术进步、碳减排目标等因素纳入模型，以预测不同政策下的优化效果。

5　结论与建议

5.1　结论

2002—2017年，黄河流域城市群直接用水总量总体波动较小，能源消耗和碳排放持续增长。水、能、碳强度有所下降，资源利用效率和减排效率有所提升。综合型城市群直接资源消耗和碳排放总量较高，资源型城市群资源环境强度偏高。2017年，黄河流域城市群内部隐含水-能-碳流动呈现上中游资源型城市群输出、中下游综合型城市群承接格局。宁夏沿黄、呼包鄂榆和山西中部城市群为净输出地区，山东半岛、关中平原和中原城市群为净输入地区。黄河流域七大城市群在全国分工中具有水资源输入依赖与能源、碳责任外输并存的特征。

2002—2017年，黄河流域城市群水-能-碳生态网络鲁棒性均呈下降趋势，其中水系统下降幅度最大，为10.91%，城市群间隐含流联系增强并未同步提升网络组织效率。上中游资源型城市群多为控制输出和依赖来源，中下游综合型城市群则更多表现为控制承接和依赖输入，区域间资源环境责任分担不均衡。

多目标优化结果表明，水资源约束是黄河流域水-能-碳系统优化中的关键牵引因素。综合折中方案在降低水、能、碳压力目标的同时提升了系统鲁棒性。优化方案对资源型城市群形成了较明显的减负效应；综合型城市群则表现为流入流出同步收缩，但优化后流入收缩量更大。综合折中方案通过对隐含流进行输出侧惩罚-输入侧激励的双向调节，推动黄河流域水-能-碳责任分担由资源型城市群单向承压，转向资源型城市群减负与综合型城市群需求调节相结合的协同治理模式。

5.2　政策建议

构建基于隐含流责任核算的横向生态补偿机制。突破生产侧核算的责任划分逻辑，兼顾生产端压力与消费端受益，搭建净隐含输出量-单位资源环境价值-调节系数补偿框架。以城市群间隐含流的净输出量为补偿规模基础，分别结合水资源影子价格[39]、能源消费环境外部成本[40]、碳边际减排成本[41]确定单位资源环境价值，并根据区域生态脆弱性设置调节系数，制定差异化补偿标准。衔接财政转移支付、水权和碳排放权交易等政策工具，建立消费者补偿、生产者受偿的横向补偿机制。

落实“四水四定”原则，强化水资源刚性约束。立足水资源对流域水-能-碳耦合系统的牵引作用，践行以水定城、以水定地、以水定人、以水定产。中下游城市群适度优化产业与贸易结构，严控高耗水高污染产业、强化水资源循环利用；上中游城市群重点提升用水效率与水污染治理水平、优化农业用水配置。

因地制宜实施差异化能源转型与碳减排路径。中下游关中平原、中原、山东半岛城市群应强化环境规制约束，倒逼企业清洁生产升级，严控碳排放。中游山西中部、呼包鄂榆城市群加大科技投入，推动煤炭、重化工等传统产业绿色智能化转型；上游兰西、宁夏沿黄城市群聚焦资源高效利用，推进风电光伏等绿色能源开发。

参考文献：

[1]　方创琳.黄河流域城市群形成发育的空间组织格局与高质量发展[J].经济地理，2020，40(6)：1-8.

