



· 区域可持续发展 ·

# 黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统 安全测度与提升路径

李佳琪<sup>1,2</sup>, 江恩慧<sup>2,3</sup>, 屈博<sup>2,3</sup>

1. 郑州大学 水利与交通学院, 河南 郑州 450001; 2. 黄河水利科学研究院, 河南 郑州 450003;  
3. 水利部黄河重点实验室, 河南 郑州 450003

**摘要** 提高水-能源-粮食复合系统安全水平是保障黄河下游引黄灌区资源合理配置利用与可持续发展的重要前提。利用五元联系数测度2009—2023年黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全水平,并通过模糊集定性比较分析法识别提升复合系统安全水平的组态路径。研究发现:①粮食子系统安全水平最高,由Ⅲ级临界状态向Ⅳ级较安全状态转变,能源子系统安全水平最低,整体处于Ⅱ级较不安全状态;②引黄灌区复合系统整体处于Ⅳ级较安全状态,个别城市个别年份处于Ⅱ级较不安全状态;③共有5条等效的组态路径可以驱动产生高安全水平,各地区未来需根据自身发展情况采取相应措施。从组态视角研究各影响因素间的互动关系,在一定程度上推动了复合系统安全研究从单一权变向整体多维视角转变,研究结论可为黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全发展提供理论依据及决策参考。

**关键词** 水-能源-粮食;五元联系数;模糊集定性比较分析法;黄河下游

**中图分类号:**TV213.4 **DOI:**10.16152/j.cnki.xdxbr.2026-04-020

## Security measurement and improvement path of water-energy-food system in the irrigation area of the Lower Yellow River

Li Jiaqi<sup>1,2</sup>, Jiang Enhui<sup>2,3</sup>, Qu Bo<sup>2,3</sup>

1. School of Water Conservancy and Transportation, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China;  
2. Yellow River Institute of Hydraulic Research, YRCC, Zhengzhou 450003, China;  
3. Key Laboratory of Yellow River, MWR, Zhengzhou 450003, China

**Abstract** Improving the security level of the water-energy-food (WEF) composite system is important for ensuring the rational allocation and utilization of resources and sustainable development of the irrigation area in the Lower Yellow River. The security level of the WEF system in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023 was measured using five-element connection number, and the configuration path to improve the security level of the composite system was identified through fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA). The results showed that: ①The security level of the food subsystem was the highest, transitioning

收稿日期:2025-11-08 修回日期:2026-01-10

**基金项目:**国家自然科学基金(U2243601);河南省软科学研究项目(262400411318);郑州大学青年学生基础研究项目(博士研究生)(ZDBJ2026067)。

**第一作者:**李佳琪,女,博士研究生,从事水文学及水资源、流域系统科学研究,jq2416571171@163.com。

**通信作者:**屈博,男,博士,高级工程师,从事水文学及水资源、流域系统科学研究,qubo\_edu\_hohai@163.com。

from level Ⅲ to level Ⅳ, while the safety level of the energy subsystem was the lowest, overall in an unsafe state of level Ⅱ. ②The overall composite system of the irrigation area in the Lower Yellow River is in a critical state of level Ⅳ, and some cities and years are in an unsafe state of level Ⅱ. ③There are a total of five configuration paths that can generate high security levels, each region needs to make measures based on its own development situation in the future. Studying the interactive relationship between various influencing factors from a configuration perspective has to some extent promoted the transformation of security research on composite system from a single contingency perspective to a holistic multi-dimensional perspective. The research conclusion can provide theoretical basis and decision-making reference for the security development of the WEF system in the irrigation area of the Lower Yellow River.

**Keywords** water-energy-food (WEF); five-element connection number; fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA); the Lower Yellow River

水、能源、粮食是维持人类生活和支撑经济社会发展的基本物质。随着全球人口持续增加,城市化进程不断加快,加之气候变化和人类活动的双重影响,未来水、能源、粮食的供需矛盾将进一步加剧。联合国数据显示,全球约 40% 的耕地面临退化风险,25% 的河流因过度取水而断流,能源消费产生的碳排放量仍以年均 1.5% 的速度增长,粮食危机在非洲和中东地区持续蔓延<sup>[1]</sup>。水是水-能源-粮食耦合系统的核心要素,为保障国家粮食和能源安全,必须加强水资源管理,坚持水资源、能源和粮食协同安全发展<sup>[2]</sup>。黄河下游引黄灌区是我国夏粮主产区,在我国粮食安全大局中具有举足轻重的地位。探讨黄河下游引黄灌区的水-能源-粮食复合系统安全状态及其提升路径,有助于实现“水-能源-粮食”合理利用与安全管理,对保障国家粮食稳产与实现区域可持续发展具有重要的意义。

2011 年波恩会议将水资源安全、能源安全和粮食安全三者视为纽带关系后,三者的关系及影响成为学界研究的热点问题。一方面,将三大要素作为一个整体,基于不同视角考虑水-能源-粮食系统的可持续发展,如系统安全、系统风险和资源协同等<sup>[3-5]</sup>。另一方面,学者们将水、能源和粮食之间的内部关联扩展到涉及社会、经济和生态系统的外部关联,在研究水资源、能源和粮食系统协同作用时引入了气候变化、政治经济要素、可持续发展和协同适应管理等概念<sup>[6-8]</sup>,研究内容涵盖水-能源-粮食系统的概念与内涵界定、量化评估和模拟预测研究<sup>[9-11]</sup>。目前,有关水-能源-粮食复合系统安全评价的研究多以城市、流域为研究对象<sup>[12-14]</sup>。灌区既是粮食生产的核心区域,也是水资源和能源的主要消耗部门,其水-能

