

黄河流域九省区水资源-能源耦合系统研究(Ⅲ): 风险分析

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; 2. 河海大学水文水资源学院;
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; 4. 长江水利委员会长江水文局;
5. 水利部黄河水利委员会; 6. 水利部水利水电规划设计总院; 7. 黄河勘测规划设计研究院有限公司)

摘要:为科学支撑流域风险管理,开展了黄河流域九省区水资源-能源耦合系统风险分析,通过趋势分析方法揭示风险时空演变格局,结合空间聚类与耦合协调分析识别了风险空间关联特征,采用残差分解法量化了气候变化与人类活动对系统风险的驱动贡献。结果表明:黄河流域水资源-能源供需存在空间错配,上游资源禀赋区与中下游高耗能经济带之间失衡明显,能源系统生产-消费的空间匹配性高于水资源系统;水资源短缺风险概率介于 0.42~0.45,呈中下游高、上游低的梯度分异格局,省际差异突出;能源短缺风险概率整体较低(<0.35),但中西部地区敏感性较高;风险冷点区(低风险)主要分布于上游(如甘肃北部、青海西部)并逐年向青海西北部扩展,热点区(高风险)集中在下游(如山东西部、山西南部、河南大部分),范围逐年缩小并呈现向河南北部集聚的趋势;流域水资源-能源系统风险耦合协调水平在小幅下降后趋于稳定,整体处于弱协调状态;在流域尺度上,气候变化与人类活动对水资源风险的贡献率均值分别为 44%和 56%;干旱半干旱区(如内蒙古西部、宁夏、山西)气候变化的贡献率均值(51.2%)较流域均值高 6%~9%;人类活动对能源风险起主导作用,流域平均贡献率达 80.6%,显著高于气候变化的 19.4%。

关键词:水资源-能源耦合系统;风险分析;气候变化;人类活动;黄河流域

Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin (Ⅲ): risk analysis/Feng Zhongkai^{1,2,3}, Jiang Linyi^{1,2,3}, Niu Wenjing⁴, Wang Yu⁵, Peng Shaoming⁶, Zheng Xiaokang⁷ (1. The National Key Laboratory of Water Disaster Prevention, Hohai University; 2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University; 3. Key Laboratory of Flood Disaster Risk Warning, Prevention and Mitigation, Ministry of Emergency Management, Hohai University; 4. Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission; 5. Yellow River Conservancy Commission, Ministry of Water Resources; 6. General Institute of Water Resources and Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources; 7. Yellow River Engineering Consulting Co., Ltd.)

Abstract: To scientifically support risk management in the Yellow River Basin, a risk analysis of the water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions was carried out. The trend analysis method was used to reveal the spatiotemporal evolution pattern of risks, and the spatial correlation characteristics of risks were identified by combining spatial clustering and coupling coordination analysis. The residual decomposition method was used to quantify the driving contributions of climate change and human activities to system risks. The results indicate that there is a spatial mismatch between water resources and energy supply and demand in the Yellow River Basin, with a significant imbalance between the upstream resource endowment area and the high energy consuming economic belt in the middle and lower reaches. The spatial matching of energy system production consumption is higher than that of water resources system. The probability of water scarcity risk ranges from 0.42 to 0.45, showing a gradient differentiation pattern of high in the middle and lower reaches and low in the upper reaches, with prominent inter provincial differences. The overall probability of energy shortage risk is relatively low (<0.35), but the sensitivity is higher in the central and western regions. The risk cold spots (low risk) are mainly distributed in the upstream (such as northern Gansu and western Qinghai) and are expanding to the northwest of Qinghai year by year. The hot spots (high risk) are concentrated in the downstream (such as the eastern and

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

western parts of mountains, southern Shanxi, and most of Henan), and their scope is shrinking year by year and showing a trend of clustering towards northern Henan. The risk coupling coordination level of the water-energy system of the basin tends to stabilize after a slight decrease, and is overall in a weak coordination state. At the watershed scale, the average contribution rates of climate change and human activities to water resource risk are 44% and 56%, respectively. The average contribution rate of climate change in arid and semi-arid regions (such as western Inner Mongolia, Ningxia, Shanxi) (51.2%) is 6% to 9% higher than the basin average. Human activities play a dominant role in energy risk, with an average contribution rate of 80.6% in the watershed, significantly higher than the 19.4% contribution from climate change.

Key words: water-energy coupling system; risk analysis; climate change; human activity; the Yellow River Basin

水资源与能源是支撑人类生存与经济发展、实现联合国可持续发展目标的核心基础资源,二者之间的内在关联深刻影响生态安全、减贫进程和全球气候治理^[1]。然而,在人口持续增长、经济快速发展和气候变化的多重压力下,全球范围内水资源短缺、水生态退化及能源系统压力持续加剧,形势日益严峻^[2-3]。统计数据显示,目前全球仍有数亿人口无法获得安全饮用水和基本电力供应,而且水资源-能源支撑能力与经济发展密切相关,其供需增长态势不容乐观^[4-5]。水资源与能源的供需失衡不仅加剧生态环境压力,还可能引发经济损失、粮食安全等一系列连锁社会问题^[6]。因此,科学评估区域水资源、能源资源短缺风险的时空分布与演变规律具有重要的现实紧迫性。

资源短缺风险是表征区域资源供需失衡发生概率的重要指标^[7-8],在水资源与能源领域一直受到广泛关注,相关研究涵盖成因机理、驱动机制与风险评估等方面^[9-11]。水资源供给压力持续增大已对人类生存安全构成严重威胁^[12-13],能源系统也面临化石能源枯竭、结构转型以及新能源替代能力不足等多重挑战,其风险同样亟待关注^[14-15]。此外,水资源与能源系统之间存在高度耦合关系:水资源开发利用需要能源支持,能源生产亦会消耗大量水资源,二者表现出显著的互动与依赖特征^[16]。因此,仅对某一资源进行孤立管理往往难以奏效,甚至可能加剧区域性或系统性风险^[17-18]。在此背景下,从水资源-能源耦合视角系统解析短缺风险的形成机制、空间格局与时空演变规律,并定量识别关键驱动因子(特别是气候变化与人类活动)的贡献,已成为实现水资源-能源资源协同优化管理、保障区域可持续发展的关键科学问题,亟须深入研究。

黄河流域是我国重要的生态屏障和经济发展区域,流域面积广阔、空间异质性显著,表现为资源禀赋分布不均、人口经济高度集聚以及环境梯度差异大,并具有高人口密度、核心能源生产功能与高度水资源胁迫并存等特征。然而,已有研究多侧重于单一尺度或宏观分析,对高空间分辨率下水能耦合风险的时空动态演变格局、空间关联效应及驱动机制的系统研究仍较为缺乏。当前我国正在推进国土空

间规划,旨在优化生产、生活和生态空间布局,亟须融合宏观-中观-微观多层次的空间风险信息,以支撑精细化管理和生态保护策略的制定。为此,本文在论文(Ⅰ)(Ⅱ)部分研究基础上^[19-20],系统开展黄河流域九省区水资源-能源耦合系统风险分析研究,以期为深入理解流域水能互馈风险机制提供新视角,为流域水能资源风险管理提供科学依据。