[2]　赵云，赵新磊，蒋桂芹.黄河流域地表水资源超载状况及治理

措施[J].人民黄河,2023,45(S1):34-35.
[3] 王兆华,邹朋宇,李浩,等.经济-能源-水耦合视角下黄河流域区域协同发展路径[J].中国人口·资源与环境,2022,32(8):10-19.
[4] 宋冬凌,卢文宇.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.
[5] Cheng L,Tian J P,Xu H G,et al.Unveiling the nexus profile of embodied water-energy-carbon-value flows of the Yellow River Basin in China [J]. Environmental Science & Technology, 2023,57(23):8568-8577.
[6] 马海涛,徐楦钫.黄河流域城市群高质量发展评估与空间格局分异[J].经济地理,2020,40(4):11-18.
[7] Wang S G,Chen B.Energy-water nexus of urban agglomeration based on multiregional input-output tables and ecological network analysis:a case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J].Applied Energy,2016,178:773-783.
[8] Liu X L,Vu D,Perera S C,et al.Nexus between water-energy-carbon footprint network:multiregional input-output and coupling coordination degree analysis[J].Journal of Cleaner Production,2023,430:139639.
[9] 黄婕怡.中国省域水—能—碳—经济耦合协调度分析[D].北京:北方工业大学,2024.
[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.
[11] 刘楠,门宝辉,韩笑宇,等.中国水-能-粮-碳耦合协调空间分异及驱动机制[J].水科学进展,2026,37(3):421-435.
[12] 彭焜,朱鹤,王赛鸽,等.基于系统投入产出和生态网络分析的能源-水耦合关系与协同管理研究:以湖北省为例[J].自然资源学报,2018,33(9):1514-1528.
[13] 熊睿.“双碳”目标下黄河流域“能-水-碳”耦合关系和协同利用研究[D].太原:山西财经大学,2023.
[14] Ma X,Zhang T,Shen X,et al.Environmental footprint assessment of China's ceramic tile production from energy-carbon-water nexus insight[J].Journal of Cleaner Production,2022,337:130606.
[15] 杨屹,张园园.呼包鄂榆资源型城市群“水-能-碳”耦合变化及影响因素[J].中国环境科学,2023,43(11):6212-6224.
[16] 刘秀丽,李欣恒,申俊,等.基于系统动力学模型的黄河流域“能-水-碳”系统多政策仿真模拟研究[J].环境科学学报,2026,46(3):504-516.
[17] 叶欣,魏子杰,沈群,等.基于LEAP模型的西北地区能碳预测及低碳发展路径:以青海省某县域为例[J].环境科学,2025,46(11):6796-6805.
[18] Zhang K,Zhang Y,Xi S,et al.Multi-objective optimization of energy-water nexus from spatial resource reallocation perspective in China[J].Applied Energy,2022,314:118919.
[19] Okola I,Omulo E O,Ochieng D O,et al.Multi-objective optimization of the food-energy-water nexus problem:a review of the key concepts and emerging opportunities in objective functions, decision variables, and optimization techniques [J]. Earth's Future,2025,13(4):e2024EF004718.
[20] Du S X,Liang C M,Sun H W,et al.Policy implications of energy-water-carbon emissions nexus based on national policies in China[J].Energy,2025,339:138950.
[21] Jin X Y,Jiang W R,Fang D L,et al.Evaluation and driving force analysis of the water-energy-carbon nexus in agricultural trade for RCEP countries [J]. Applied Energy, 2024, 353: 122143.
[22] 冯仲恺,蒋林佚,牛文静,等.黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(I):特征解析[J].水资源保护,2025,41(5):160-172.
[23] 陆中桂,李优然,姜博艺,等.虚拟水贸易对黄河流域城市群水稀缺的影响[J].人民黄河,2026,48(4):99-106.
[24] 雷涯邻,李东芮,张安,等.消费驱动下黄河流域隐含碳流动特征研究[J].华北水利水电大学学报(自然科学版),2022,43(4):83-90.
[25] 王志强,姜文桓,卢诗月.基于生态网络分析的新疆“水-能-碳”耦合系统特征研究[J].干旱区地理,2023,46(12):2005-2016.
[26] 贾培煜,田玉静,杨洁,等.黄河流域城市群空间结构演变特征及优化策略[J].地理研究,2025,44(7):1908-1924.
[27] Wang Y F,Xu D Y,Zheng H R,et al.An inter-city input-output database distinguishing firm ownership in the Greater China area during 2002-2017[J].Scientific Data,2025,12(1):723.
[28] Zhou F,Bo Y,Ciais P,et al.Deceleration of China's human water use and its key drivers[J].Proceedings of the National Academy of Sciences,2020,117(14):7702-7711.
[29] Chen J D,Liu J L,Qi J,et al.City- and county-level spatio-temporal energy consumption and efficiency datasets for China from 1997 to 2017[J].Scientific Data,2022,9(1):101.
[30] Chen J D, Gao M, Cheng S L, et al. County-level CO_2 emissions and sequestration in China during 1997-2017[J].Scientific Data,2020,7(1):391.
[31] Su B, Ang B, Low M. Input-output analysis of CO_2 emissions embodied in trade and the driving forces: processing and normal exports[J].Ecological Economics,2013,88:119-125.
[32] Ulanowicz R E. Quantitative methods for ecological network analysis [J]. Computational Biology and Chemistry, 2004, 28(5-6):321-339.
[33] Fath B D,Patten B C.Review of the foundations of network environ analysis[J].Ecosystems,1999,2(2):167-179.
[34] Borrett S R,Lau M K,Dray S.enaR:an R package for ecosystem network analysis [J]. Methods in Ecology & Evolution, 2014,5(11):1206-1213.
[35] 王保乾,肖佳慧.长江经济带省际贸易隐含水-能-碳耦合关系研究[J].水利经济,2023,41(1):47-54+61+104-105.
[36] 樊杰,王亚飞,王怡轩.基于地理单元的区域高质量发展研究:兼论黄河流域同长江流域发展的条件差异及重点[J].经济地理,2020,40(1):1-11.
[37] 金凤君.黄河流域生态保护与高质量发展的协调推进策略[J].改革,2019(11):33-39.
[38] Zou J X,Chen B,Wang S G.Ecological network analysis and