源-粮食系统的研究主要包括耦合协调关系测度、资源优化配置,与生态、土地、碳排放等其他要素耦合关系分析等方面<sup>[15-19]</sup>。针对黄河下游引黄灌区的研究主要集中于水资源单因素、水-粮食关系和水土资源方面,包括灌溉节水技术评价、水资源配置规划与利用、农业用水安全评价、地下水水质分析、用水量与农业生产关系、水土资源评价与提升策略等<sup>[20-23]</sup>,缺乏对水-能源-粮食复合系统的全面分析。

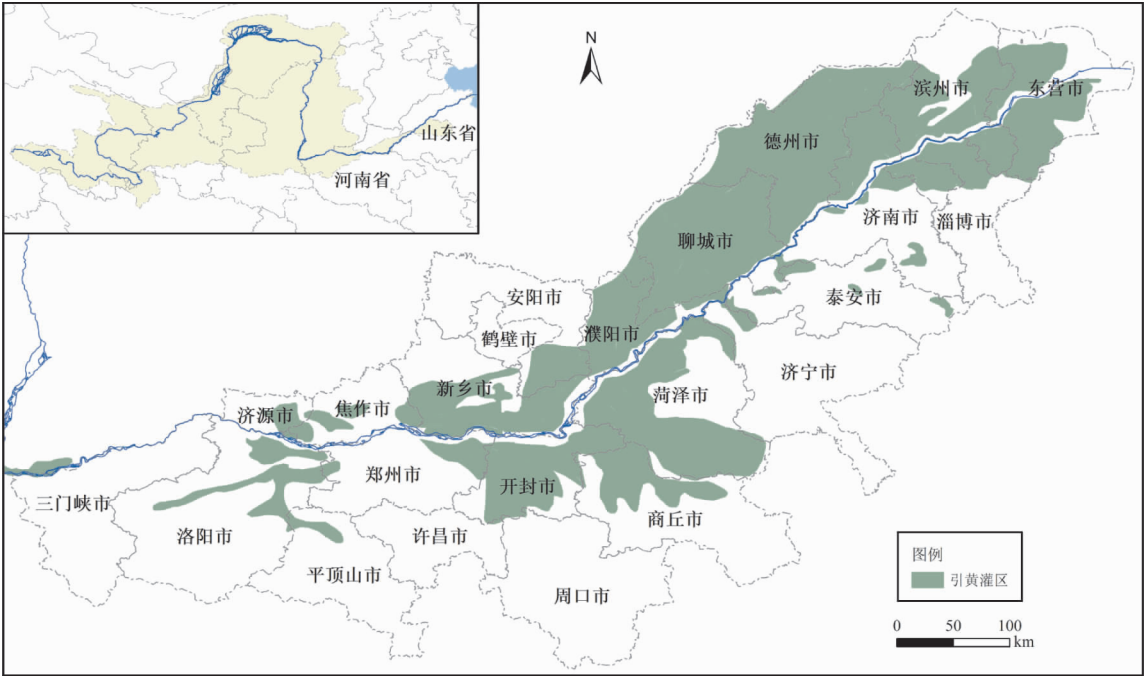
关于灌区水-能源-粮食复合系统安全的测度方法主要包括耦合协调度模型、云模型、综合指数法、趋近理想解的排序方法、物元扩展模型、投影寻踪模型、模糊物元法、五元联系数等<sup>[24-26]</sup>。其中,五元联系数能够描述多种不确定形式耦合的复杂问题,并通过自身的拓展性和运算转换为其他不确定理论的函数,实现对其他形式不确定性的表达,弥补了其他方法难以表达多重不确定性的缺陷,反映事物的确定性与不确定性之间的联系,已在风险评估、安全测度、应急响应等领域得到了广泛应用<sup>[27]</sup>。在复合系统安全水平影响因素识别方面,时间加权回归模型、通径分析法等基于回归的方法应用最为普遍<sup>[28-29]</sup>。此外,地理探测器、地理和系统分析方法、空间计量模型等空间与地理分析方法能够考虑地理空间特性和影响因素之间的相互作用,从而精确量化各因素对安全水平的空间影响,被广泛引入影响因素分析中<sup>[30-31]</sup>。为更加全面、深入地揭示系统内部各因素间的相互关联及其对目标变量的综合影响,灰色关联分析、障碍度模型等系统分析方法逐步得到应用<sup>[32-33]</sup>。随着人工智能技术的飞速发展,神经网络、贝叶斯网络、随机森林模型等机器学习方法近些年来也得到广泛关注<sup>[34-35]</sup>。