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

黄河流域人均水资源量不足全国人均水平的25%,属水资源极度紧缺地区,以仅占全国约2%的水资源量支撑了全国15%的耕地灌溉和12%人口的用水需求,同时还承担向流域外供水的任务,面临水资源匮乏与能源生产高度集中的双重压力,水资源、能源矛盾突出。此外,黄河流域是我国重要的能源化工基地,集中了全国50%以上的煤炭等一次能源产量,长期以高耗水、高耗能的煤炭开采及煤电、煤化工产业为主导结构^[21-22],水资源短缺已成为制约能源行业发展的瓶颈因素^[23]。

1.2 数据来源

本文采用1992—2022年多源异构数据(表1),主要有4类:①气象水文数据,包括年降水量、参考蒸散发;②基础地理数据,涵盖土地利用/覆被、土壤属性(包括根系限制层深度和植物有效含水量);③社会经济数据,包括人口空间分布、GDP空间化产品;④资源消耗数据,涉及水资源利用量、能源消费与生产量。针对部分年份数据缺失,采用线性插值法进行插补,以确保数据的时序连续性;所有栅格数据均统一重采样至1km分辨率,以实现数据空间尺度一致性匹配。

2 研究方法

本文首先基于多源数据融合与模型模拟,在1km×1km网格尺度精确量化产水量、能源生产量、用水量及能耗量,形成水资源-能源资源风险分析的空间本底;其次从时间演化(趋势分析)、空间关联(聚类与协同效应)及驱动对象(气候变化、人类活动)等不同维度揭示风险特征,研究框架见图1。

表 1 数据信息
Table 1 Data information

数据名称	数据格式	数据源
土地利用数据	栅格	国家资源与环境科学数据中心 (https://www.resdc.cn)
年平均降水量	栅格	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/home)
参考蒸散发	栅格	国家青藏高原科学数据中心 (https://data.tpdc.ac.cn/home)
植物有效含水量	栅格	世界土壤数据库 (https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
根系限制层深度	栅格	世界土壤数据库 (https://gaez.fao.org/pages/hwsd)
用水量	表格或文本	《水资源公报》、地方统计年鉴
能耗量	表格或文本	《中国能源统计年鉴》、地方统计年鉴
能源生产量	表格或文本	《中国能源统计年鉴》、地方统计年鉴
GDP	栅格	https://www.tandfonline.com/doi/pdf/10.1080/15481603.2016.1276705
人口	栅格	https://landscan.ornl.gov

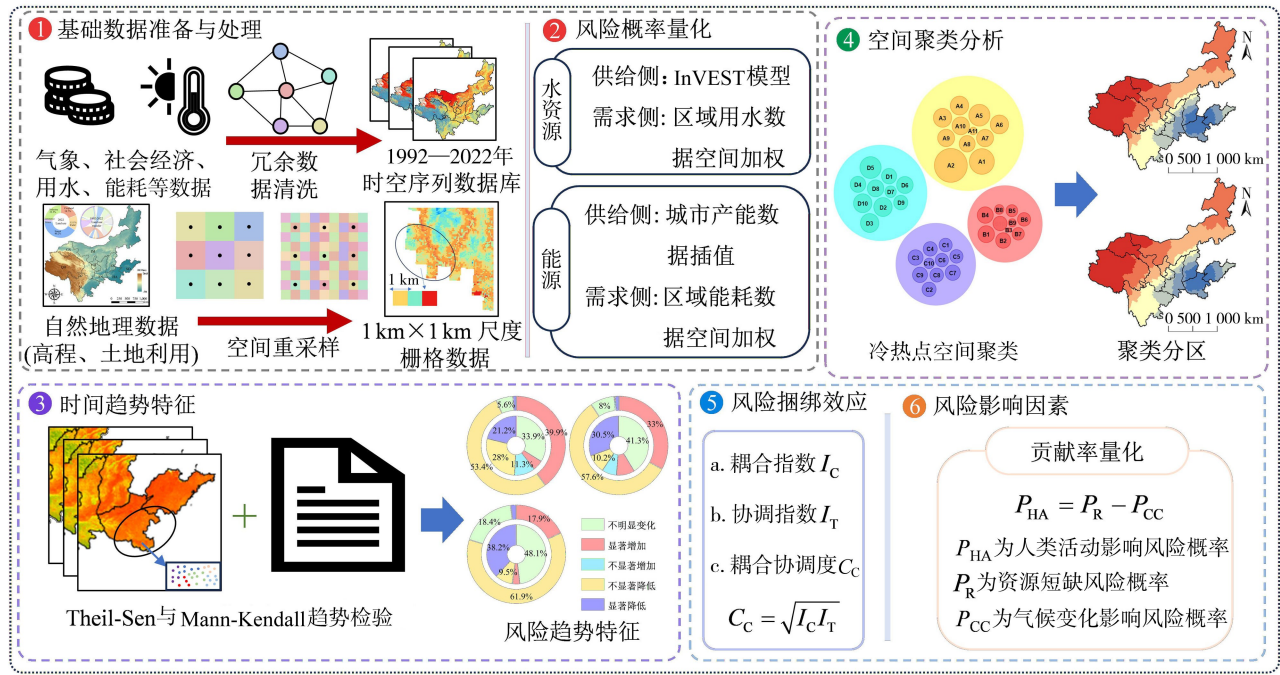


图 1 研究框架
Fig.1 Research framework

2.1 格点尺度指标的确定

2.1.1 产水量

本文采用 InVEST 模型的产水模块(图 2),在 1 km×1 km 网格尺度上模拟黄河流域水资源供给量。该模型基于 Budyko 水热耦合平衡假设,耦合土地利用类型、土壤渗透特性、气象数据(降水量、参考蒸散量)及地形参数,通过水量平衡方程逐栅格估算产水量,从而精细刻画生态系统产水功能的空间分异特征^[24]。InVEST 模型作为生态系统服务评估的主流工具,具备较强的物理机制基础,适用于流域尺度的水资源模拟与空间显性分析。产水量的计算公式为:

$$Y_i = (1 - ET_{A,i}/P_i)P_i \quad (1)$$

其中 $ET_{A,i}/P_i = \frac{1 + ET_{P,i}}{P_i - [1 + (ET_{P,i}/P_i)\omega_i]^{\frac{1}{\omega_i}}}$

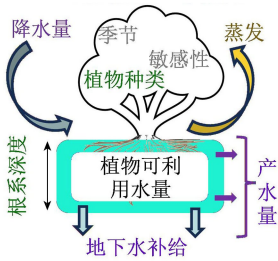


图 2 InVEST 模型产水模块原理

Fig.2 Principle of water yield module in InVEST model

$$\omega_i = Z\theta_i/P_i + 1.25$$

式中: Y_i 为格点 i 的年产水量; $ET_{A,i}$ 为格点 i 的年实际蒸散发量; P_i 为格点 i 的年降水量; $ET_{P,i}$ 为格点 i 的年潜在蒸散发量; ω_i 为表征自然气候-土壤综合条件的无量纲经验系数; Z 为经验性季节常数,取值范围为 1.5~30,本文依据模拟产水量与实测径流间误差最小原则,采用格点遍历法确定; θ_i 为格点 i