optimization of urban water metabolic system in context of energy nexus[J].Applied Energy,2025,388:125700.

[39] Wang Y B,Zhu K,Xiong X,et al.Assessment of the ecological compensation standards for cross-basin water diversion projects from the perspective of main headwater and receiver areas [J].International Journal of Environmental Research and Public Health,2022,20(1):717.

[40] Wang X N,Wang L C,Chen J P,et al.Assessment of the external costs of life cycle of coal:the case study of Southwestern China[J].Energies,2020,13(15):4002.

[41] Tang B J,Ji C J,Hu Y J,et al.Optimal carbon allowance price in China's carbon emission trading system:perspective from the multi-sectoral marginal abatement cost[J].Journal of Cleaner Production,2020,253:119945.

Network characteristics and multi-objective optimization of the water-energy-carbon system in urban agglomerations of the Yellow River Basin

Li Hao[1ab,2], Li Jiyan[1bc], Jia Xinchi[2], Bao Lingyan[2], Liu Xiuli[2]

(1.a.*School of Economics and Management* / b.*Shanxi Key Laboratory of Surface Processes and Resource Ecological Security in Fenhe River Basin* / c.*School of Geographical Sciences*, *Taiyuan Normal University*, *Jinzhong* 030619, *Shanxi*, *China*; 2. *Institute for Resource-Based Economic Transformation and Development*, *Shanxi University of Finance and Economics*, *Taiyuan* 030006, *China*)

Abstract: Against the background of ecological protection and high-quality development in the Yellow River Basin, inter-urban-agglomeration linkages of water, energy, and carbon have become increasingly close, making traditional single-factor and territorially based management approaches insufficient for cross-regional coordinated governance. Taking the seven major urban agglomerations in the Yellow River Basin as the research objects, this study uses inter-city input-output tables for 2002, 2007, 2012, and 2017, together with data on water use, energy consumption, and carbon emissions. An environmentally extended multi-regional input-output model, ecological network analysis, and multi-objective optimization are employed to identify the spatial pattern, network structural characteristics, and structural optimization pathways of embodied water-energy-carbon flows among urban agglomerations in the Yellow River Basin. The results show that: (1) From 2002 to 2017, total direct water use in the urban agglomerations of the Yellow River Basin fluctuated only slightly, whereas energy consumption and carbon emissions increased by 188.45% and 207.60%, respectively. Embodied water-energy-carbon flows exhibited a pattern in which resource-based urban agglomerations served as major exporters, while comprehensive urban agglomerations acted as major receivers. (2) During 2002-2017, embodied water-energy-carbon linkages among urban agglomerations were strengthened, but the robustness of all ecological networks showed a declining trend, with the water system experiencing the largest decrease of 10.91%. Resource-based urban agglomerations were generally characterized as controlling exporters and dependent source areas, whereas comprehensive urban agglomerations were more often controlling receivers and dependent import areas. (3) Water resource constraints are the key factor in optimizing the water-energy-carbon system of urban agglomerations in the Yellow River Basin. The integrated compromise scheme based on water saving, energy saving, and carbon reduction represents the optimal multi-objective optimization solution, as it can reduce water-energy-carbon pressure while improving system robustness. Coordinated water-energy-carbon governance in the Yellow River Basin should strengthen rigid water resource constraints and improve cross-regional responsibility-sharing and ecological compensation mechanisms.

Key words: urban agglomerations in the Yellow River Basin; multi-regional input-output model; water-energy-carbon; ecological network analysis; multi-objective optimization