综上,现有研究对黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全评估分析还存在以下不足之处。①较少涉及灌区的研究,灌区作为水资源管理的基本单元,其水资源、能源和粮食生产活动紧密相连,形成了一个复杂的复合系统。在这个小尺度上,研究复合系统安全能够更精准地识别资源利用中的瓶颈问题,优化资源配置,提升系统韧性。同时,灌区是农业生产和农村发展的重要基础,保障其复合系统安全对促进区域可持续发展、维护粮食和能源供应稳定具有不可替代的作用。②研究方法大多对因素依赖性问题的分析力度有限,难以解释自变量间相互依赖的多重并发、等效性等复杂因果关系。在定性比较分析(qualitative comparative analysis, QCA)方法的基础上引入模糊集理论,形成模糊集定性比较分析(fuzzy-set qualitative comparative analysis, fsQCA)方法。fsQCA 方法能够处理影响因素之间的模糊性和不确定性,通过集合隶属度的灵活设定,有效整合多源信息,揭示因素间的非线性关系和多重并发路径,为决策者提供一套系统的、具有解释力的复合系统安全水平提升路径集。因此,本文基于黄河下游引黄灌区的发展现状,构建水-能源-粮食复合系统安全评价指标体系,引入五元联系数方法和组态分析探讨水-能源-粮食复合系统安全水平及提升路径,以期黄河下游引黄灌区资源

配置利用与可持续发展提供支撑。

1 研究区概况

黄河下游引黄灌区主要涉及河南、山东两省。考虑数据可获得性,本研究选取河南、山东 23 个地级市开展研究<sup>[36]</sup>(见图 1)。其中,河南省包括郑州、开封、洛阳、平顶山、安阳、鹤壁、新乡、焦作、濮阳、许昌、三门峡、商丘、周口和济源 14 个地级市,山东省包括济南、淄博、东营、济宁、泰安、德州、聊城、滨州和菏泽 9 个地级市。该区域灌溉面积约占黄河流域及下游引黄供水区灌溉总面积的 40% 以上,是我国重要的粮食生产基地,在保障区域和国家粮食安全方面发挥着重要作用<sup>[37]</sup>。然而,水资源短缺、能源结构偏重、粮食生产与生态保护矛盾突出等问题,使其成为黄河流域水-能源-粮食复合系统安全研究的典型区域。本研究紧密围绕国家及地方政策要求,聚焦水资源刚性约束、能源低碳转型、粮食安全保障三大核心目标,到 2030 年实现农田灌溉水有效利用系数提升至 0.6 以上,严格限制高耗水能源项目,遵循“以水定地”原则,通过灌区现代化改造和节水技术推广,统筹粮食生产与生态平衡,提高区域水-能源-粮食复合系统安全水平。



注:本图基于 2011 年黄河勘测规划设计研究院有限公司调研结果图制作。

图 1 研究区域  
Fig. 1 Study area

2 研究方法

2.1 指标体系

为确保指标筛选的科学性和客观性,基于指

标来源、文献分析和专家咨询<sup>[38-41]</sup>,构建黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统 3 层评价指标体系(见表 1):目标层是水-能源-粮食复合系统;准则层包括水、能源、粮食 3 个子系统;指标层包括 33 个指标。

表 1 黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全评价指标体系

| Tab. 1 Evaluation index system for the security of WEF system in the irrigation area of the Lower Yellow River |          |          |                   |                                                |                                            |   |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------|----------|-------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|---|
| 目标层                                                                                                            | 准则层      | 因素层      | 指标层               | 数据来源(单位)                                       | 属性                                         |   |
| 水-能源-粮食复合系统安全                                                                                                  | 水子系统(A)  | 资源状况(A1) | 人均水资源量(A11)       | 水资源总量/年末常住人口(m <sup>3</sup> /人)                | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 产水模数(A12)         | 水资源总量/区域面积(万 m <sup>3</sup> /km <sup>2</sup> ) | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 降水总量(A13)         | 统计数据(亿 m <sup>3</sup> )                        | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 地表水占水资源总量的比例(A14) | 地表水资源总量/水资源总量(%)                               | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 地下水占水资源总量的比例(A15) | 地下水资源总量/水资源总量(%)                               | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          | 利用结构(A2) | 水资源开发利用率(A21)     | 供水量/水资源总量(%)                                   | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 农业用水比重(A22)       | 农业用水量/用水总量(%)                                  | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 工业用水比重(A23)       | 工业用水量/用水总量(%)                                  | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 人均日生活用水量(A24)     | 统计数据(L)                                        | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          | 环境污染(A3) | 城镇生活污水处理率(A31)    | 统计数据(%)                                        | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 废水排放量(A32)        | 统计数据(万 t)                                      | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          | 能源禀赋(B1) | 全年发电量(B11)        | 统计数据(亿 kW·h)                                   | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 人均天然气供应量(B12)     | 统计数据(m <sup>3</sup> /人)                        | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 人均能源产量(B13)       | 统计数据(吨标准煤/人)                                   | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 能源自给率(B14)        | 能源生产量/能源消费量(%)                                 | 正                                          |   |
|                                                                                                                | 能源子系统(B) | 开发利用(B2) | 人均能源消费量(B21)      | 能源消费量/年末常住人口(吨标准煤/人)                           | 正                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 单位 GDP 能耗(B22)    | 能源消耗总量/地区生产总值(万吨标准煤/亿元)                        | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 单位工业增加值能耗(B23)    | 能源消耗总量/工业增加值(万吨标准煤/亿元)                         | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 能源消费弹性系数(B24)     | 能源消费量增长率/GDP 增长率                               | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          | 环境安全(B3) | 二氧化硫排放量(B31)      | 统计数据(t)                                        | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 氮氧化物排放量(B32)      | 统计数据(t)                                        | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          |          | 一般工业固体废物排放量(B33)  | 统计数据(万 t)                                      | 负                                          |   |
|                                                                                                                |          | 粮食子系统(C) | 生产安全(C1)          | 粮食播种面积占比(C11)                                  | 粮食作物播种面积/总播种面积(%)                          | 正 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 单位面积粮食产量(C12)                                  | 全年粮食总产量/粮食作物实际占用的耕地面积(kg/hm <sup>2</sup> ) | 正 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 耕地有效灌溉面积占比(C13)                                | 统计数据(%)                                    | 正 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 粮食自给率(C14)                                     | 粮食产量/粮食消费量(%)                              | 正 |
|                                                                                                                |          |          | 消费安全(C2)          | 城镇恩格尔系数(C21)                                   | 统计数据(%)                                    | 负 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 农村恩格尔系数(C22)                                   | 统计数据(%)                                    | 负 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 人口自然增长率(C23)                                   | 统计数据(‰)                                    | 负 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 人均粮食消费量(C24)                                   | 粮食消费量/年末常住人口(kg/人)                         | 正 |
|                                                                                                                |          |          | 生态安全(C3)          | 粮食消费价格指数(C25)                                  | 统计数据(%)                                    | 负 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 森林覆盖率(C31)                                     | 统计数据(%)                                    | 正 |
|                                                                                                                |          |          |                   | 化肥施用强度(C32)                                    | 施用化肥总量/农田总面积(kg/hm <sup>2</sup> )          | 负 |

