

黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(I)： 特征解析

冯仲恺^{1,2,3}, 蒋林佚^{1,2,3}, 牛文静⁴, 王煜⁵, 彭少明⁶, 郑小康⁷

(1. 河海大学水灾害防御全国重点实验室, 江苏 南京 210098; 2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098;
3. 河海大学洪涝灾害风险预警与防控应急管理部重点实验室, 江苏 南京 210098;
4. 长江水利委员会长江水文局, 湖北 武汉 430010; 5. 水利部黄河水利委员会, 河南 郑州 450003;
6. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120; 7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 河南 郑州 450003)

摘要:运用多区域投入产出模型,量化了水资源、能源足迹量及其虚拟流动量,进而构建了基于虚拟资源流动的生态网络模型。利用控制分配系数、芬恩循环指数等指标,解析了黄河流域九省区水资源-能源耦合系统复杂特征。结果表明:区域资源足迹与地区人口、经济发展水平密切相关,能源足迹与能源生产量具有较好的空间一致性,而水足迹与水资源禀赋存在失配性;研究区虚拟流转移网络极为复杂,河南、山东等地是虚拟流主要输入地,内蒙古等地则为主要输出地,第一产业、第二产业分别对虚拟水、虚拟能流动影响较大;受产业结构差异与发展水平等因素影响,水资源和能源系统均表现出中上游地区受下游地区控制,同时竞争关系主导了水资源和能源的生态关系;四川、内蒙古第二产业是能源系统关键调控对象,山东第二产业对区域整体产业驱动贡献较大;各省区水资源-能源耦合系统的资源循环效率和稳定性均呈增长趋势,其中水资源系统稳定性低于能源系统,应适当优化涉水产业结构以提高风险抵抗能力。

关键词:水资源-能源耦合系统;多区域投入产出模型;生态网络模型;黄河流域

中图分类号:TV213.4 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2025)05-0160-13

Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (I): characterization analysis//FENG Zhongkai^{1,2,3}, JIANG Linyi^{1,2,3}, NIU Wenjing⁴, WANG Yu⁵, PENG Shaoming⁶, ZHENG Xiaokang⁷ (1. State Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 3. Key Laboratory of Soil and Water Process in Watershed, Hohai University, Nanjing 210098, China; 4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission, Wuhan 430010, China; 5. Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources, Zhengzhou 450003, China; 6. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China; 7. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd., Zhengzhou 450003, China)

Abstract: The multi-regional input-output model was used to quantify the water and energy footprints and their virtual flows, and an ecological network model based on virtual resource flows was constructed. The complex characteristics of the water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin were analyzed using indicators such as control allocation index and Finn cycle index. The results indicate that the regional resource footprint is closely related to the population and economic development level of the region. The energy footprint has good spatial consistency with energy production, while there is a mismatch between water footprint and water resource endowment. The virtual flow transfer network in the research area is extremely complex, with Henan, Shandong and other places being the main input areas for virtual flow, and Inner Mongolia and other places being the main output areas. The primary and secondary industries have a significant impact on virtual water and virtual energy flow, respectively. Affected by factors such as differences in industrial structure and development level, both water resources and energy systems show that the upstream and midstream regions are controlled by downstream regions, while competition dominates the ecological relationship between

基金项目:国家重点研发计划项目(2022YFC3202300);国家自然科学基金项目(52379009,52441901);江苏省自然科学基金优秀青年基金项目(BK20240189);北京江河水利发展基金会—水利青年科技英才项目(JHYC202310);湖北省自然科学基金三峡联合基金项目(2023AFD203);水灾害防御全国重点实验室自主研究项目(5240152E2)

作者简介:冯仲恺(1988—),男,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail:myfellow@163.com

water resources and energy. The secondary industry in Sichuan and Inner Mongolia is a key regulatory target of the energy system, while the secondary industry in Shandong contributes significantly to the overall industrial drive of the region. The resource cycle efficiency and stability of the water resource energy coupling system in the provinces and regions are showing an increasing trend, with the stability of the water resource system being lower than that of the energy system. Therefore, it is necessary to optimize the water related industry structure appropriately to improve risk resistance capabilities.

Key words: water-energy coupling system; multi-regional input-output model; ecological network model; the Yellow River Basin

水资源和能源是人类生存的基石战略资源,直接关系到经济社会可持续发展^[1]。联合国《可持续发展议程》指出,要确保为所有人提供可持续的水资源和现代能源,积极应对气候变化。水资源与能源耦合关系一直是国内外研究热点。早期研究多聚焦单一水资源或能源系统评估,如水资源系统评价^[2-3]、能源系统优化^[4-5]等,但忽视了水-能交互作用,难以揭示资源能源协同约束机制。受人类活动和气候变化影响,流域水资源、能源复杂性和随机性日益凸显^[6],单一系统评估无法满足实际需求,学者转向二元系统协同优化,如水-能消耗过程追踪、协同效应量化等^[7-8],但多局限于单一区域或行业,对跨区域虚拟资源流动的刻画不足。近年来,研究重点逐步转为水资源-能源多尺度耦合建模,通过生态网络模型等方法解析多维要素的级联效应与反馈机制,但忽视了贸易隐含的间接资源胁迫,未能充分量化虚拟资源流动及系统特征。

生态网络分析 (ecological network analysis, ENA) 通过构建拓扑指标 (如芬恩循环指数) 来量化系统内物质、能量和信息的传递路径,可有效挖掘跨部门资源流动的级联效应与隐性依赖关系,成为辨识复杂系统结构和功能特征的有力工具^[9]。多区域投入产出 (multi-regional input-output, MRIO) 模型通过追踪区域间产业链关联,为虚拟资源转移路径量化提供了数据基础。近年来,两类方法的交叉融合成为破解复杂系统管理难题的新范式,如资源足迹与虚拟资源贸易特征解析^[10-12]、资源足迹与虚拟资源流动驱动要素辨识^[13-15]、面向资源足迹和虚拟资源的区域资源评价与管理^[16-19]。因此,本文以黄河流域九省区为研究对象,综合运用 MRIO 和 ENA,量化水资源-能源足迹及虚拟流动量^[20-21],构建虚拟资源生态网络模型,并运用控制分配指数、网络效用矩阵、拉动力/推动力指数、芬恩循环指数等指标,从不同层面深入解析系统特征,以期为黄河流域生态保护和高质量发展等国家重大战略提供理论支撑。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

本文研究区涵盖甘肃 (GS)、山东 (SD)、山西

(SX)、内蒙古 (IM)、河南 (HA)、四川 (SC)、陕西 (SN)、甘肃 (GS)、青海 (QH)、宁夏 (NX) 9 个黄河流域的省级行政区。黄河流域地形地貌复杂,横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原、华北平原等 4 大地貌单元;多年平均水资源总量为 647 亿 m³,综合水资源开发利用率高达 80%,远超 40% 的生态警戒线^[22]。其中,中上游大部分地区气候干旱少雨,多年平均降水量和水资源总量分别为 446 mm、647 亿 m³;下游地区水沙关系失衡,泥沙淤积、河道摆动、超标准洪水等问题突出,滩区仍有近百万人受洪水威胁。作为我国重要的能源区和粮食主产区,黄河流域九省区风、光、土地资源丰富,形成了以农业生产和能源开发为主的经济社会发展方式,在国家发展战略中具有举足轻重的地位^[23]。由于区域水资源短缺严重且时空分布不均,水土流失、生态脆弱等问题突出,经济社会发展模式与水资源承载力不相适应,加之气候变化影响,水资源供需矛盾日益突显^[24],亟须开展黄河流域九省区水资源-能源系统耦合特征研究,助力区域高质量发展。

1.2 数据来源

投入产出表是本文开展研究的基础,来自中国碳核算数据库 (<https://www.ceads.net.cn>) 收录的 2012 年、2017 年全国投入产出表以及人大经济论坛收录的 2007 年全国投入产出表;用水数据来自各省区水资源公报和统计年鉴;能耗数据来自《中国能源统计年鉴》;各部门生产总值数据来自《中国工业统计年鉴》、各省社会经济发展统计公报。需要说明的是,投入产出表每 5 年编制 1 次,将国民经济体系划分为 42 个部门,而水资源公报和能源统计年鉴没有对应部门的用水数据和能耗数据,因此根据国家统计局发布的《三次产业划分规定》标准,将投入产出表中 42 个部门合并为 7 个部门^[20],同时根据各部门的生产总值线性分配用水量 and 能耗量^[12,20];此外,由于数据资料有限,本文仅考虑黄河流域九省区之间的水资源、能源流动转移,暂未考虑流域外其他关联省区的交互。