的土壤有效含水量,取决于土壤质地和根系深度。

2.1.2 用水量

格点尺度用水量通过农业灌溉、工业生产与生活用水的空间化建模实现,包括:①农业灌溉用水基于各省《水资源公报》农业用水总量,结合耕地空间分布(1 km 格网)与有效灌溉面积比例,按灌溉定额分配至耕作区格点^[25];②工业与生活用水依据人均生活用水系数与单位 GDP 用水强度,结合 LandScan 人口与 GDP 空间分布数据(1 km 格网),实现省级用水量向格点尺度的精细化降尺度分配^[26-27]。该方法通过耦合统计数据与空间代理变量,保障用水量空间异质性表征的科学性与可靠性,计算公式为:

$$W_i = W_{ir,i} + W_{in,i} + W_{do,i} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad W_{ir,i} &= W_{ir}/L_g \quad W_{in,i} = G_i W_{in}/G \\ W_{do,i} &= P_{o,i} W_{do}/P_o \end{aligned}$$

式中: W_i 、 $W_{ir,i}$ 、 $W_{in,i}$ 、 $W_{do,i}$ 分别为格点 i 的总用水量、农业灌溉用水量、生产用水量、生活用水量; W_{ir} 、 W_{in} 、 W_{do} 分别为区域总农业灌溉用水量、总生产用水量、总生活用水量; L_g 为区域的耕地格点数量; G_i 为格点 i 的 GDP; G 为区域总 GDP; $P_{o,i}$ 格点 i 的人口; P_o 为区域总人口。

2.1.3 能耗量

与用水量类似,格点尺度的能耗量通过构建农业灌溉、工业生产与生活用能的空间化模型实现,包括:①农业灌溉能耗基于省级农机总动力与灌溉面积统计数据,结合耕地空间分布(1 km 格网)与单位面积能耗系数,分配至耕作区格点;②工业与生活能耗依据单位 GDP 能耗强度与人均生活能耗系数,耦合 GDP 空间分布数据与 LandScan 人口数据集,实现能耗量在 1 km 格点尺度的精细化空间降尺度。该方法通过能源活动空间化模型,有效表征了多源能耗的空间异质性特征,计算公式为:

$$E_i = E_{ir,i} + E_{in,i} + E_{do,i} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad E_{ir,i} &= E_{ir}/L_g \quad E_{in,i} = P_{o,i} E_{in}/P_o \\ E_{do,i} &= G_i E_{do}/G \end{aligned}$$

式中: E_i 、 $E_{ir,i}$ 、 $E_{in,i}$ 、 $E_{do,i}$ 分别为格点 i 的总能耗、农业灌溉能耗、工业能耗、生活能耗; E_{ir} 、 E_{in} 、 E_{do} 分别为区域总农业灌溉能耗、总工业能耗、总生活能耗量。

2.1.4 能源生产量

本文采用反距离权重空间插值法^[28]实现省级能源生产量向 1 km 格点尺度的精细化空间分配。该方法基于能源生产点源数据(各城市产能量)的空间自相关性,通过距离衰减函数加权生成连续曲面,其插值精度经省级总量控制验证(相对误小于 5%),有效克服了能源生产设施空间定位缺失的局

限,为流域能源供给格局的异质性分析提供可靠空间数据基础。计算公式为:

$$M_i = \sum_{j=1}^n (w_{i,j} M_j) / \sum_{j=1}^n w_{i,j} \quad (4)$$

$$w_{i,j} = 1/d_{i,j}^p$$

其中

式中: M_i 为格点 i 的能源生产量; M_j 为参考点 j 的能源生产量,本文指城市能源生产量; n 为参考点数量; $w_{i,j}$ 为参考点 j 相对于格点 i 的空间权重; $d_{i,j}$ 为格点 i 到参考点 j 的距离; p 为权重下降速率控制参数。

2.2 风险发生概率计算

通过资源压力指数来量化资源供需缺口,从而表征区域资源系统的盈余、平衡或赤字状态^[29]。该指数为评估黄河流域水资源-能源系统的胁迫强度提供了标准理论框架,是计算资源短缺风险概率的基础,计算公式为:

$$R_{SI} = (Q_S - Q_C) / (Q_S + Q_C) \quad (5)$$

式中: R_{SI} 为资源压力指数; Q_S 为资源供给量(产水量或能源生产量); Q_C 为资源消耗量(用水量或能耗量)。 $R_{SI} > 0$ 表示资源供给大于消耗,处于盈余状态; $R_{SI} < 0$ 表示资源消耗超过供给,处于赤字状态; $R_{SI} = 0$ 表示供需平衡。

基于资源压力指数进一步计算资源短缺风险概率^[30],计算公式为:

$$P_R = \begin{cases} \exp[\lg(-1/R_{SI}) + 0.5] & R_{SI} < 0 \\ \min\{\exp[\lg(-1/R_{SI}) + 0.5], R_{SI}\} & R_{SI} \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: P_R 为资源短缺风险概率。当 $R_{SI} = 0$ 时, $R_P = 0$, 表示供需平衡,无短缺风险; R_{SI} 值越大,表明系统压力越大、短缺风险越高,对应的 R_P 取值越高,并随着 R_{SI} 的增大而无限趋近于 1,即 100% 风险。

2.3 风险时间趋势特征分析

本文采用 Theil-Sen 中值坡度估计与 Mann-Kendall 趋势检验相结合的方法,在 1 km 格点尺度上解析水资源-能源风险的时序演变特征。该方法依托非参数统计特性,首先计算时间序列中所有数据对的斜率中位数,有效降低异常值干扰,捕捉长期变化趋势;其次通过 Mann-Kendall 检验判定趋势的统计显著性($p < 0.05$)。该方法组合能有效克服传统参数方法对数据分布的严格假设限制,为识别流域风险敏感区提供了有效的量化工具^[31]。

2.4 风险空间聚类特征分析

采用 Getis-Ord G_i^* 指数进行冷热点空间聚类分析,通过计算格点 i 的 Getis-Ord 局部统计量 G_i^* 揭示水资源-能源系统风险的空间自相关性与集群分布特征^[32]。 $G_i^* > 0$ 表示位置为风险热点, $G_i^* < 0$ 表

示位置为风险冷点, $|G_i^*|$ 表征空间聚类特征的统计显著性, 通常可进一步根据其值推断空间聚类特征在 90%、95% 或 99% 置信水平下的显著性。冷点区为水资源-能源风险的低值空间集聚区, 表征局部低风险趋势对周边风险升高具有抑制效应; 热点区为水资源-能源风险的高值空间集聚区, 表征局部高风险趋势存在向周边区域扩散与传导的潜在可能。本文以统计学显著性水平 $p < 0.05$ 作为冷热点识别的基本判别标准, 量化水资源-能源风险的空间异质性特征, 为黄河流域的分区分类风险管理提供理论依据。

2.5 风险协同效应分析

风险协同效应分析中, 通过耦合指数与协调指数双指标量化水资源-能源系统风险的协同演化特征^[29]。耦合指数用于表征水资源系统与能源系统之间相互作用的强度, 反映二者协同发展的紧密程度; 协调指数则用于评估系统间在良性或恶性发展状态下的协调质量, 其值越高表明系统间协同发展越趋于可持续, 反之则可能相互抑制。该方法有效弥补了传统耦合指标难以区分系统所处发展阶段(正向或负向)的局限性, 为解析水资源-能源系统在胁迫条件下的动态互馈机制提供了理论依据与量化工具。计算公式为:

$$C_C = \sqrt{I_C I_T} \tag{7}$$

$$\begin{aligned} \text{其中} \quad I_C &= 2\sqrt{P_W P_E} / (P_W + P_E) \\ I_T &= (P_W + P_E) / 2 \end{aligned}$$