参考相关研究<sup>[42-43]</sup>,将安全等级划分为“不安全、较不安全、临界状态、较安全、安全”5 个等级,各等级的含义如表 2 所示。

表 2 黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全等级

Tab.2 Security level of WEF system in the irrigation area of the Lower Yellow River

| 安全水平 | 等级  | 等级特征                                |
|------|-----|-------------------------------------|
| 不安全  | I   | 复合系统几乎无法维持基本稳定,面临崩溃风险,各子系统均处于极度恶劣状态 |
| 较不安全 | II  | 系统面临严重挑战和风险,水资源短缺、能源不稳定、粮食不安全问题突出   |
| 临界状态 | III | 系统面临挑战和压力,水资源、能源、粮食均存在不同程度的问题       |
| 较安全  | IV  | 系统整体稳定,但部分子系统存在潜在风险,需关注并采取应对措施对     |
| 安全   | V   | 复合系统高度稳定可持续,水资源、能源、粮食均充足且管理得当       |

2.2 复合系统安全评价模型

2.2.1 指标权重确定

采用基于指标相关性的指标权重确定方法(criteria importance through intercriteria correlation, CRITIC)确定水-能源-粮食复合系统安全评价指标的权重。改进的 CRITIC 法用平均差替换标准差,将熵权法中的信息熵引入算法,能更好地体现指标数据的离散程度。具体步骤详见文献[44]。

2.2.2 指标联系度计算

Step 1: 单指标联系度。

将复合系统安全评价标准分为 5 级,有  $S_1$ 、 $S_2$ 、 $S_3$ 、 $S_4$  共 4 个门限值,分别对应相应的等级区间。

构建评价指标集  $A = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ ,评价等级标准为  $S_k(k = 1, 2, \dots, K)$ 。评价指标在第  $k$  级的评价等级看作另一个集合  $B_k$ ,则集合  $A$  与  $B_k$  构

成一组集对  $H(A, B_k)$ 。  $N$  为集对  $H$  中的特性总数;  $S$  为集合  $A$  与  $B_k$  共有特性数;  $P$  为对立特性数;  $F = N - S - P$ ,代表既 not 共有也不对立的特性数。由此可得集对  $H(A, B_k)$  的联系度表达式<sup>[45]</sup>:

$$U_{A-B_k} = \frac{S}{N} + \frac{F}{N}i + \frac{P}{N}j \tag{1}$$

设定参数  $a$ 、 $b$ 、 $c$  分别对应同一度、差异度、对立度,由于系统安全存在确定性和不确定性,因此,将差异度  $b$  进行拓展:

$$U = a + b_1i_1 + b_2i_2 + b_3i_3 + cj \tag{2}$$

式中: $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $c$  取值范围均为  $[0, 1]$ ,且  $a + b_1 + b_2 + b_3 + c = 1$ ;差异度系数  $i_1$ 、 $i_2$ 、 $i_3$  的取值范围为  $[0, 1]$ ;对立度系数  $j$  取值为  $-1$ 。