2 研究方法

2.1 总体框架

图 1 为足迹与虚拟流生态网络模型示意图,以

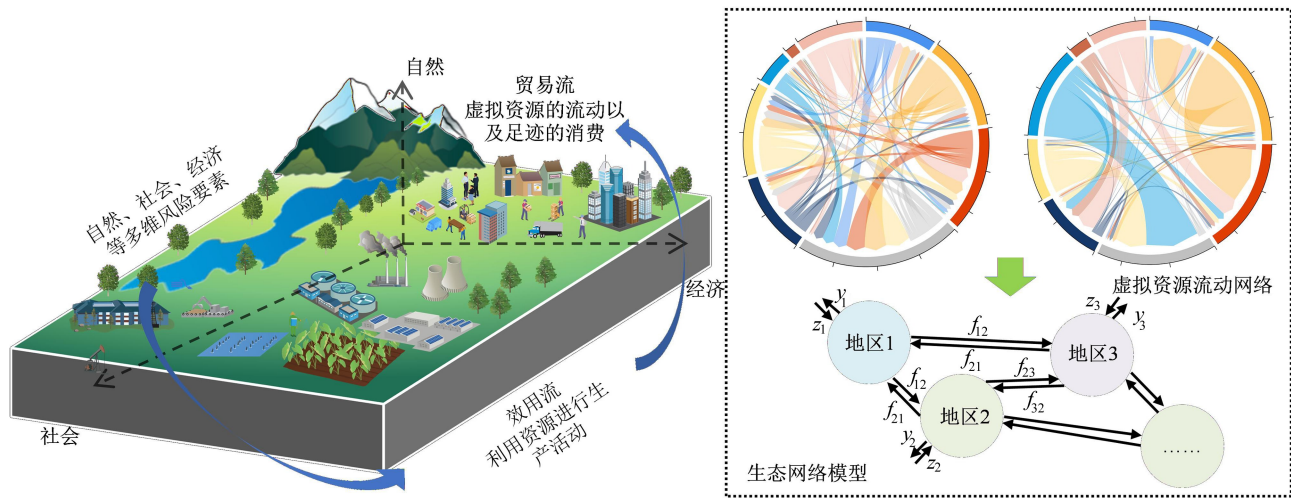


图 1 足迹与虚拟流生态网络模型示意图

Fig. 1 Schematic diagram of footprint and virtual flow ecological network model

水资源为例对相关概念进行界定,涉及足迹和虚拟资源两个概念:足迹指特定时空范围内经济系统通过最终需求引致的资源消耗总量^[25];虚拟资源指通过生产链嵌入形成的资源要素隐性载体,表征贸易活动引致的跨域资源再分配^[11]。足迹和虚拟资源的内涵可通过 3 个层面解释:水作为自然资源,在自然-人工复合作用下形成实体水循环,形成“物理流”;水作为生产原料,会在经济生产活动中以直接或间接方式消耗实体水资源,并以虚拟水的形式嵌入到产品中,形成“效用流”;受市场配置作用影响,产品及其内嵌虚拟水会在不同区域间转移,形成“贸易流”,当产品在某地被消费时对应的虚拟水被称为此区域的水足迹。同理,产品全链条过程也会消耗实体或虚拟能源^[26],水资源、能源会通过经济活动等方式实现跨部门、跨区域耦合流动^[27],因而运用水足迹、虚拟水分别表征消费端驱动的全周期

耗水量和生产端引致的隐性转移量,运用三级消耗指标体系(直接/间接/完全消耗量)揭示产业链资源流动规律。其中,直接消耗量表示终端消费部门生产活动产生的显性资源^[28],通过直接消耗系数计算^[29];完全消耗量表示全产业链水资源消耗总量^[28],通过完全消耗系数计算^[29];间接消耗量表示中间生产部门通过供应链传递的隐性资源,通过完全消耗量减去直接消耗量得到。

在此基础上,采用图 2 所示框架开展研究,将黄河流域九省区水资源-能源耦合系统视为水资源开发调配、能源生产消费等全周期的动态交互关系及其协同优化机制的复杂网络系统,包括节点(如各省区三次产业部门)、流(如各产业部门的资源流动关系)等要素。具体步骤为:①采用 MRIO 模型量化流域水资源、能源足迹及其虚拟流动;②通过 ENA 建立加权有向图模型,其中节点表征省域产业部门,

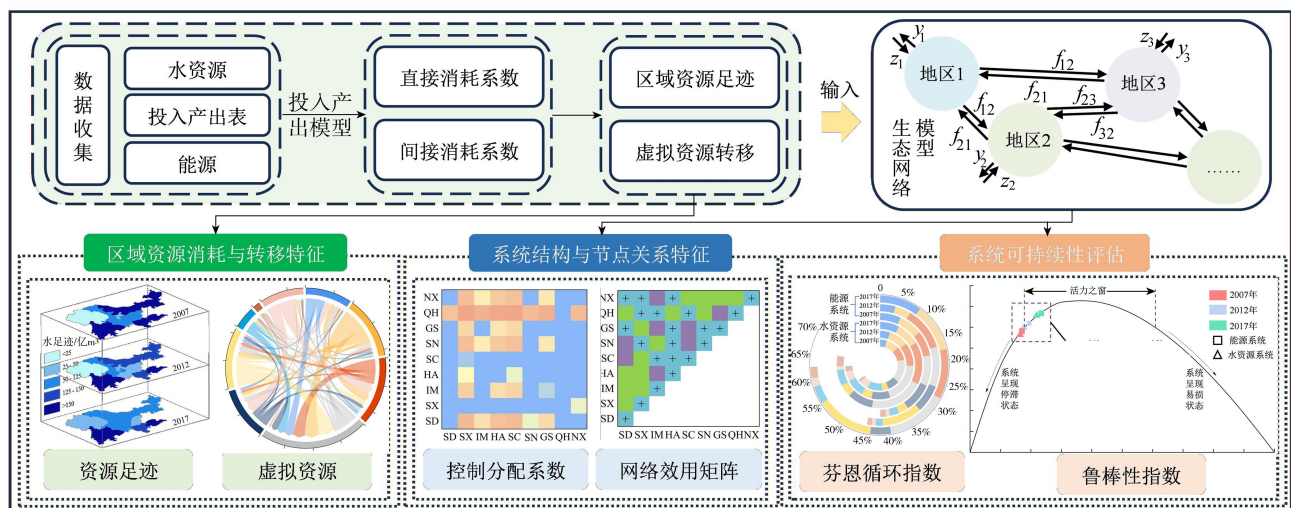


图 2 研究框架

Fig. 2 Research framework

边权映射资源流动强度;③构建鲁棒性指数等指标参数,实现流域九省区水资源-能源耦合系统多层次(产业-区域-流域)、多维度(流量-结构-效率)的特征解析。

2.2 MRIO 模型

MRIO 模型^[15]是量化足迹和虚拟流的流行方法,通过追踪不同区域特定部门消费活动产生的资源流动,揭示虚拟资源在不同区域的动态变化过程。MRIO 模型的资源总投入量恒等于总产出量,表达式为

$$X_i = Z_i + Y_i \tag{1}$$

其中 $Z_i = A_i X_i$
式中: X_i 为部门 i 的资源投入量; Z_i 为部门 i 的中间使用量; Y_i 为部门 i 的最终消耗量; A_i 为部门 i 的直接消耗系数,代表各部门单位产出需要投入的直接资源。此时,将所有部门对应的数据组成矩阵,可将式(1)表示为

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

式中: X 为资源投入量矩阵; Y 为最终消耗量矩阵; A 为直接消耗系数矩阵; I 为单位矩阵。特别地,水资源、能源的资源足迹计算公式^[30]为

$$F_{d,w,i} = A_{w,i} Y_i \tag{3}$$

式中: $F_{d,w,i}$ 为部门 i 对资源 w (水资源、能源)的资源足迹矩阵; $A_{w,i}$ 为部门 i 对资源 w 的直接消耗系数矩阵。

为反映水资源和能源的完全消耗,引入 Leontief

逆矩阵追溯区域贸易隐含的间接资源流动,表达式为

$$F_{t,w,i} = A_{t,w,i} Y_i \tag{4}$$

其中 $A_{t,w,i} = \text{diag}(A_{w,i})(I - A)^{-1}$
式中: $F_{t,w,i}$ 为部门 i 消耗资源 w 的完全资源消耗量矩阵; $A_{t,w,i}$ 为部门 i 对资源 w 的完全消耗系数矩阵, $\text{diag}(\cdot)$ 表示对角化处理。

2.3 ENA

ENA 经历了从自然生态系统研究到社会经济系统拓展的演进过程。早期聚焦于生态系统内部能量流动与物质循环,随着复杂性科学的发展,其应用范畴逐步延伸至社会经济等复杂系统研究领域^[9]。ENA 运用拓扑建模技术将系统解构为节点-流-网络三位一体的图论模型,定量解析系统内物质、能量、信息的交互关系,识别系统要素的整体性、关联性和层级性特征。ENA 主要包括:①节点,即具备输入输出能力的基本单元;②流,即表征要素间具有方向性和强度值的交互关系;③网络结构,即通过节点间的拓扑连接形成具有耗散、时变等复杂特征的复杂系统。

图 3 为黄河流域九省区生态网络模型示意图,在区域虚拟资源流动研究中,省级行政单元的三次产业部门构成网络节点,节点间的资源输入-输出关系形成具有方向性的流动网络,其中各节点既是前向流通的终端接收资源输入,也是后向流通的起点输出资源,这种双向流动特性使得节点间形成耦合网络。因此,可采用 ENA 揭示资源的区间流动特