式中: C_C 为耦合协调度; I_C 为耦合指数; I_T 为协调指数; P_W 为水资源风险概率; P_E 为能源风险概率。

2.6 相对贡献率计算

采用多元线性回归残差分解法^[33]定量解析气候变化与人类活动对水资源-能源系统风险影响的相对贡献率。该方法基于气候因素(气温、降水量)与风险概率的统计建模, 分离出人类活动驱动的残差项, 从而量化二者对空间风险格局形成的驱动机制。这一方法有效规避了传统归因中的共线性问题, 并通过残差项明确区分自然过程与人为扰动^[31], 为流域风险的关键驱动因子识别提供理论基础。计算公式为:

$$P_{HA} = P_R - P_{CC} \tag{8}$$

$$k = \left[n' \sum_{i=1}^{n'} (iP'_i) - \sum_{i=1}^{n'} i \sum_{i=1}^{n'} P'_i \right] / \left[n' \sum_{i=1}^{n'} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n'} i \right)^2 \right] \tag{9}$$

式中: P_{HA} 为人类活动对水资源-能源耦合系统影响的风险概率, 为多元线性回归方程的残差项; P_{CC} 为气候变化对水资源-能源耦合系统影响的风险概率, 利用多元线性回归方程计算得到; k 为多元线性回

归方程的斜率; P'_i 为第 i 年人类活动或气候变化对水资源-能源系统影响的风险概率值; n' 为时间序列长度。 $k > 0$ 表示气候变化或人类活动对系统风险概率具有促进作用; $k < 0$ 表示气候变化或人类活动对系统风险概率具有抑制作用。依据表 2 确定气候变化或人类活动对水资源-能源系统风险概率变化的相对贡献率。

表 2 相对贡献率计算依据

风险趋势	贡献要素	k_R	k_{CC}	k_{HA}	相对贡献率	
					气候 变化	人类 活动
风险增加	人类活动与气候变化	<0	<0	<0	k_{CC}/k_R	k_{HA}/k_R
	气候变化	<0	<0	>0	100%	0
	人类活动	<0	>0	<0	0	100%
风险降低	人类活动与气候变化	>0	>0	>0	k_{CC}/k_R	k_{HA}/k_R
	气候变化	>0	>0	<0	100%	0
	人类活动	>0	<0	>0	0	100%

注: k_R 为水资源-能源系统风险概率的斜率; k_{HA} 为人类活动对水资源-能源系统影响风险概率的斜率; k_{CC} 为气候变化对水资源-能源系统影响风险概率的斜率。

3 结果与分析

3.1 水资源和能源供用格局

基于产水量模拟结果与研究区各省《水资源公报》中地表水资源总量数据的分析表明, 二者存在显著线性相关关系 ($R^2 = 0.959$), 表明 InVEST 模型在黄河流域产水量模拟方面具有较高可靠性。图 3 为黄河流域九省区水资源-能源的供用格局。对于水资源系统: ①时序变化方面, 1992—2022 年全流域产水总量呈小幅增长, 从 5 323 亿 m^3 增至 5 712 亿 m^3 ; 同期用水量显著上升, 由 1 058 亿 m^3 增至 1 253 亿 m^3 , 年均增长率约为 0.70%。②空间错配方面, 产水高度集中于上游青海和四川地区(占总量的 65% 以上), 而内蒙古、甘肃、宁夏等省区水资源普遍贫乏; 用水则集中在下游的山东与河南等地, 如 2022 年两省用水量合计占全流域的 38%, 而青海和宁夏总用水量不足山东的一半。③供需失衡方面, 山东、河南、山西、宁夏 4 省区仅拥有全流域 17% 的水资源, 却消耗了 52% 的用水量; 而上游水资源禀赋优越的地区(如青海、四川)因经济发展水平较低, 实际用水需求有限。对于能源系统: ①时序演变方面, 能源生产与消耗总量均呈快速增长趋势, 尤其在 2002—2012 年, 能源产量从 8.7 亿 t(以标准煤计)增至 22.63 亿 t, 增幅达 160%。②空间分布方面, 能源生产高度集中于山西、陕西全境及内蒙古中部地区, 2012 年这些区域能源产量占全国 60% 以上; 能源消耗核心区则位于山东、河南和四川东部, 其中山东 2022 年能耗量达 4.8 亿 t, 超过全流域

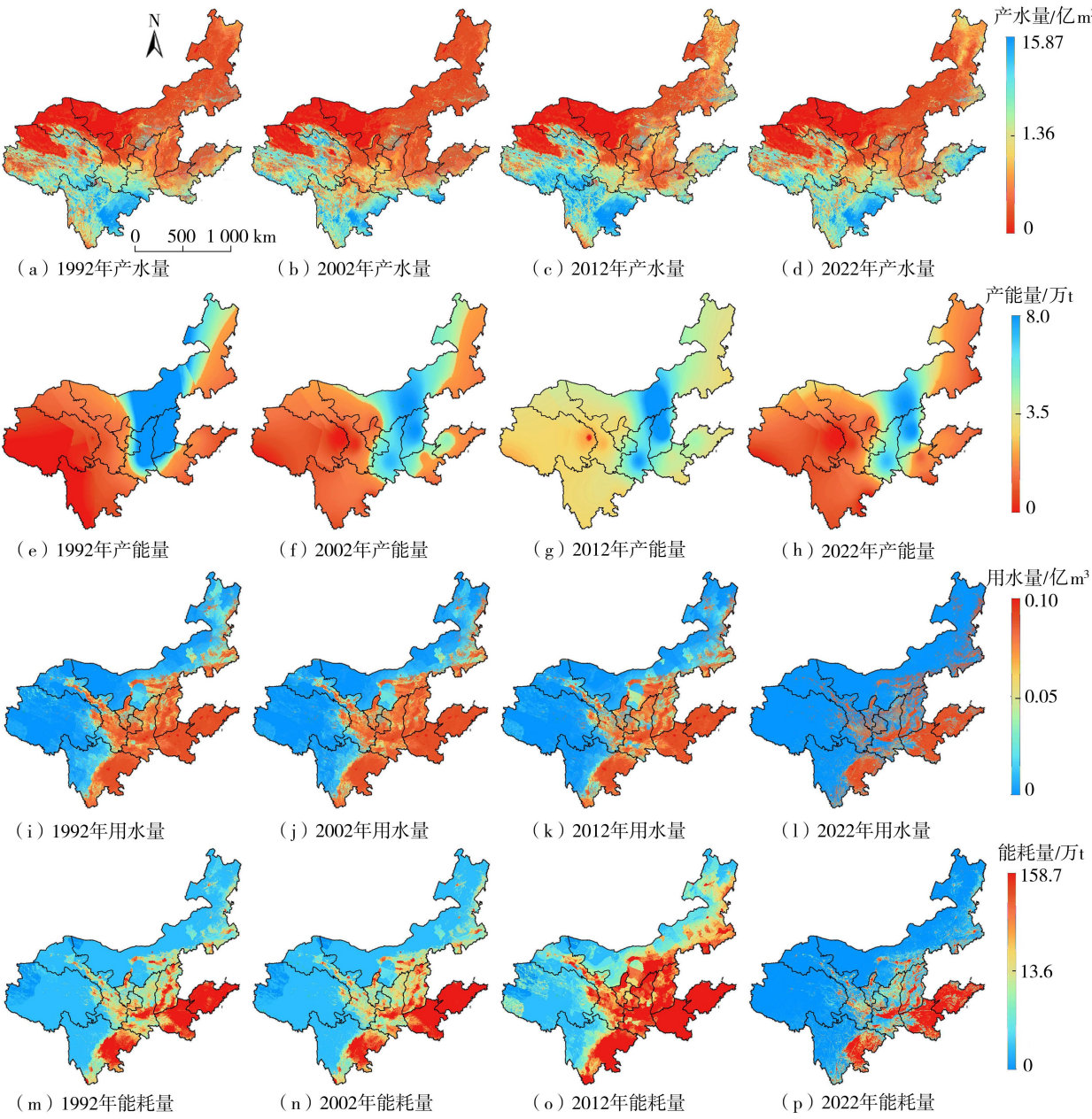


图3 黄河流域九省区水资源和能源供用格局

Fig. 3 Water resources and energy supply and use pattern in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin

20%。③供需协调方面,与水资源相比,能源供给与消耗的空间匹配度较高,主要消耗区(如山东、河南)本身也是重要能源生产基地,在一定程度上缓解了跨区域调配压力。

3.2 风险概率

表3为黄河流域九省区水资源和能源的压力指数及短缺风险概率,可见1992—2022年黄河流域水资源、能源短缺风险呈现出显著的空间分异与时间演变特征。对于水资源系统:①风险水平方面,不同年份不同地区的水资源短缺风险概率差异较大,1992年青海水资源短缺风险仅有0.05,而2012年山东高达0.72,流域整体水资源短缺风险高于能源

风险;②风险概率空间格局方面,风险概率呈现中下游高、上游低的梯度分异,河南为高风险核心区(多年平均风险概率为0.55),青海为最低风险区(0.11),二者相差达5倍;③压力指数空间分异方面,仅青海和四川两省多年平均处于水资源盈余状态,而中下游省区如河南、山东和山西则处于赤字状态。对于能源系统:①风险水平方面,能源短缺风险概率总体较低(最大值青海仅有0.34);②压力指数时序演变方面,呈持续上升趋势,流域平均 R_{SI} 从1992年的0.72变为2022年的0.6,表明能源系统压力持续加剧;③压力指数空间分异方面,全流域均处于能源盈余状态,其中山西、陕西等地的压力

表 3 黄河流域九省区水资源和能源的压力指数及短缺风险概率

Table 3 Pressure index and shortage risk probability of water resources and energy in nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin

省区	水资源压力指数				能源压力指数				水资源短缺风险概率				能源短缺风险概率			
	1992 年	2002 年	2012 年	2022 年	1992 年	2002 年	2012 年	2022 年	1992 年	2002 年	2012 年	2022 年	1992 年	2002 年	2012 年	2022 年
山东	-0.94	-0.64	-0.23	0.03	0.70	0.74	0.58	0.61	0.42	0.49	0.72	0.63	0.08	0.01	0.13	0.23
山西	-0.90	-0.23	-0.05	0.08	0.81	0.79	0.79	0.68	0.28	0.57	0.61	0.63	0.02	0.02	0.02	0.11
河南	-0.93	-0.15	-0.34	-0.12	0.81	0.80	0.69	0.67	0.36	0.57	0.61	0.66	0.07	0.01	0.11	0.24
陕西	-0.87	0.27	0.13	0.28	0.71	0.77	0.77	0.65	0.21	0.63	0.63	0.70	0.01	0.01	0.07	0.15
甘肃	-0.44	0.25	-0.24	0.04	0.64	0.66	0.73	0.59	0.12	0.15	0.14	0.25	0.06	0.09	0.20	0.30
宁夏	-0.80	-0.06	-0.28	-0.21	0.79	0.76	0.68	0.60	0.24	0.42	0.42	0.35	0.01	0.01	0.16	0.30
四川	-0.47	0.61	0.64	0.53	0.76	0.78	0.68	0.64	0.07	0.28	0.22	0.22	0.12	0.08	0.19	0.32
青海	0.15	0.60	0.12	0.13	0.62	0.71	0.73	0.47	0.05	0.08	0.07	0.23	0.12	0.17	0.25	0.34
内蒙古	-0.77	0.31	0.05	-0.01	0.81	0.80	0.75	0.57	0.09	0.20	0.16	0.28	0.11	0.01	0.04	0.25

指数相对较小,反映其能源供给压力较低。

黄河流域水资源-能源耦合系统风险的空间分异是自然禀赋约束与社会经济活动共同作用的结果:①自然禀赋方面,上游地区依赖冰川融水和良好下垫面条件发挥“中华水塔”的水源涵养功能,中下游则受干旱半干旱气候限制,水资源再生能力较弱,导致产水与用水之间存在空间错位;②社会经济活动方面,下游地区人口密集、工业化水平高,资源消耗强度大,山东、河南等地的农业灌溉与能源密集型产业进一步加剧区域资源压力,并通过产业链向上游地区传导;③能源系统特性方面,尽管能源供给的空间匹配性优于水资源,但对传统化石能源的依赖加剧了生态环境退化(如地下水超采与水污染),反而削弱了水资源的可持续供给能力,凸显了水资源-能源协同管理的迫切性。

3.3 风险时间趋势特征

图 4 为黄河流域九省区水资源和能源风险时间

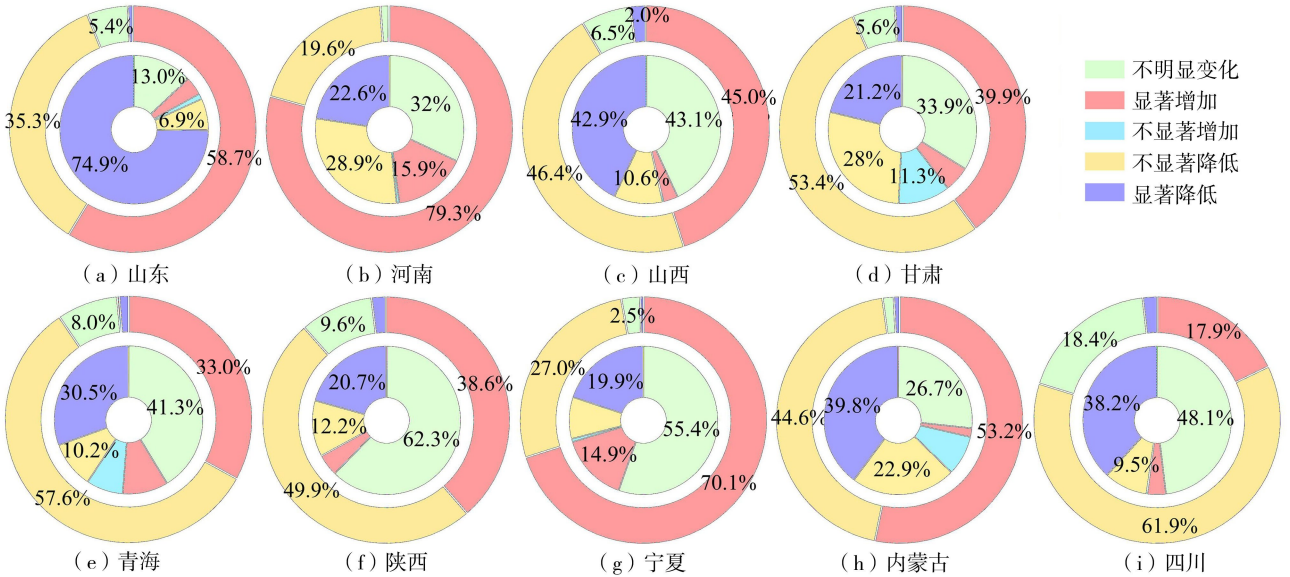


图 4 黄河流域九省区水资源和能源风险时间趋势分析结果

Fig. 4 Time trend analysis results of water resources and energy risks in nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin

程推高了刚性用水需求(如山东的农业灌溉与制造业耗水),叠加气候变化所引起的径流不确定性,共同加剧了这些区域的敏感性,未来需重点优化用水结构与提升用水效率。②能源风险空间分异的原因在于山西、陕西等传统能源基地依赖稳定的煤炭产能,风险敏感性较低;而宁夏、青海等正处于能源结构转型的区域,由于风光等可再生能源占比提高,系统供应间歇性增强,导致风险敏感性上升。

3.4 风险空间聚类特征

基于空间聚类分析,本文识别了黄河流域九省区水资源和能源风险的高值集聚(热点区)与低值集聚(冷点区),结果如图 5 所示。可以看出,在水资源风险空间关联格局方面,热点区主要分布在下游的山东西部、山西南部 and 河南全境,2012 年,河南热点区面积占流域总面积 60% 以上;随时间推移,热点区范围逐渐缩小,并向河南北部集聚。冷点区集中在上游的甘肃北部和青海西部,且自西北部逐年扩展,至 2022 年已基本覆盖青海全境。能源风险空间关联格局方面,热点区与冷点区分布与水资源风险高度相似,均呈现“下游热点、上游冷点”的空间关联模式。上述格局表明,热点区的风险外溢效应:下游热点区(如河南)资源短缺可能通过水资源-能源系统关联(如跨区域调水、能源输送)加剧周边地区风险,引发流域级联风险传递;冷点区的局部稳定性:上游冷点区(如青海)与周边地区的资源供需动态脱钩,系统独立性较强,但其生态屏障功能对全

流域资源安全具有重要支撑作用。因此,建议在热点区建立跨省区水资源-能源协同管理机制,以抑制风险传导;冷点区则应进一步加强生态保护政策,维持水源涵养与清洁能源基地的可持续性。

3.5 风险协同效应

图 6 为黄河流域九省区水资源-能源风险协同效应分析结果,可见流域的水资源-能源风险协同演化呈现显著的系统性解耦趋势。时间演变特征方面,1992—2002 年,除河南、山东两省的水资源-能源风险耦合协调度呈上升趋势外,其余省区均出现不同程度下降,表明流域水资源-能源系统整体解耦趋势持续加强;2002 年后,各省区耦合协调度转入低幅波动阶段,整体处于弱耦合协调状态。空间演变特征方面,空间分异格局发生明显东西梯度逆转,至 2022 年,风险耦合水平呈现东高西低的空间格局,与 20 世纪 90 年代的分布特征相反。具体而言,西部省区(如青海)的耦合协调度显著低于流域均值,2012 和 2022 年分别为 0.17 和 0.19,较 1992 年的 0.63 下降约 73%;而东部下游省区,如山东和河南,则持续上升,山东 2022 年耦合协调度为 0.73,较 1992 年(0.62)增长了 17.7%,河南同期增幅达 29.1%。驱动机制可解析为两方面:①下游地区表现出协同强化机制,高风险热点区(如河南)因人口与产业高度密集,水资源短缺与能源赤字形成共振,进一步加剧系统性连锁风险;②西部干旱区如青海等省区的耦合协调度降幅超过 70%,反映出其对气

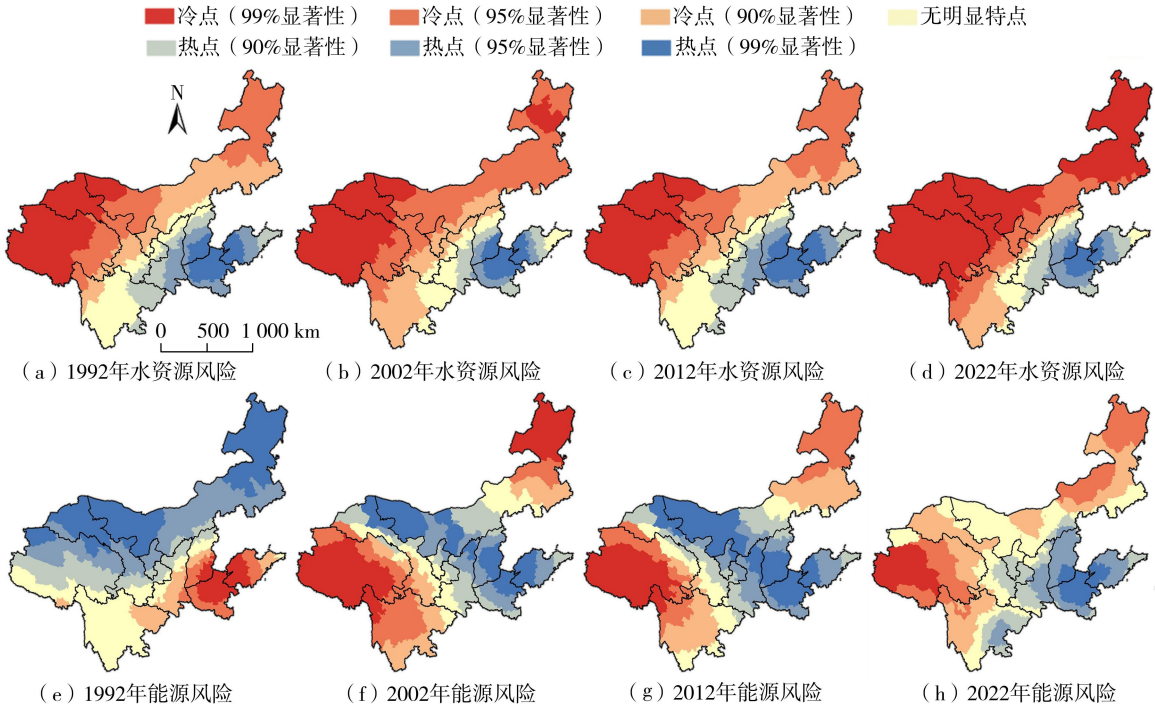


图 5 黄河流域九省区水资源和能源风险空间聚类分析结果

Fig. 5 Spatial clustering analysis results of water resources and energy risks in nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin

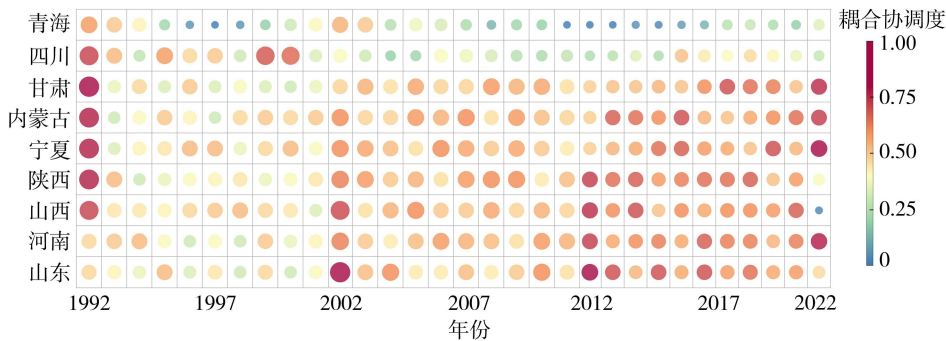


图6 黄河流域九省区水资源-能源风险协同效应分析结果

Fig. 6 Analysis results of synergistic effect of water resources-energy risks in nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin

候变化扰动的高度敏感性与资源系统的脆弱性。

3.6 气候变化与人类活动对水资源-能源耦合系统风险的影响

图7为气候变化与人类活动对水资源风险和能源风险的相对贡献率。由图7可见,在水资源风险方面,在全流域尺度,气候变化与人类活动的平均贡献率分别为44%和56%。干旱半干旱区域的气候变化贡献率显著高于流域均值,如内蒙古西部、宁夏和山西分别达到51.2%、49.8%和47.3%,较全流域平均水平高出6%~9%,显示出较强的气候敏感性;人类活动主导区域则主要集中在陕西关中平原(52.3%)和河南沿黄灌区(58.7%)。能源风险方面,人类活动对能源风险的平均贡献率在全流域高

达80.6%,远高于气候变化的19.4%,表明能源风险主要受社会经济因素驱动;空间分异显著,青海北部等清洁能源基地因依赖径流发电,表现出较高的气候敏感性,气候变化贡献率达到87.4%;而山东和内蒙古东部等传统化石能源基地则更多受人类活动控制。

水资源风险的气候敏感性主要源于干旱半干旱区降水稀少、蒸发强烈,导致产水过程对气候波动极为敏感;上游高海拔地区冰川退缩与冻土退化进一步降低了枯水期径流的稳定性。能源风险则以人类活动主导为主,倚能型产业结构(如山西的煤化工、山东的重工业)通过产业链关联显著放大资源消耗压力,致使人类活动贡献率超过80%。因此,应针对不同类型风险区的主导驱动因素,实施差异化管控策略。对人类活动主导的水资源高风险区(贡献率大于60%),建议严格执行工业用水定额管理、推广节水灌溉技术,并调整和优化高耗水产业等工作;对于气候变化敏感的水资源高风险区(贡献率大于50%),建议推进生态修复以增强水源涵养能力,建设抗旱作物种质资源库,并发展雨洪资源化利用工程;对于人类活动绝对主导的能源风险区,重点推进产业结构优化与能效提升,如在能源依赖型地区严格控制新增煤化工产能,配套布局大型风光基地,推动能源系统低碳转型。

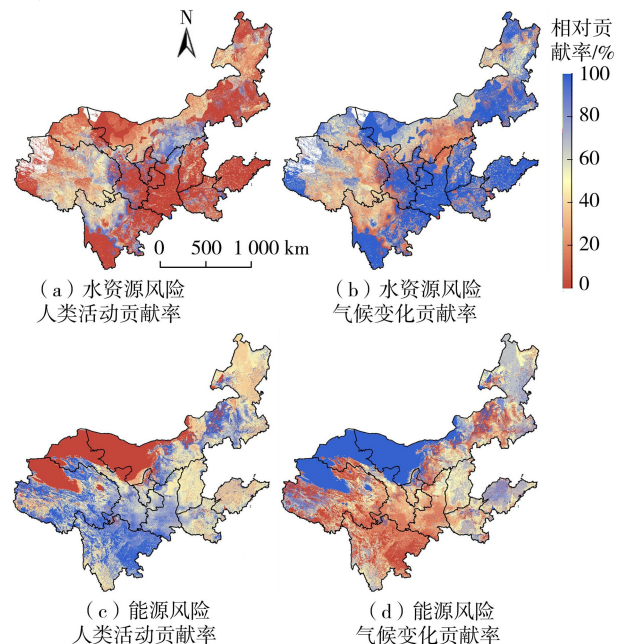


图7 黄河流域九省区气候变化与人类活动对水资源风险和能源风险的相对贡献率

Fig. 7 Relative contribution rates of climate change and human activities to water resources risk and energy risk in nine provinces and autonomous regions in the Yellow River Basin

4 结论

a. 对于黄河流域九省区水资源-能源耦合系统供需格局和风险分异,在自然禀赋(气候与下垫面条件)驱动下,水资源供给集中在上游青海和四川东部地区;而社会经济活动导致下游山东、河南等地形成高耗水核心区,加剧了供需失衡。水资源短缺风险概率显著高于能源风险,空间上呈现中下游高、上游低的梯度分异格局。山东、山西等省区风险持续上升,亟须优化用水结构并提升效率;宁夏、青海南部

等地区能源结构向高比例可再生能源转型,系统对外部扰动的敏感性增强,长期系统性风险有所上升。

b. 黄河流域九省区水资源-能源耦合系统风险的冷点区(低风险)稳定分布于上游甘肃北部和青海西部,热点区(高风险)范围收缩并集聚于河南北部。系统整体呈现解耦趋势,区域间风险传导效应凸显(如下游风险向周边扩散),亟待构建跨行政区协同管理机制

c. 水资源风险在全流域尺度上,气候变化与人类活动的贡献率分别约为 44%和 56%。干旱半干旱区(如内蒙古西部、宁夏和山西)的气候变化贡献率(平均 51.2%)较流域均值高 6%~9%,应增强植被覆盖与固碳能力,提升系统韧性;人类活动主导区(如陕西关中平原、河南沿黄灌区)则应强化节水措施,优化高耗水产业规模。能源风险的人类活动贡献率高达 80.6%,在能源依赖型产业结构突出地区,应严格控制煤化工等高耗能产业规模,并积极推进能源结构低碳转型。

参考文献：

[1] Bieber N, Ker J H, Wang Xiaonan, et al. Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools[J]. Energy Policy, 2018, 113: 584-607.

[2] 王煜,郑小康,吕鸿,等. 极端枯水年黄河流域水资源系统韧性调控[J]. 水科学进展, 2025, 36(3): 359-371. (Wang Yu, Zheng Xiaokang, Lyu Hong, et al. Research on resilience regulation of water resource systems in the Yellow River basin under during extreme drought years [J]. Advances in Water Science, 2025, 36(3): 359-371. (in Chinese))

[3] 李激,姜珊,赵勇,等. 京津冀水-能源-粮食耦合系统安全评价[J]. 水资源保护, 2023, 39(5): 39-48. (Li Wei, Jiang Shan, Zhao Yong, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. Water Resources Protection, 2023, 39(5): 39-48. (in Chinese))

[4] Thacker S, Adshead D, Fay M, et al. Infrastructure for sustainable development[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(4): 324-331.

[5] Elmqvist T, Andersson E, Frantzeskaki N, et al. Sustainability and resilience for transformation in the urban century[J]. Nature Sustainability, 2019, 2(4): 267-273.