对于正向型指标,单指标联系度  $\mu_c^p$  为:

$$\mu_c^p = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_n \geq s_1 \\ \frac{2x_n - s_1 - s_2}{s_1 - s_2} + \frac{2s_1 - 2x_n}{s_1 - s_2}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{s_1 + s_2}{2} \leq x_n < s_1 \\ 0 + \frac{2x_n - s_2 - s_3}{s_1 - s_3}i_1 + \frac{s_1 + s_2 - 2x_n}{s_1 - s_3}i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{s_2 + s_3}{2} \leq x_n < \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{2x_n - s_3 - s_4}{s_2 - s_4}i_2 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_n}{s_2 - s_4}i_3 + 0j, \frac{s_3 + s_4}{2} \leq x_n < \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2x_n - 2s_4}{s_3 - s_4}i_3 + \frac{s_3 + s_4 - 2x_n}{s_3 - s_4}j, s_4 \leq x_n < \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, x_n < s_4 \end{cases} \tag{3}$$

对于负向型指标,单指标联系度  $\mu_c^n$  为:

$$\mu_c^n = \begin{cases} 1 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, x_n \leq s_1 \\ \frac{s_1 + s_2 - 2x_n}{s_2 - s_1} + \frac{2x_n - 2s_1}{s_2 - s_1}i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 0j, s_1 < x_n \leq \frac{s_1 + s_2}{2} \\ 0 + \frac{s_2 + s_3 - 2x_n}{s_3 - s_1}i_1 + \frac{2x_n - s_1 - s_2}{s_3 - s_1}i_2 + 0i_3 + 0j, \frac{s_1 + s_2}{2} < x_n \leq \frac{s_2 + s_3}{2} \\ 0 + 0i_1 + \frac{s_3 + s_4 - 2x_n}{s_4 - s_2}i_2 + \frac{2x_n - s_2 - s_3}{s_4 - s_2}i_3 + 0j, \frac{s_2 + s_3}{2} < x_n \leq \frac{s_3 + s_4}{2} \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + \frac{2s_4 - 2x_n}{s_4 - s_3}i_3 + \frac{2x_n - s_3 - s_4}{s_4 - s_3}j, \frac{s_3 + s_4}{2} < x_n \leq s_4 \\ 0 + 0i_1 + 0i_2 + 0i_3 + 1j, x_n > s_4 \end{cases} \tag{4}$$

Step 2: 准则层联系度。

将每个指标的联系度乘以其对应的权重,求和后即可得到准则层联系度 $\mu_{C \sim B}$ :

$$\mu_{C \sim B} = \sum_{g=1}^l \omega_g a_g + \sum_{g=1}^l \omega_g b_{g,1} i_1 + \sum_{g=1}^l \omega_g b_{g,2} i_2 + \sum_{g=1}^l \omega_g b_{g,3} i_3 + \sum_{g=1}^l \omega_g c_g j$$

(5)

式中: $C$ 为指标层; $B$ 为准则层;每个准则层包含 $l$ 个指标; $a_g$ 、 $b_g$ 、 $c_g$ 分别表示同一度、差异度、对立度; $\omega_g$ 为第 $g$ 个指标的权重。

Step 3: 目标层联系度。

将式(5)中的单指标联系度与权重分别替换为准则层对应参数,得到目标层联系度 $\mu_{B \sim A}$ :

$$\mu_{B \sim O} = \sum_{g=1}^Z \omega_g a_g + \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,1} i_1 + \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,2} i_2 + \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,3} i_3 + \sum_{g=1}^Z \omega_g c_g j$$

(6)

式中: $O$ 为目标层; $Z$ 为目标层中指标的总数。

2.2.3 确定各地区复合系统安全等级

为提升评估的客观性,引入置信度准则以确定安全等级:

$$h_k = (f_1 + f_2 + \cdots + f_k) > \lambda, k = 1, 2, \cdots, K$$

(7)

本文以五元联系数的计算为例,取 $K = 5$ 。

$$f_1 = \sum_{g=1}^Z \omega_g a_g, f_2 = \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,1}, f_3 = \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,2}, f_4 = \sum_{g=1}^Z \omega_g b_{g,3}, f_5 = \sum_{g=1}^Z \omega_g c_g$$

其中: $f_1$ 为加权同一度; $f_2$ 、 $f_3$ 、 $f_4$ 为加权差异度; $f_5$ 为加权对立度。置信度 $\lambda$ 的取值范围为 $[0.5, 0.7]$ ,本文设定 $\lambda = 0.5$ , $k$ 表示评价等级, $h_k$ 为目标层的 $k$ 元联系度,当 $\lambda$ 满足

$h_{k-1} \leq \lambda \leq h_k$ 条件时,安全等级判定为第 $k$ 级。

2.2.4 确定黄河下游引黄灌区复合系统安全等级

采用均值法,取 23 个地级市五元联系数的均值得到黄河下游引黄灌区 2009—2023 年的五元联系数 $h_k$ ,确定复合系统安全等级。

$$h_k = (f_1 + f_2 + \cdots + f_k) > \lambda,$$

$$k = 1, 2, \cdots, K$$

(8)