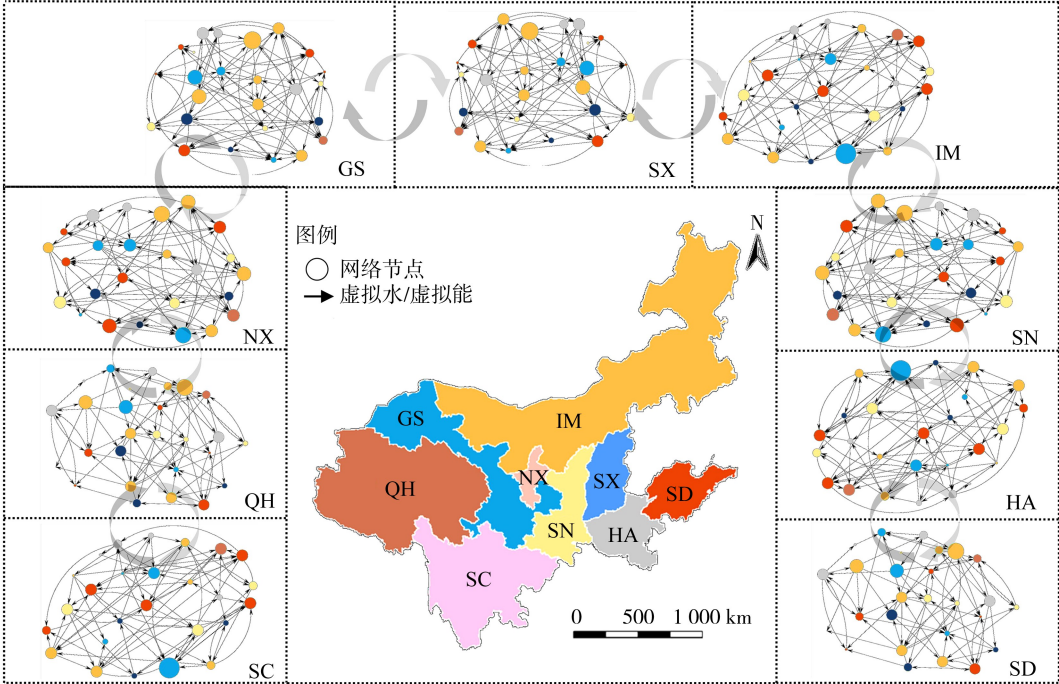


图 3 黄河流域九省区生态网络模型示意图

Fig. 3 Schematic diagram of ecological network model for nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

征,生态网络模型表达式为

$$\mathbf{G} = \mathbf{f}_{ij}/\mathbf{T}_j \quad (5)$$

$$\mathbf{G}' = \mathbf{f}_{ji}/\mathbf{T}_i \quad (6)$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{G}^0 + \mathbf{G}^1 + \mathbf{G}^2 + \cdots + \mathbf{G}^n = (\mathbf{I} - \mathbf{G})^{-1} \quad (7)$$

$$\mathbf{N}' = \mathbf{G}'^0 + \mathbf{G}'^1 + \mathbf{G}'^2 + \cdots + \mathbf{G}'^n = (\mathbf{I} - \mathbf{G}')^{-1} \quad (8)$$

式中: $\mathbf{T}_i$ 、 $\mathbf{T}_j$ 为节点 i 、节点 j 的虚拟资源传输总量矩阵; $\mathbf{f}_{ij}$ 为从节点 j 流向节点 i 的虚拟资源流量; $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{G}'$ 为前向、后向效率矩阵,表示一个节点对另一个节点的输入、输出的贡献流比例,对其进行积分得到向前、向后积分效率矩阵 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{N}'$,即表示节点间进行 n 次交互后呈现的最终状态。 $\mathbf{G}$ 、 $\mathbf{G}'$ 、 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{N}'$ 表征节点受到的前向和后向影响,是生态网络模型的中间变量^[31],用于计算后续生态网络模型特征参数。

2.4 系统特征参数

2.4.1 控制分配系数

控制分配系数能够^[32]量化网络节点的控制程度及其在资源管理和分配过程中的贡献程度,便于确定关键调控节点,其值越大,则表明该节点对资源的调控能力越强。计算公式为

$$C = \begin{cases} 1 - n_{ij}/n'_{ij} & n_{ij}/n'_{ij} < 1 \\ 0 & n_{ij}/n'_{ij} \geq 1 \end{cases} \quad (9)$$

式中: C 为控制分配系数; n_{ij} 、 n'_{ij} 分别为 $\mathbf{N}$ 、 $\mathbf{N}'$ 的元素。

2.4.2 网络效用矩阵

本文通过网络效用矩阵来表达两个节点之间的相对利益关系,包括共生、竞争、捕食和依赖 4 种关系^[9]。其中,共生关系表示两节点均能从合作互动中受益,实现了互利共赢;竞争关系表示两节点经过合作均未能获益;捕食和依赖是孪生关系,捕食(依赖)关系表明两节点在贸易活动中仅一方获益,获益方称为捕食者,另一方获得消极效应,称为依赖者,依赖者往往需要捕食者实现产品输出。节点间的相对利益关系的表达式为

$$\mathbf{D} = (d_{ij}) = (f_{ij} - f_{ji})/\mathbf{T}_i \quad (10)$$

$$\mathbf{U} = (u_{ij}) = \mathbf{D}^0 + \mathbf{D}^1 + \mathbf{D}^2 + \mathbf{D}^3 + \cdots + \mathbf{D}^n = (\mathbf{I} - \mathbf{D})^{-1} \quad (11)$$

式中: $\mathbf{D}$ 为直接效用强度矩阵; $\mathbf{U}$ 为网络效用矩阵。网络效用矩阵元素的符号反映节点间的相对利益关系, $\text{sign}(u_{ij}, u_{ji}) = (+, +)$ 表示共生关系; $\text{sign}(u_{ij}, u_{ji}) = (-, -)$ 表示竞争关系; $\text{sign}(u_{ij}, u_{ji}) = (-, +)$ 表示节点 j 掠夺节点 i 的资源,即节点 j 被节点 i 控制; $\text{sign}(u_{ij}, u_{ji}) = (+, -)$ 表示节点 i 掠夺节点 j ,即节点 i 被节点 j 控制。

2.4.3 网络层次分析

生态网络中的拉动力和驱动力可以有效反映不

同节点之间的层级关系^[32],其中拉动力代表节点从其他节点接收资源的能力,其值越大,表明该节点的消费能力越强,可有效提升流域资源流通效率;驱动力代表节点为其他节点提供资源和诱导变化的能力,其值越大,表明该节点具有较强的供给能力和优越的产业结构。计算公式为

$$P_{w,ji} = \sum_{i=1}^n h_{ji} / \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n h_{ji} \quad (12)$$

$$D_{w,ji} = \sum_{j=1}^n h_{ij} / \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^n h_{ij} \quad (13)$$

其中

$$(h_{ji}) = \text{diag}(\mathbf{T})\mathbf{N}'$$

式中: $P_{w,ji}$ 、 $D_{w,ji}$ 分别为节点 i 对节点 j 的拉动力、驱动力; h_{ij} 、 h_{ji} 为中间变量; $\mathbf{T}$ 为总产出量矩阵。

2.4.4 芬恩循环指数

采用芬恩循环指数^[33]来量化区域的资源循环效率,其值越大,表示节点足迹的流入、流出越活跃,在网络中承担重要的贸易枢纽功能,能够收集大量原料被并进行深加工和产品销售,提升资源的循环利用效率。计算公式为

$$F_c = \frac{1}{T_{ST}} \sum_{i=1}^n \frac{(n_{ii} - 1)T_i}{n_{ii}} \quad (14)$$

其中

$$T_{ST} = \sum_{i=1}^n T_i$$

式中: F_c 为芬恩循环指数; T_{ST} 为系统总流量。

2.4.5 鲁棒性分析

系统鲁棒性利用流量效率和冗余度来反映系统可持续发展状态^[34],详细描述参见 Fath^[35]的研究,可由系统上升性和发展能力计算得到,鲁棒性指数越大,表明系统抗干扰能力越强,稳定性越强。计算公式为

$$S_R = -\frac{A_F}{C_F} \ln\left(\frac{A_F}{C_F}\right) \quad (15)$$

其中

$$A_F = T_{ST}^2 \sum_{i,j} \frac{f_{ij}}{T_{ST}} \ln\left(\frac{f_{ij}T_{ST}}{T_i T_j}\right)$$

$$C_F = -T_{ST}^2 \sum_{i,j} \frac{f_{ij}}{T_{ST}} \ln\left(\frac{f_{ij}}{T_{ST}}\right)$$

式中: S_R 为系统鲁棒性值; A_F 、 C_F 分别为系统的上升能力、可持续发展能力。

3 结果与分析

3.1 黄河流域九省区水资源-能源足迹时空规律

图 4 为黄河流域九省区水资源-能源禀赋与足迹。由图 4 可见,研究区在水足迹方面有 3 个特征:①总量增加,黄河流域九省区水足迹总量从 2007 年的 870 亿 m^3 增长至 2017 年的 900 亿 m^3 ,整体呈增加趋势;②空间分异,以 2017 年为例,山东、四川和