[6] 张礼兵,康传宇,金菊良,等. 供需双侧调控下水稻灌区水-能源-粮食系统耦合协调评价与优化研究[J]. 水利学报, 2023, 54(7): 829-842. (Zhang Libing, Kang Chuanyu, Jin Juliang, et al. Study on coupled collaborative evaluation and optimization for water-energy-food system of rice irrigation area based on bilateral regulation with

supply and demand[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2023, 54(7): 829-842. (in Chinese))

[7] 冯仲恺,高浩宇,牛文静,等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究(I):网络构建[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 1-11. (Feng Zhongkai, Gao Haoyu, Niu Wenjing, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (I): network construction[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 1-11. (in Chinese))

[8] 冯仲恺,高浩宇,牛文静,等. 复杂流域水资源系统风险多链路网络研究(II):风险传播[J]. 水资源保护, 2025, 41(3): 1-12. (Feng Zhongkai, Gao Haoyu, Niu Wenjing, et al. Research on risky multi-link networks for complex watershed water resources system (II): risk propagation[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(3): 1-12. (in Chinese))

[9] 刘东,周子贺,张祥敏,等. 基于 HPO-SVM 模型的建三江地区水土能源粮食耦合系统运行效率测度分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(5): 247-257. (Liu Dong, Zhou Zihe, Zhang Xiangmin, et al. Measurement and analysis of operation efficiency of regional water-land-energy-food coupling system based on HPO-SVM[J]. Water Resources Protection, 2025, 41(5): 247-257. (in Chinese))

[10] 王红瑞,钱龙霞,赵自阳,等. 水资源风险分析理论及评估方法[J]. 水利学报, 2019, 50(8): 980-989. (Wang Hongrui, Qian Longxia, Zhao Ziyang, et al. Theory and assessment method of water resources risk[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2019, 50(8): 980-989. (in Chinese))

[11] 刘东,刘海岳,张祥敏,等. 基于旗鱼算法优化 BP 神经网络的水-能源-粮食耦合系统安全特征测度分析[J]. 农业工程学报, 2025, 41(11): 229-242. (Liu Dong, Liu Haiyue, Zhang Xiangmin, et al. Measurement analysis of the security characteristics of the water-energy-food coupling system based on the BP neural network optimized by Sailfish algorithm [J]. Journal of Agricultural Engineering, 2025, 41(11): 229-242. (in Chinese))

[12] Chen Bin. Integrated ecological modelling for sustainable urban metabolism and management [J]. Ecological Modelling, 2015, 318: 1-4.

[13] Ioannou A, Angus A, Brennan F. Risk-based methods for sustainable energy system planning: a review [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, 74: 602-615.

[14] Wang Youzhi, Li Zhong, Guo Shanshan, et al. A risk-based fuzzy boundary interval two-stage stochastic water resources management programming approach under uncertainty[J]. Journal of Hydrology, 2020, 582: 124553.

[15] Zou Jiaxiang, Chen Bin, Wang Saige. Ecological network analysis and optimization of urban water metabolic system in context of energy nexus [J]. Applied Energy, 2025, 388: 125700.

- [16] 洪思扬,程涛,王佳友,等. 贸易视角下广东省水-能源-粮食流通与资源间压力互馈研究[J]. 水资源保护, 2024, 40(6): 48-57. (Hong Siyang, Cheng Tao, Wang Jiayou, et al. Research on water-energy-food circulation and interaction pressure between resources in Guangdong Province from perspective of trade[J]. Water Resources Protection, 2024, 40(6): 48-57. (in Chinese))
- [17] Gatzert N, Kosub T. Risks and risk management of renewable energy projects; the case of onshore and offshore wind parks [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 60: 982-998.
- [18] De Amorim W S, Valduga I B, Ribeiro J M P, et al. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: an analysis of the interactions between food, water, and energy security [J]. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 72: 1-11.
- [19] 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. (Feng Zhongkai, Jiang Linyi, Niu Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin(I): characterization analysis[J]. Water Resource Protection, 2025, 41(5): 160-172. (in Chinese)).
- [20] 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(II):演化规律[J]. 水资源保护, 2025, 41(6): 52-65. (Feng Zhongkai, Jiang Linyi, Niu Wenjing, et al. Water-energy coupling system in nine provinces and autonomous regions of the Yellow River Basin(II): evolution law[J]. Water Resource Protection, 2025, 41(6): 52-65. (in Chinese))
- [21] Feng Yingjie, Wang Jingya, Ren Xinyu, et al. Impact of water utilization changes on the water-land-energy-carbon nexus in watersheds: a case study of Yellow River Basin, China [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 443: 141148.
- [22] Cheng Lei, Tian Jinping, Xu Haoge, 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.
- [23] 吴兆丹,谈心阳,刘烨宁,等. “水资源-能源”纽带关系视角下西北地区能源产业可持续发展路径研究[J]. 水利经济, 2024, 42(5): 9-19. (Wu Zhaodan, Tan Xinyang, Liu Yening, et al. Research on sustainable development path of energy industry in Northwest China from perspective of water-energy nexus [J]. Journal of Economics of Water Resources, 2024, 42(5): 9-19. (in Chinese))
- [24] 鞠琴,卜媛媛,申同庆,等. 黄河水源涵养区生态系统服务要素时空演变及权衡与协同分析[J]. 水资源保护, 2025, 41(2): 38-46. (Ju Qin, Bu Yuanyuan, Shen Tongqing, et al. Spatiotemporal evolution and trade-off and synergy analysis of ecosystem service factors in the Yellow River water conservation area [J]. Water Resources Protection, 2025, 41(2): 38-46. (in Chinese))
- [25] Zhang Cheng, Li Jing, Zhou Zixiang, et al. Application of ecosystem service flows model in water security assessment: a case study in Weihe River Basin, China [J]. Ecological Indicators, 2021, 120: 106974.
- [26] 汤佳,熊忠文,马炎生,等. 多尺度下赣江流域水资源供需风险演变及风险用地识别[J]. 经济地理, 2023, 43(5): 193-204. (Tang Jia, Xiong Zhongwen, Ma Yansheng, et al. Spatio-temporal evolution of water resources supply-demand risks and identification of land risks in the Ganjiang River Basin at Multiple Scales [J]. Economic Geography, 2023, 43(5): 193-204. (in Chinese))
- [27] Chen Dengshuai, Li Jing, Yang Xiaonan, et al. Quantifying water provision service supply, demand and spatial flow for land use optimization: a case study in the YanHe watershed [J]. Ecosystem Services, 2020, 43: 101117.
- [28] Yu Huajun, Xie Wei, Sun Lin, et al. Identifying the regional disparities of ecosystem services from a supply-demand perspective [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021, 169: 105557.
- [29] Yang Wentong, Chen Junfei, Ding Tonghui, et al. Supply-demand security assessment of water-energy-food systems: a perspective on intra-city coupling and inter-city linkages of ecosystem services [J]. Sustainable Cities and Society, 2024, 117: 105964.
- [30] Liu Yating, Chen Bin. Water-energy scarcity nexus risk in the national trade system based on multiregional input-output and network environ analyses [J]. Applied Energy, 2020, 268: 114974.
- [31] 何景媛,肖嫚华,游建飞,等. 基于 GRACE 降尺度分析的江西省山丘区地下水储量变化时空演变规律[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(6): 21-32. (He Jingyuan, Xiao Manhua, You Jianfei, et al. Spatiotemporal evolution patterns of groundwater storage variations in hilly area of Jiangxi Province based on downscaling analysis of GRACE data [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2025, 53(6): 21-32. (in Chinese))
- [32] 史书汇,王晓云,李发文. 淮河流域皖西大别山区地形因子与水系结构关联性分析[J]. 水资源保护, 2024, 40(1): 117-126. (Shi Shuhui, Wang Xiaoyun, Li Fawen. Analysis of correlation between watershed topographic factors and river system structure in Dabie Mountains in western Anhui Province of the Huaihe River Basin [J]. Water Resources Protection, 2024, 40(1): 117-126. (in Chinese))
- [33] 夏婷,王忠静. SEBAL 模型参量敏感性再分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2013, 53(9): 1241-1248. (Xia Ting, Wang Zhongjing. Sensitivity re-analysis of SEBAL to input data [J]. Journal of Tsinghua University (Science & Technology), 2013, 53(9): 1241-1248. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-08-01 编辑: 王芳)