其中: $f_1 = 1/23(f_{1(\text{Zhengzhou})} + f_{1(\text{Kaifeng})} + f_{1(\text{Luoyang})} + \cdots + f_{1(\text{Heze})})$ ,  $f_2 = 1/23(f_{2(\text{Zhengzhou})} + f_{2(\text{Kaifeng})} + f_{2(\text{Luoyang})} + \cdots + f_{2(\text{Heze})})$ ,  $f_3 = 1/23(f_{3(\text{Zhengzhou})} + f_{3(\text{Kaifeng})} + f_{3(\text{Luoyang})} + \cdots + f_{3(\text{Heze})})$ ,  $f_4 = 1/23(f_{4(\text{Zhengzhou})} + f_{4(\text{Kaifeng})} + f_{4(\text{Luoyang})} + \cdots + f_{4(\text{Heze})})$ ,  $f_5 = 1/23(f_{5(\text{Zhengzhou})} + f_{5(\text{Kaifeng})} + f_{5(\text{Luoyang})} + \cdots + f_{5(\text{Heze})})$ 。

2.3 模糊集定性比较分析法

组态视角下,水-能源-粮食复合系统内部构成要素对其安全水平的影响并非相互独立,本文运用 fsQCA 方法研究黄河下游引黄灌区 23 个地级市水-能源-粮食复合系统内部要素间的协同互动关系,寻找产生高安全水平的组态路径。

2.3.1 变量测量和校准

将综合评价法计算的水-能源-粮食复合系统安全指数作为结果变量,评价指标体系中因素层的 9 个因素作为前因变量。参考 Fiss<sup>[46]</sup>的研究,运用直接校准法将连续的原始数据校准为模糊集,为每个变量设置 3 个关键锚点,分别是 0.75 分位点(完全隶属)、0.50 分位点(交叉点)和 0.25 分位点(完全不隶属)。隶属度越高,样本隶属于目标集合的程度越高,当隶属度较低时,则为非高。结果如表 3 所示。

表 3 校准与描述性统计

Tab. 3 Calibration and descriptive statistics

| 条件和结果    | 模糊集校准 |       |       | 描述性统计 |       |       |       |
|----------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|          | 完全不隶属 | 交叉点   | 完全隶属  | 均值    | 标准差   | 最大值   | 最小值   |
| 复合系统安全指数 | 0.044 | 0.048 | 0.051 | 0.047 | 0.007 | 0.065 | 0.038 |
| 资源状况     | 0.089 | 0.093 | 0.097 | 0.092 | 0.007 | 0.105 | 0.077 |
| 利用结构     | 0.052 | 0.056 | 0.057 | 0.054 | 0.004 | 0.061 | 0.045 |
| 环境污染     | 0.012 | 0.013 | 0.018 | 0.016 | 0.007 | 0.033 | 0.008 |
| 能源禀赋     | 0.045 | 0.048 | 0.054 | 0.050 | 0.007 | 0.069 | 0.040 |
| 开发利用     | 0.062 | 0.070 | 0.075 | 0.067 | 0.010 | 0.080 | 0.046 |
| 环境安全     | 0.058 | 0.064 | 0.073 | 0.062 | 0.016 | 0.092 | 0.023 |
| 生产安全     | 0.079 | 0.082 | 0.087 | 0.082 | 0.007 | 0.093 | 0.061 |
| 消费安全     | 0.024 | 0.034 | 0.040 | 0.033 | 0.011 | 0.053 | 0.016 |
| 生态安全     | 0.811 | 0.847 | 0.888 | 0.845 | 0.096 | 1.096 | 0.700 |

2.3.2 单因素必要条件分析

必要条件是指当结果发生时必须要存在的条件,其面临在简约解中被化简掉的风险。在 fsQCA 中,通常用一致性水平衡量结果变量在多大程度上隶属于某条件的子集。计算公式如下:

R = \frac{\sum \min(X\_i, Y\_i)}{\sum X\_i} (Y\_i \leq X\_i) \tag{9}

T = \frac{\sum \min(X\_i, Y\_i)}{\sum Y\_i} (Y\_i \leq X\_i) \tag{10}

式中:R 和 T 分别表示一致性和覆盖度;X<sub>i</sub> 为前因变量;Y<sub>i</sub> 为结果变量。

2.3.3 多因素组态分析

本文将原始一致性阈值设定为 0.8, PRI 一致性设置为 0.7, 案例频数阈值设置为 1<sup>[47]</sup>。在 fsQCA 中,分析结果包括复杂解、中间解和简约解,采用 fsQCA4.1 生成的“简单解 + 中间解”的

常用呈现方式汇报组态结果,其中,同时存在于简单解和中间解的前因条件为核心条件,仅存在于中间解的前因条件为边缘条件。

2.4 数据来源

本文的数据主要来源于 2010—2024 年《河南省统计年鉴》《山东省统计年鉴》及 2009—2023 年各地级市的《水资源公报》。通过原始数据计算得到部分间接指标,采用线性插值法对缺失的数据进行补充。