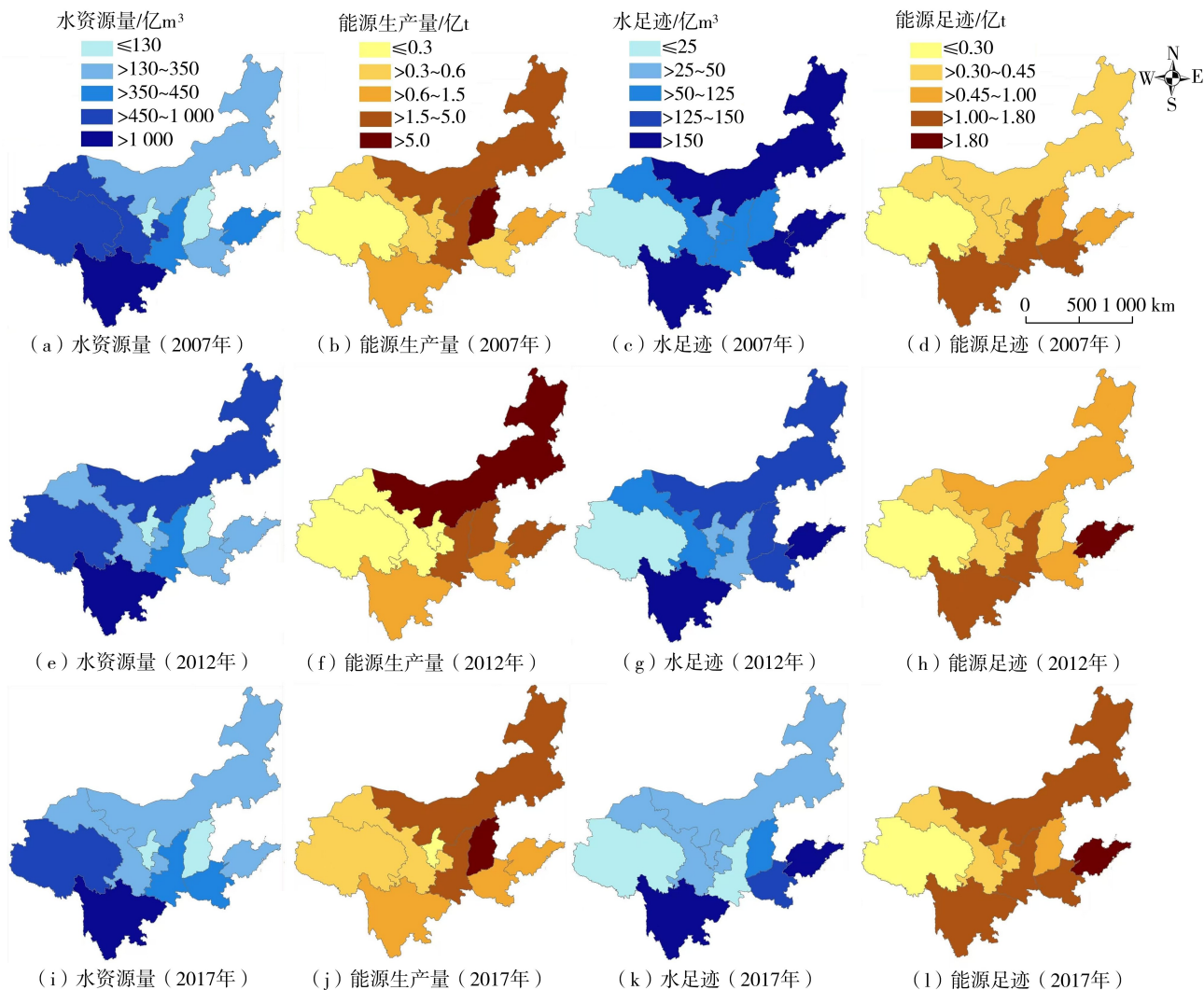


图4 黄河流域九省区水资源-能源禀赋与足迹

Fig. 4 Water-energy endowment and footprint in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

河南3省约占研究区的50%,而宁夏、青海的水足迹较小,不及甘肃的50%(88亿 m^3);③资源失配,水足迹分布格局与水资源禀赋格局失配性较大,山东、河南、山西和宁夏等地仅拥有研究区15%的水资源,但水足迹占比高达47%,而青海水资源禀赋较好,但其经济发展受限,水足迹较小。在能源足迹方面,研究区总体呈上升趋势,空间分布格局与水足迹类似,山东、四川和河南是能源足迹大省,其中,山东2017年为3.5亿t(标准煤当量,下同),超过研究区的30%;能源生产量与能源足迹具有较好的空间一致性,如研究区2012年能源生产总量23万t,约占全国69%,其中山西、内蒙古等能源生产中心占比约60%,能源足迹量较大。此外,能源足迹与地区人口、经济发展水平密切相关,如2017年山东、河南、四川3省总人口和GDP分别为2.78亿人和1.4万亿元,约占研究区总量的66%和63%,庞大的人口规模增加了地区资源消费量,先进的生产力与

发达的经济水平利于生产资源密集型产品,使得能源足迹由西侧向东侧逐步集中。

3.2 黄河流域九省区的虚拟水、能流动特征

图5、图6为黄河流域九省区虚拟水、虚拟能流动格局,图中圆弧颜色与线条颜色一致表示虚拟流输出、不一致则表示输入。由图5、图6可见,在空间层面,对虚拟水而言,黄河流域九省区整体流动特征和分布格局未发生明显变化,河南、甘肃、内蒙古是虚拟水流动量较大的地区。其中,内蒙古2017年向其他省区(如山西、山东)输出27亿 m^3 虚拟水,约占黄河流域九省区总输出的37%;河南2017年接受研究区约30%的虚拟水,占比最高,主要由甘肃和陕西供应。对虚拟能而言,宁夏、山西和内蒙古是较大的虚拟能输出地,2017年达到4135万t,占研究区的53%,河南和山东为较大的虚拟能接受地,2017年达到4233万t,约占研究区的50%。第一产业为虚拟水流动格局的主要驱动产业,而且呈增大趋势,占有产业的比例从2007年72%提升至

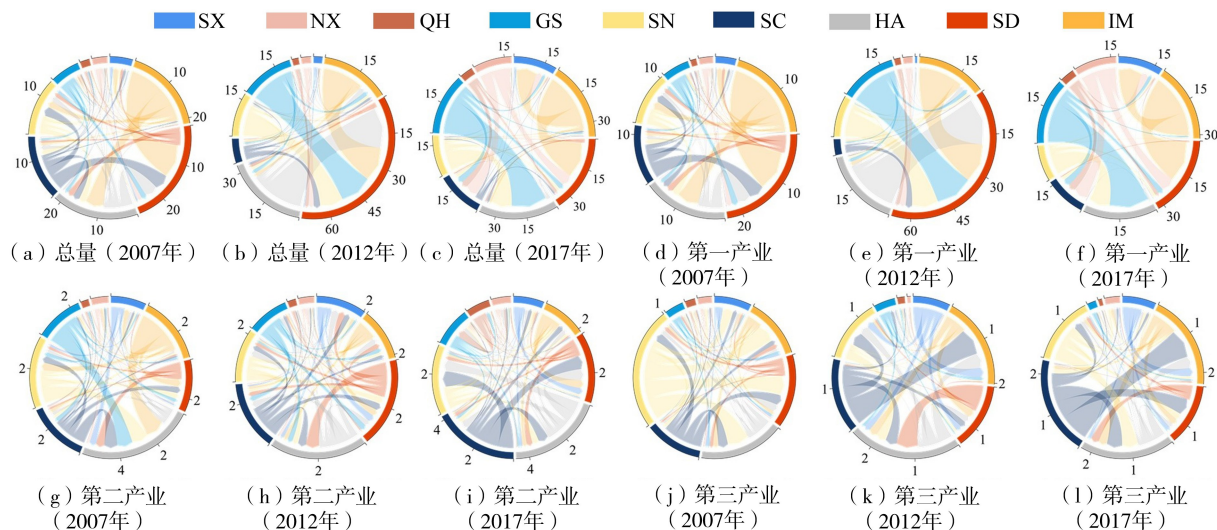


图 5 黄河流域九省区虚拟水流动格局(单位:亿 m^3)

Fig. 5 Virtual water flow pattern in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin(unit: 10^8 m^3)

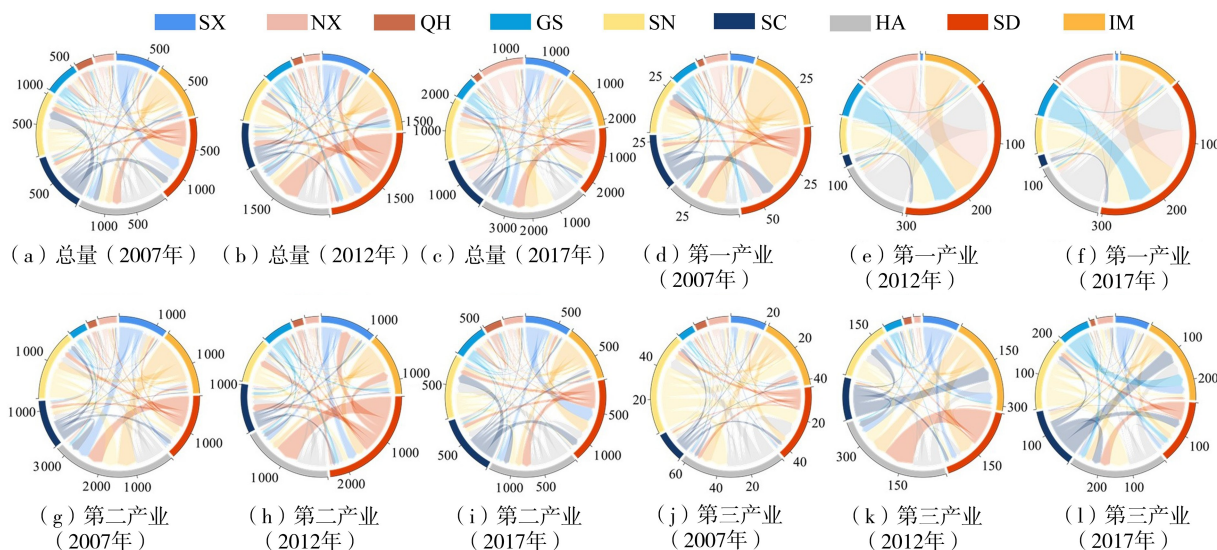


图 6 黄河流域九省区虚拟能流动格局(单位:亿 t)

Fig. 6 Virtual energy flow pattern in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin(unit: 10^8 t)

2017 年 82%;第二产业是虚拟能流动格局的主要驱动产业,2017 年对应流动量达 6 168 万 t ,约占所有产业的 73%;第三产业对虚拟水、虚拟能影响较小,但对资源空间配置的影响逐年增强,对应的虚拟水、能资源占比从 2007 年 0.1%、3.6% 分别增长至 2017 年 4%、8%。从上述分析可知,黄河流域九省区虚拟流转移网络极为复杂,究其原因,农业是水资源消费大户,2017 年黄河流域九省区农业用水量达 824 亿 m^3 ,农业所消耗的水资源会以虚拟水的形式嵌入到商品,通过市场交易被转移到其他省区,导致第一产业成为虚拟水输出主要驱动^[15];工业是能源消费大户,2017 年黄河流域九省区工业能耗达 10.3 亿 t ,占总能耗的 78%,导致第二产业成为虚拟能输出主要驱动。因此,需要结合各省区实际情况,降低资源消耗或调整行业结构,缩小虚拟资源缺口,

缓解资源供给压力^[36]。

3.3 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统节点关系

节点关系分析包括网络控制分析和生态关系分析。图 7 为黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的控制分配系数,其数值大表明横坐标是纵坐标重要的虚拟流供给地。由图 7(a)~(f) 可见,在水资源系统中,受农业种植及农产品输出影响,河南、四川对其他省区的虚拟水呈普遍控制;受地理区位等因素影响,青海和宁夏受到其他省区的普遍控制。能源系统控制分配系数与水资源系统相似,均存在强控制依赖关系的节点。以 2017 年为例,四川水资源对其他 8 省区均具有普遍控制,其中对青海的控制最大,控制分配系数约为 0.88,而其他省区又对青海的虚拟水有一定控制作用,因此将四川作为关

控制分配系数
0 0.2 0.4 0.6 0.8 1.0

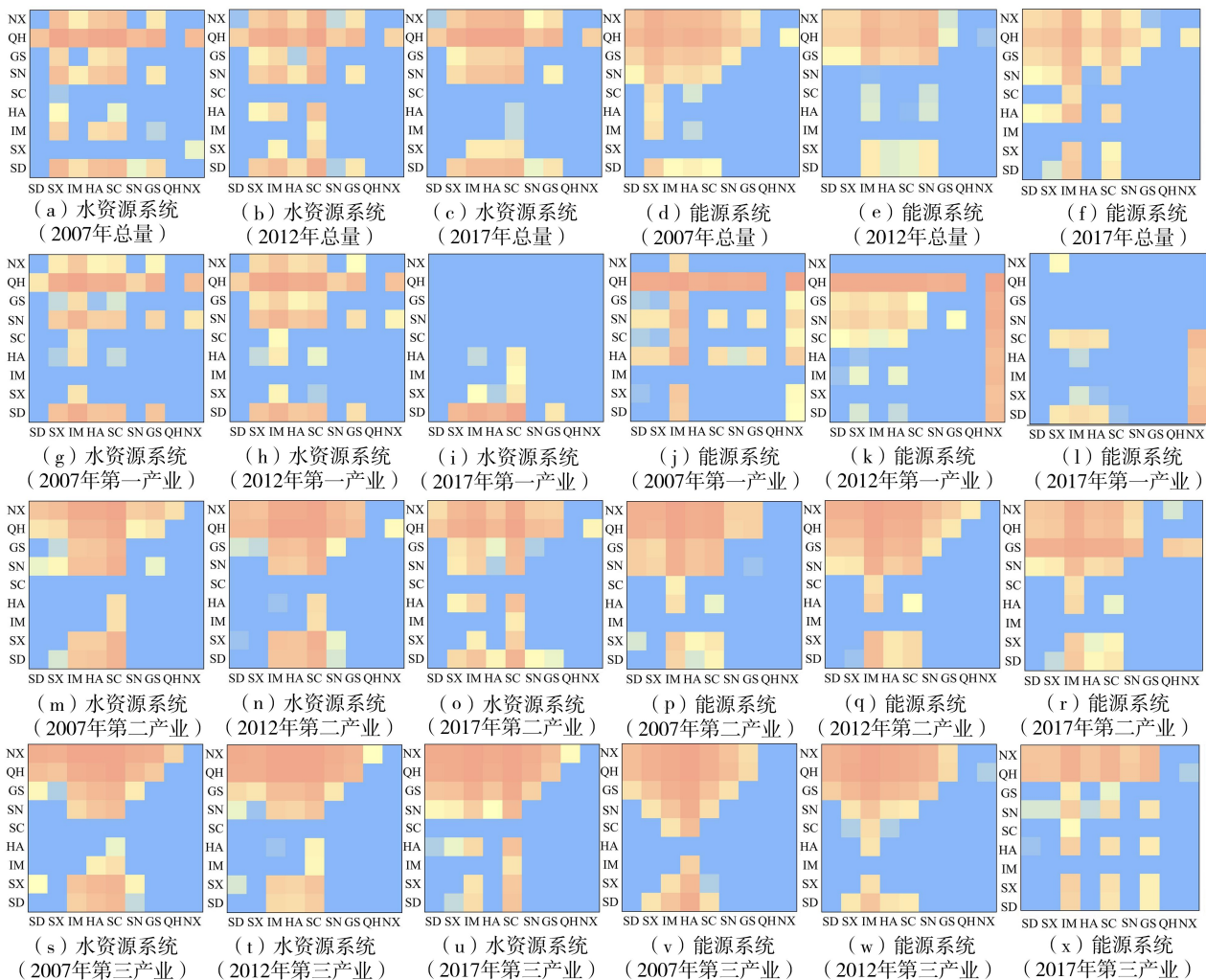


图7 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的控制分配系数

Fig. 7 Control allocation indexes of water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

键节点进行调控,能够促进流域水资源协同优化;能源系统同理,山东对其他省区均有一定控制,可对山东高能耗行业和产品进行科学调控,提升能源分配效率。此外,水资源、能源系统均表现出中上游地区受下游地区控制,究其原因,中上游地区海拔较高、社会经济发展水平受限,需要购置下游经济发达地区加工完成的资源密集产品,导致其虚拟资源的输入更易受到下游地区的控制。图7(g)~(x)为各省区不同产业的节点关系,可以看出,第一产业节点控制关系的时序变化较大,2017年水资源、能源的控制性节点数量较2012年和2007年显著减少,仅有河南、内蒙古和山西对山东的控制关系得以保持;第二产业节点关系时序稳定性较好,其中四川水资源充沛、内蒙古能源丰富,二者对其他省区的水资源、能源分别具有控制性作用,建议水资源、能源系统应重点关注对四川、内蒙古第二产业调控;从第三产业看,青海、宁夏的水资源和能源资源均受其他省区控制,原

因在于两省海拔较高,服务业、交通运输等行业发展受限,高度依赖外地提供高附加值的服务和产品,导致两省是第三产业的脆弱节点,需加强与其他省区的合作,同时构建更为健全、公平的资源分配制度。

理解不同省区的生态关系对研究区的资源管理至关重要,本文利用网络效用矩阵来识别两个省区的生态关系,包括共生、竞争、捕食与依赖关系。图8中紫色表示纵坐标为捕食者,黄色表示纵坐标为依赖者,“+”表示共生关系。由图8(a)~(f)的总体生态关系可见,竞争关系主导了黄河流域九省区水资源系统,并且随时间增加日益凸显,而共生关系持续减少,2007年竞争关系和共生关系比例分别为37%和32%,到2017年,竞争关系增加至57%,共生关系减少至2%,表明不同省区水资源存在较大利益冲突,能源系统也呈现类似的趋势。捕食与依赖关系在水资源系统较为明显,如甘肃对青海呈捕食关系,表明青海消耗本地水资源为甘肃提供原材料,