3 结果与分析

3.1 WEF 复合系统安全评价

3.1.1 子系统安全评价

黄河下游引黄灌区及 23 个地级市 2009—2023 年水子系统安全评价等级结果如图 2 所示。

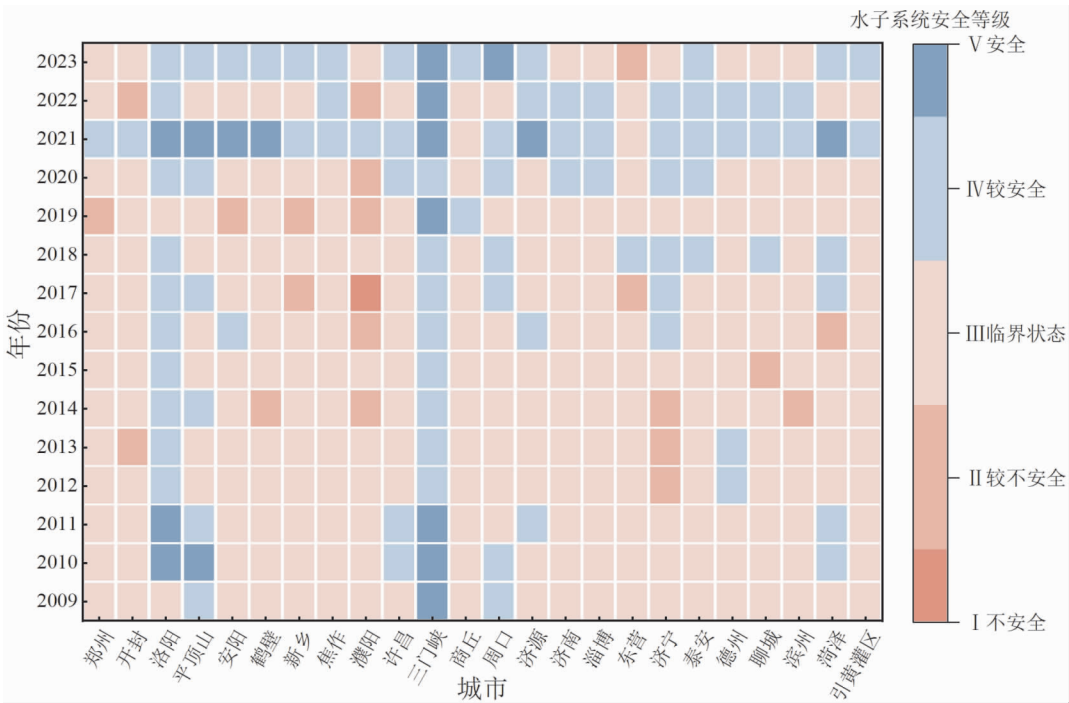


图 2 2009—2023 年黄河下游引黄灌区及 23 个地级市水子系统安全等级

Fig. 2 Security level of water subsystem in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023

由图 2 可知,2009—2023 年引黄灌区水子系统安全水平整体处于Ⅲ级临界状态。对比不同城市,三门峡和洛阳Ⅳ级较安全状态占比最多,濮阳在Ⅲ级临界状态和Ⅱ级较不安全状态间变动,2017 年处于Ⅰ级不安全状态,这是因为濮阳人均水资源量、降水总量均较低,受制于水资源量的变

动以及工业废水、农业面源污染所带来的水质问题,濮阳水子系统安全水平相对较低,且在临界和较不安全状态间变动。

黄河下游引黄灌区及 23 个地级市 2009—2023 年能源子系统安全评价等级如图 3 所示。

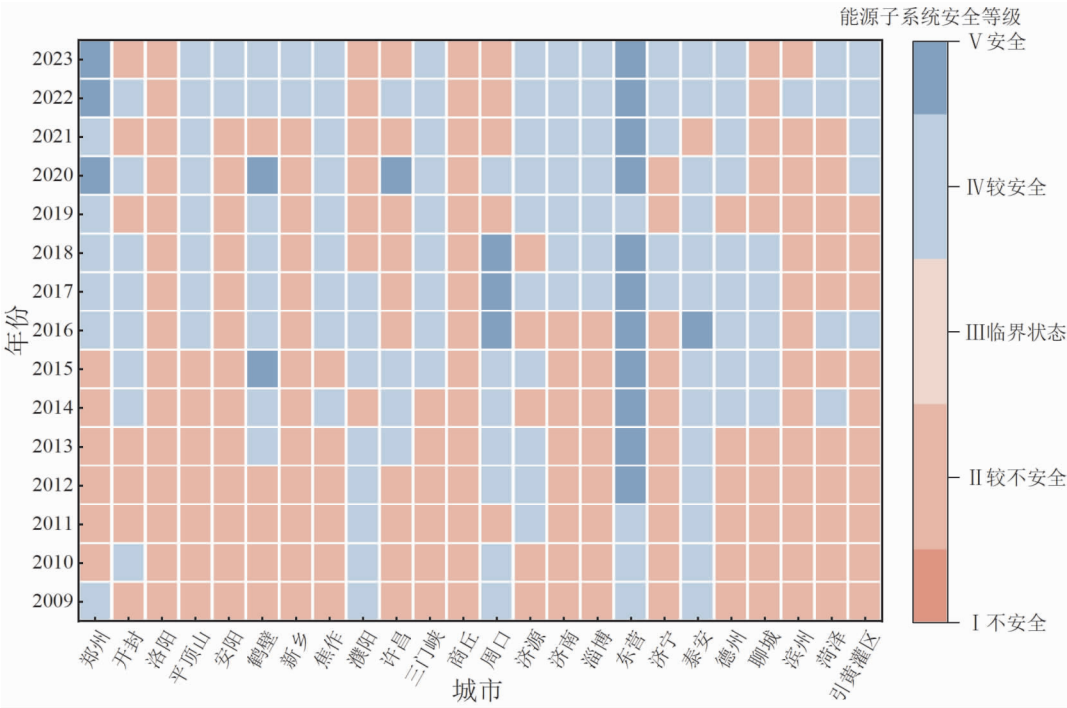


图 3 2009—2023 年黄河下游引黄灌区及 23 个地级市能源子系统安全等级

Fig.3 Security level of energy subsystem in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023