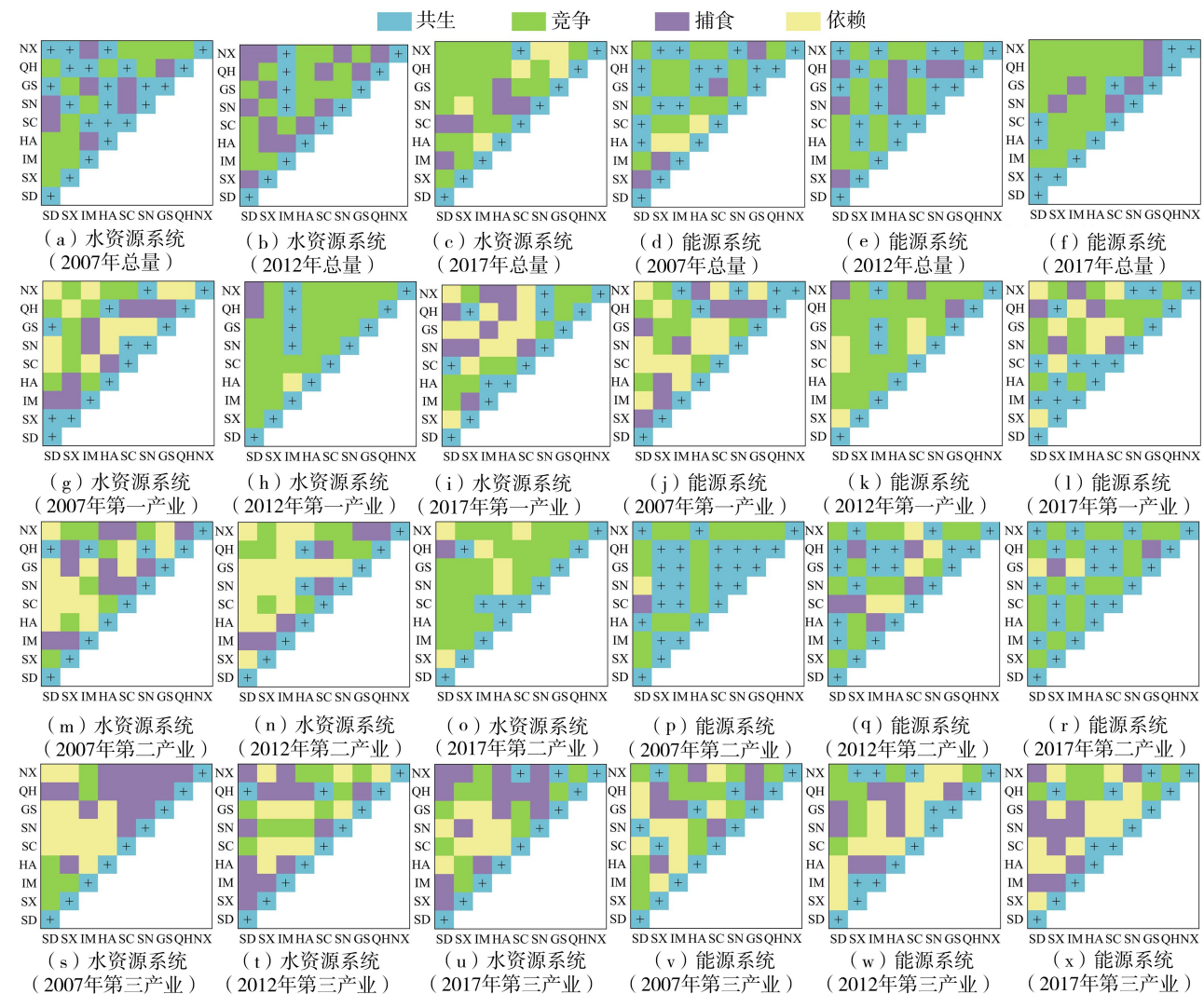


图 8 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的生态关系

Fig. 8 Ecological relationship of water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

而受贸易政策、市场利益驱动等因素影响,甘肃生产的产品并未流通到青海。此外,不同省区和产业的网络效用和生态关系存在差异,需要调整产业结构来促进资源的协同优化。例如,四川、宁夏 2017 年水资源系统第一和第二产业均呈现捕食与依赖关系,其中四川为捕食者,宁夏为依赖者;而第三产业与水资源系统总体均为共生关系,表明宁夏通过第三产业贸易在一定程度上补偿了与四川第一、第二产业贸易的不平衡收益,未来可加强第三产业贸易合作,促进水资源-能源耦合系统的协同发展。

3.4 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统网络层次

探明网络层次有助于辨识各省区的产业结构,促进优势互补。图 9 为黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的生态网络层次分析结果,图中外环为驱动力,内环为拉动力,圆环弧度越大,表示该节点拉动力或驱动力越大,图中数据为排名前两位的驱

动力值。由图 9 可见,黄河流域九省区生态网络层次呈不规则分布,各省区通过贸易网络对其他省区的拉动、驱动作用不尽相同。由于能源储量丰富、产业体系完整,黄河流域九省区能源系统的拉动力超过驱动力,平均达到 0.65,水资源系统的拉动力小于驱动力,仅为 0.33,表明研究区能源系统以供给和输出为主,而水资源以购进与输入为主,而且其格局随时间逐步凸显,如 2017 年能源系统拉动力达到 0.72,水资源系统驱动力达到 0.49。其中,山东的拉动力最大,特别是第二产业和第三产业,分别达到了 0.48 和 0.37,表明山东具有很强的消费能力和产品输出能力,使得第二产业和第三产业具有较强竞争优势,需要发挥其领军作用,促进黄河流域九省区贸易发展和资源流通;相反,青海、宁夏和内蒙古等省区拉动力、驱动力都较小,其中第一产业拉动力较大,达到 0.24,而第二、第三产业的拉动力和驱动力较小,表明经济体量偏小,自给能力较弱,亟须产

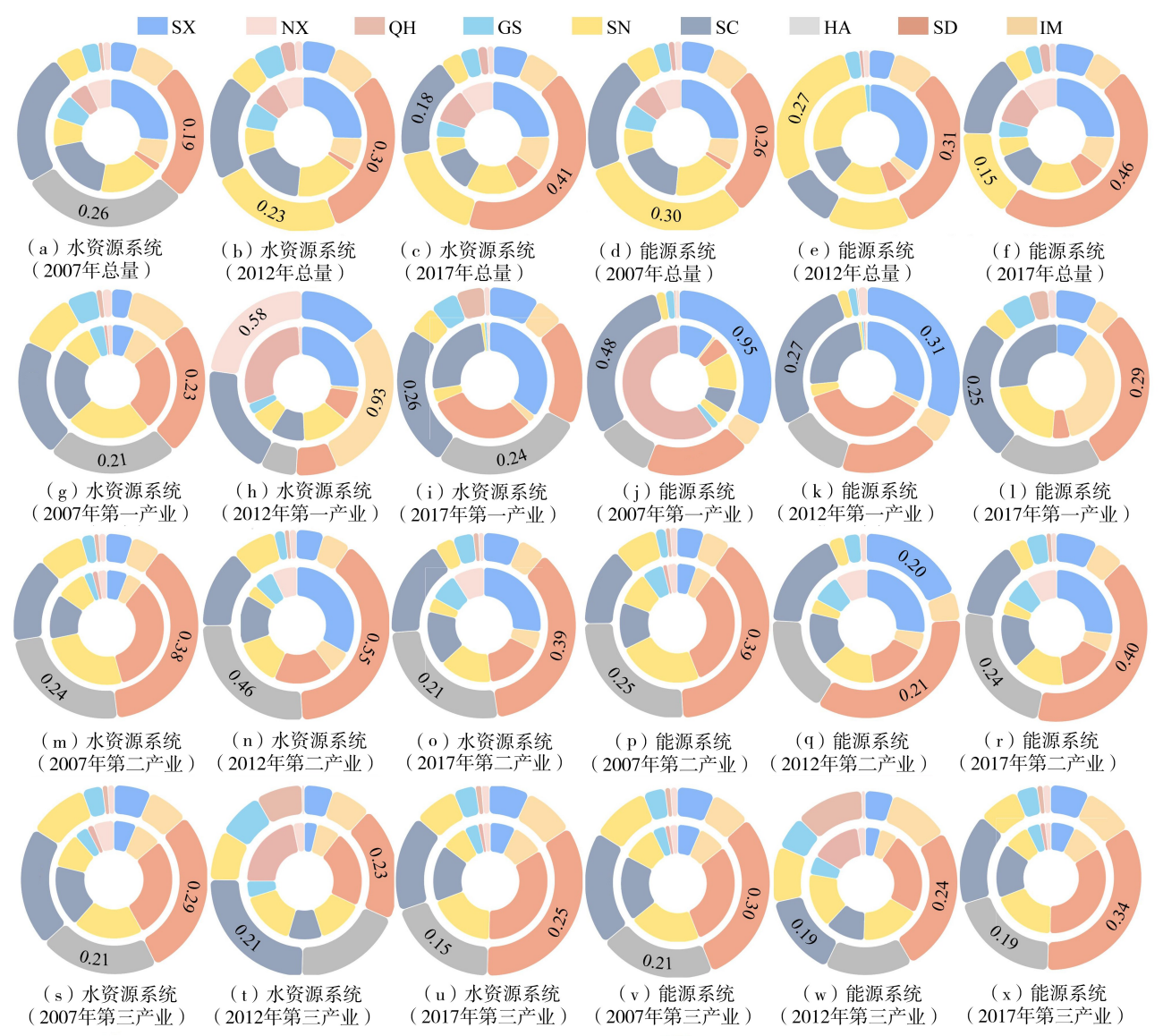


图9 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的生态网络层次分析结果

Fig. 9s Ecological network hierarchical analysis results of water-energy system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

业升级。综上,黄河流域部分省区产业结构发展失衡,亟须发挥不同省区产业优势,避免无效竞争行为,推动流域生态保护和可持续发展。

3.5 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统网络循环效率

不同于传统的资源再利用率,芬恩循环指数能够有效反映流动网络循环流占比和资源进入经济领域后的流通效率。图 10 为黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的芬恩循环指数。由图 10 可见,从时间上看,黄河流域九省区水资源系统和能源系统的芬恩循环指数均呈增长趋势,其中河南、山东增长速率较快,2007 年两省水资源系统芬恩循环指数为 13.2%和 7.5%,到 2017 年,分别增加到 17.8%和 13.7%;能源系统也呈类似趋势。究其原因,伴随社会经济水平提升,黄河流域九省区资源消费和商品流

动日益活跃,区域间贸易额从 2007 年的 5.5 万亿元增长至 2017 年的 17.8 万亿元,促使芬恩循环指数增加。从空间上看,黄河流域九省区芬恩循环指数的区域差异较大,上游省区普遍低于中下游省区,其中河南、山东是水资源芬恩循环指数较大的省区,陕西、河南和山东拥有能源系统最大的芬恩循环指数;从不同产业的角度来看,由于黄河流域九省区倚能倚重的产业结构和贸易政策,导致第一产业的生产总值与交易额显著小于第二、第三产业,第二、第三产业生产总值 2017 年占比分别为 47%和 42.4%,区域间交易额占比分别为 57%和 37%,活跃的生产贸易活动使其拥有更大的芬恩循环指数。此外,芬恩循环指数较大的省区承担了流域资源中转站的功能,应实行科学合理的资源管理制度,实现接受原料-加工产品-销售产品的良性循环,而且对资源交换量

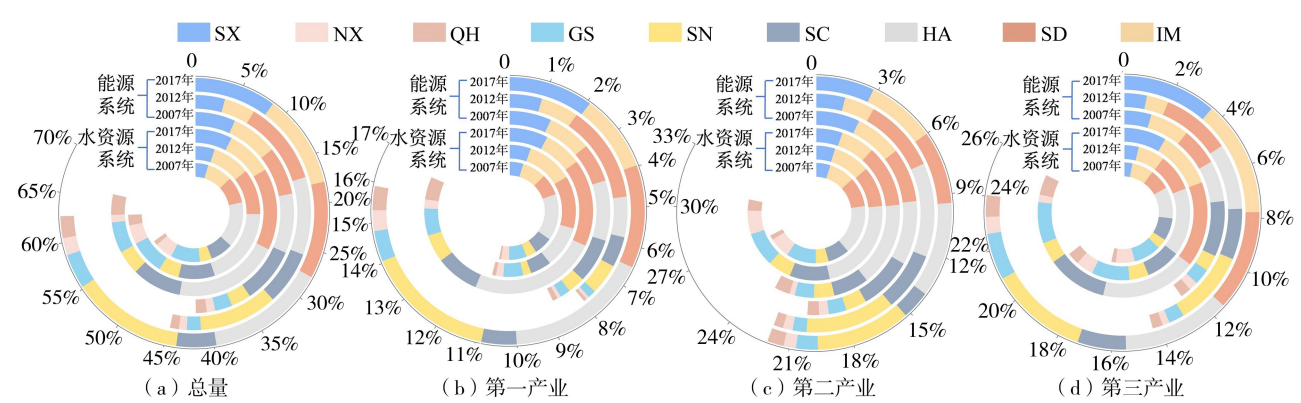


图 10 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的芬恩循环指数

Fig. 10 Finn cycle index of water-energy system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

偏大地区,应动态调整经济贸易结构,防止虚拟资源收支失衡,如河南和山东均为贸易枢纽,若管理不当,可能造成虚拟水大量外流,加剧当地水资源短缺风险^[37]。

3.6 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统鲁棒性

鲁棒性指数可以有效反映社会-经济-自然等复杂系统的稳定性和效率,在实际工程中得到广泛应用。鲁棒性指数在 0.3 以上的区间被称为“活力之窗”^[30],此时系统将生产力与抵抗力维持在相对理想的状态,在保证高效生产的同时能够有效抵抗外界干扰。图 11 为黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的鲁棒性指数。由图 11 可见,耦合系统鲁棒性指数呈增加趋势,最大值为 0.376 9,整体状态较优,但仍有提升空间,此时左侧表示区域进行生产活动的活跃度较低,但抵抗外界干扰能力较强;右侧表示区域生产活动能力较强,但抗干扰能力较弱,原因在于社会经济快速发展,资源开发利用水平提升、流域生产和贸易能力的增强。另外,能源系统的鲁棒性指数和生产力水平高于水资源系统,原因在于黄河流域九省区能源生产和消费相对活跃,43.7% 的 GDP 由工业贡献,超 70% 能源用于工业生产消费,倚能倚重的经济发展模式和较强的能源生产能力使

研究区能源对外依赖较小,增加了鲁棒性指数。因此,实时调整区域资源生产与消费结构能够有效调整系统鲁棒性指数,实现不同情景下资源优化分配及风险科学防控。例如,在资源短缺时,可适当降低生产和资源消费,将系统鲁棒性指数向低生产力、高抗性方向移动;在资源充足时,可适当鼓励资源消费与产品加工,将系统鲁棒性指数向高效率方向移动。

4 结 论

a. 构建了黄河流域九省区水资源-能源耦合生态网络模型,发现研究区虚拟资源流动呈现空间-产业双重驱动特征。河南、山东等省区的水资源和能源消耗总量显著领先;河南、山东、山西、内蒙古 4 省区是流域虚拟水、能流动核心枢纽;第一产业是虚拟水流动的驱动主力,第二产业主导虚拟能源流动,第三产业对资源配置的影响持续增强。

b. 黄河流域九省区节点交互关系显著,水资源、能源均具有较强的竞争关系,各行业在资源附加产品贸易中较少获益,总体呈消极合作状态。四川、内蒙古等省区是水资源和能源的关键调控节点,需重点关注其第二产业结构;青海、宁夏等地是第三产业的脆弱节点,需加强协同发展提升区域抗风险能力;山东等地经济发达、拉动力和驱动力均较强,是流域制造业和产品供应链的核心区域;宁夏等地拉动力和驱动力均较小,产业发展失衡,需优化升级。

c. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统稳定性呈现非对称演化,各省区水资源-能源耦合系统的芬恩循环指数和鲁棒性指数总体呈增长趋势,其中水资源稳定性低于能源,建议适当优化涉水产业结构。

参考文献:

[1] WEN Chuanlei,DONG Weihong,ZHANG Qichen,et al. A system dynamics model to simulate the water-energy-food nexus of resource-based regions: a case study in Daqing

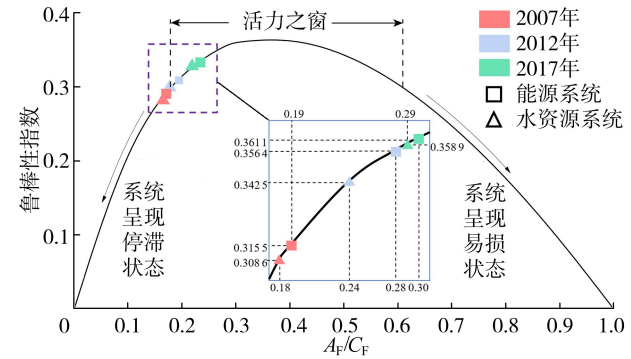


图 11 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统的鲁棒性指数
Fig. 11 Robustness index of water-energy system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

- City, China [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 806:150497.
- [2] HELLSTRÖM D, JEPSSON U, KÄRRMAN E. A framework for systems analysis of sustainable urban water management [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2000, 20 (3) : 311-321.
- [3] 贺新春, 李兴拼, 刘卫林. 水资源系统多目标综合评估模型与方法 [J]. *水利学报*, 2009, 40 (9) : 1033-1039. (HE Xinchun, LI Xinpian, LIU Weilin. Multi-objective comprehensive assessment model for water resources system [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2009, 40 (9) : 1033-1039. (in Chinese))
- [4] GONZÁLEZ-MONROY L I, CÓRDOBA A. Optimization of energy supply systems with simulated annealing: continuous and discrete descriptions [J]. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, 2000, 284 (1/2/3/4) : 433-447.
- [5] 顾伟, 陆帅, 王珺, 等. 多区域综合能源系统热网建模及系统运行优化 [J]. *中国电机工程学报*, 2017, 37 (5) : 1305-1315. (GU Wei, LU Shuai, WANG Jun, et al. Modeling of the heating network for multi-district integrated energy system and its operation optimization [J]. *Proceedings of the CSEE*, 2017, 37 (5) : 1305-1315. (in Chinese)) .
- [6] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 等. 黑龙江省水-能源-粮食系统动力学模拟 [J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40 (4) : 8-15. (WANG Yu, WANG Huixiao, YANG Yaxue, et al. System dynamics simulation of WEF nexus in Heilongjiang province [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40 (4) : 8-15. (in Chinese))
- [7] DONG Runqiu, JIA Hanbing, TIAN Jianghua, et al. Thermodynamic analysis and life cycle assessment of the preferred supercritical water gasification coupled system for energy self-sufficiency: from food waste to hydrogen [J]. *Energy*, 2025, 317: 134553.
- [8] 朱华, 张晴, 徐力刚. 基于水资源全生命周期的浙江省水系统碳排放及情景预测 [J]. *环境科学*, 2025, 46 (4) : 2057-2068. (ZHU Hua, ZHANG Qing, XU Ligang. Carbon emission and scenario prediction of water system in Zhejiang based on the whole life cycle of water resources [J]. *Environmental Science*, 2025, 46 (4) : 2057-2068. (in Chinese))
- [9] ZHAI Mengyu, HUANG Guohe, LIU Lirong, et al. Ecological network analysis of an energy metabolism system based on input-output tables: model development and case study for Guangdong [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 227: 434-446.
- [10] ZHANG Chao, ANADON L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China [J]. *Ecological Economics*, 2014, 100: 159-172.
- [11] 吴普特, 高学睿, 赵西宁, 等. 实体水-虚拟水“二维三元”耦合流动理论基本框架 [J]. *农业工程学报*, 2016, 32 (12) : 1-10. (WU Pute, GAO Xuerui, ZHAO Xining, et al. Framework of “two-dimension three-element” coupling flow of real water and virtual water [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32 (12) : 1-10. (in Chinese))
- [12] 孙才志, 郑靖伟. 基于 MRIO 与 SNA 的中国水资源空间转移网络分析 [J]. *水资源保护*, 2020, 36 (1) : 9-17. (SUN Caizhi, ZHENG Jingwei. Analysis of China’s water resources spatial transfer network based on MRIO and SNA [J]. *Water Resources Protection*, 2020, 36 (1) : 9-17. (in Chinese)) .
- [13] 卓拉, 栗萌, 吴普特, 等. 黄河流域作物生产与消费实体水-虚拟水耦合流动时空演变与驱动力分析 [J]. *水利学报*, 2020, 51 (9) : 1059-1069. (ZHUO La, SU Meng, WU Pute, et al. Assessment of crop related physical-virtual water coupling flows and driving forces in Yellow River Basin [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51 (9) : 1059-1069. (in Chinese))
- [14] 邓铭江, 龙爱华, 李江, 等. 西北内陆河流域“自然—社会—贸易”三元水循环模式解析 [J]. *地理学报*, 2020, 75 (7) : 1333-1345. (DENG Mingjiang, LONG Aihua, LI Jiang, et al. Theoretical analysis of “natural-social-trading” ternary water cycle mode in the inland river basin of Northwest China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2020, 75 (7) : 1333-1345. (in Chinese))
- [15] SUN Jingxin, SUN Shikun, YIN Yali, et al. “Water-Carbon” redistribution caused by China’s interprovincial grain transportation [J]. *Water Research*, 2023, 235: 119894.
- [16] DALIN C, KONAR M, HANASAKI N, et al. Evolution of the global virtual water trade network [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2012, 109 (16) : 5989-5994.
- [17] 操信春, 崔思梦, 吴梦洋, 等. 水足迹框架下稻田水资源利用效率综合评价 [J]. *水利学报*, 2020, 51 (10) : 1189-1198. (CAO Xinchun, CUI Simeng, WU Mengyang, et al. Water use efficiency assessment of paddy rice based on the water footprint theory [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2020, 51 (10) : 1189-1198. (in Chinese))
- [18] 陈莎, 吕鹤, 李素梅, 等. 面向水资源可持续利用的综合水足迹评价方法 [J]. *水资源保护*, 2021, 37 (4) : 22-28. (CHEN Sha, LYU He, LI Sumei, et al. Methods of comprehensive water footprint assessment for sustainable utilization of water resources [J]. *Water Resources Protection*, 2021, 37 (4) : 22-28. (in Chinese))
- [19] 赵勇, 黄可静, 高学睿, 等. 黄河流域粮食生产水足迹及虚拟水流动影响评价 [J]. *水资源保护*, 2022, 38 (4) : 39-47. (ZHAO Yong, HUANG Kejing, GAO Xuerui, et al. Evaluation of grain production water footprint and

- influence of grain virtual water flow in the Yellow River Basin[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(4): 39-47. (in Chinese))
- [20] WANG Saige, CHEN Bin. 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.
- [21] 孙才志, 靳春玉, 阎晓东. 基于 MRIO 和 ENA 的中国省区能源-水资源耦合关系研究[J]. 华北水利水电大学学报(自然科学版), 2020, 41(3): 32-40. (SUN Caizhi, JIN Chunyu, YAN Xiaodong, et al. Chinese provincial energy-water nexus relationship based on MRIO and ENA [J]. Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition), 2020, 41(3): 32-40. (in Chinese))
- [22] 王煜, 彭少明, 郑小康, 等. 水网布局下黄河流域应对极端枯水的关键科学问题[J]. 水科学进展, 2024, 35(1): 11-23. (WANG Yu, PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, et al. Key scientific issues of dealing with extreme dry events in the Yellow River Basin under the layout of water network[J]. Advances in Water Science, 2024, 35(1): 11-23. (in Chinese))
- [23] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690. (PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River basin [J]. Advances in Water Science, 2017, 28(5): 681-690. (in Chinese))
- [24] 赵子萌, 曹永强, 常志冬, 等. 黄河沿线 9 省区水土资源生态承载力耦合协调分析[J]. 水资源保护, 2023, 39(6): 121-129. (ZHAO Zimeng, CAO Yongqiang, CHANG Zhidong, et al. Coupling coordination analysis of ecological carrying capacity of water and land resources in nine provinces along the Yellow River [J]. Water Resources Protection, 2023, 39(6): 121-129. (in Chinese))
- [25] BELLO M O, SOLARIN S A, YEN Y Y. The impact of electricity consumption on CO2 emission, carbon footprint, water footprint and ecological footprint: the role of hydropower in an emerging economy [J]. Journal of Environmental Management, 2018, 219: 218-230.
- [26] ECHCHELH A, HESS T, SAKRABANI R. Reusing oil and gas produced water for irrigation of food crops in drylands [J]. Agricultural Water Management, 2018, 206: 124-134.
- [27] 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. (PENG Kun, ZHU He, WANG Saige, et al. Energy-water nexus in Hubei province based on system input-output analysis and ecological network analysis [J]. Journal of Natural Resources, 2018, 33(9): 1514-1528. (in Chinese))
- [28] 许健, 陈锡康, 杨翠红. 完全用水系数及增加值用水系数的计算方法[J]. 水利水电科技进展, 2003, 23(2): 17-20. (XU Jian, CHEN Xikang, YANG Cuihong. Calculating method for total water input coefficient and water input coefficient for added value [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2003, 23(2): 17-20. (in Chinese))
- [29] ZHANG Pan, CAI Yanpeng, ZHOU Ya, et al. Quantifying the water-energy-food nexus in Guangdong, Hong Kong, and Macao regions [J]. Sustainable Production and Consumption, 2022, 29: 188-200.
- [30] CHEN Shaoqing, CHEN Bin. Urban energy-water nexus: a network perspective[J]. Applied Energy, 2016, 184: 905-914.
- [31] FATH B D, BORRETT S R. A MATLAB © function for network environ analysis[J]. Environmental Modelling & Software, 2006, 21(3): 375-405.
- [32] ZHANG Pan, ZHOU Ya, XIE Yulei, et al. Assessment of the water-energy-food nexus under spatial and social complexities: a case study of Guangdong-Hong Kong-Macao [J]. Journal of Environmental Management, 2021, 299: 113664.
- [33] FINN J T. Measures of ecosystem structure and function derived from analysis of flows [J]. Journal of Theoretical Biology, 1976, 56(2): 363-380.
- [34] CHEN Shaoqing, CHEN Bin, SU Meirong. Nonzero-sum relationships in mitigating urban carbon emissions: a dynamic network simulation[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(19): 11594-11603.
- [35] FATH B D. Quantifying economic and ecological sustainability[J]. Ocean & Coastal Management, 2015, 108: 13-19.
- [36] 黄晓荣, 裴源生, 梁川. 宁夏虚拟水贸易计算的投入产出方法 [J]. 水科学进展, 2005, 16(4): 564-568. (HUANG Xiaorong, PEI Yuansheng, LIANG Chuan. Input/output method for calculating the virtual water trading in Ningxia [J]. Advances in Water Science, 2005, 16(4): 564-568. (in Chinese))
- [37] 韩宇平, 雷宏军, 潘红卫, 等. 基于虚拟水和广义水资源的区域水资源可持续利用评价[J]. 水利学报, 2011, 42(6): 729-736. (HAN Yuping, LEI Hongjun, PAN Hongwei, et al. Evaluation on water resources sustainable utilization based on virtual water and generalized water resources theory [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(6): 729-736. (in Chinese))

(收稿日期: 2025 - 04 - 09 编辑: 王芳)