由图 3 可知,2009—2023 年引黄灌区能源子系统安全水平整体处于 II 级较不安全状态,部分城市如郑州、平顶山、焦作等,自 2016 年开始提升至 IV 级较安全状态。东营安全水平较高,2019—2011 年和 2019 年处于 IV 级较安全状态,其余年份均处于 V 级安全状态。商丘和洛阳则始终处于

II 级较不安全状态,能源安全不容乐观。这是因为:商丘能源结构单一,供应稳定性受基础设施制约;洛阳高耗能行业(如石化、有色金属)占工业增加值比重较高,能源需求压力大。

黄河下游引黄灌区及 23 个地级市 2009—2023 年粮食子系统安全评价等级如图 4 所示。

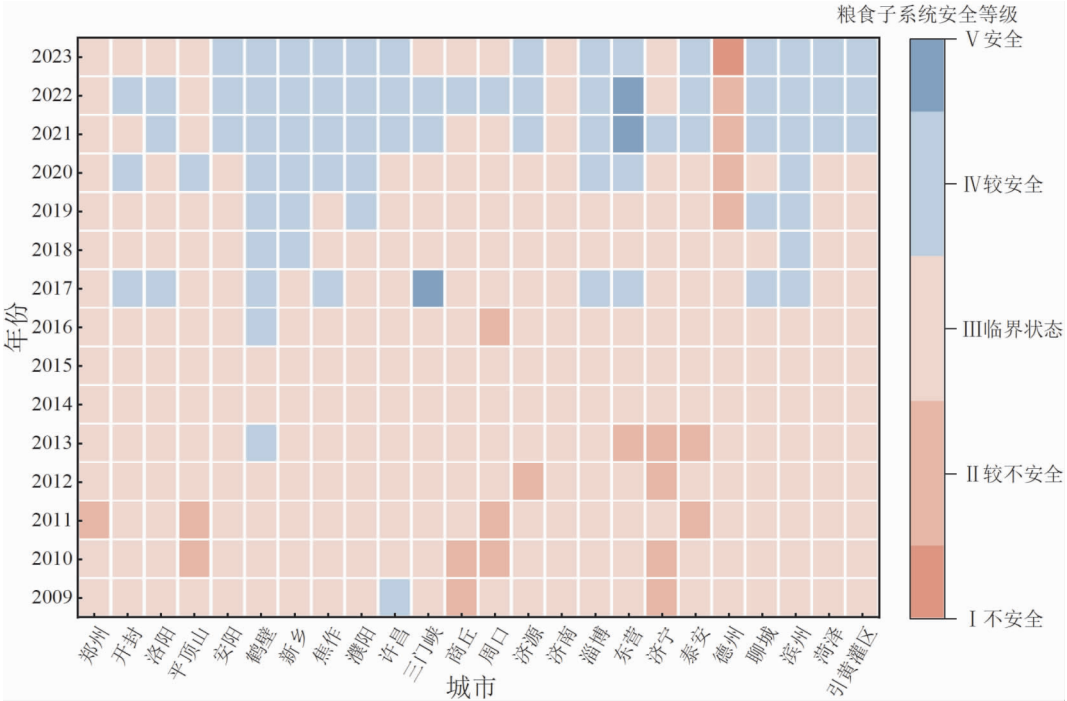


图 4 2009—2023 年黄河下游引黄灌区及 23 个地级市粮食子系统安全等级

Fig.4 Security level of food subsystem in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023

由图 4 可知,2009—2023 年引黄灌区粮食子系统安全水平整体处于Ⅲ级临界状态,2021 年开始提升至Ⅳ级较安全水平。23 个地级市Ⅲ级占比最多,安阳、济源、泰安、菏泽等城市自 2021 年开始提升至Ⅳ级较安全状态,东营 2021 和 2022 年处于Ⅴ级安全状态。济宁和德州安全水平相对较低,粮食供需压力较大。

综上所述,黄河下游引黄灌区水和粮食子系统整体处于Ⅲ级临界安全状态,能源子系统整体处于Ⅱ级较不安全状态。于龙哉等研究发现水资源和能源子系统安全水平较低,两者共同主导了

黄河流域内蒙古段的水-能源-粮食系统协同安全水平<sup>[48]</sup>,与本文的研究结果一致。李海涛等研究了黄河流域水资源安全问题,发现存在严重的供水缺口,进而影响能源安全和粮食安全<sup>[49]</sup>。因此,需要重点关注水和能源子系统安全问题,以提升系统整体安全水平。

3.1.2 复合系统安全评价

利用五元联系数公式和置信度准则进行时空诊断分析,2009—2023 年黄河下游引黄灌区及 23 个地级市的水-能源-粮食复合系统安全评价等级结果如图 5 所示。

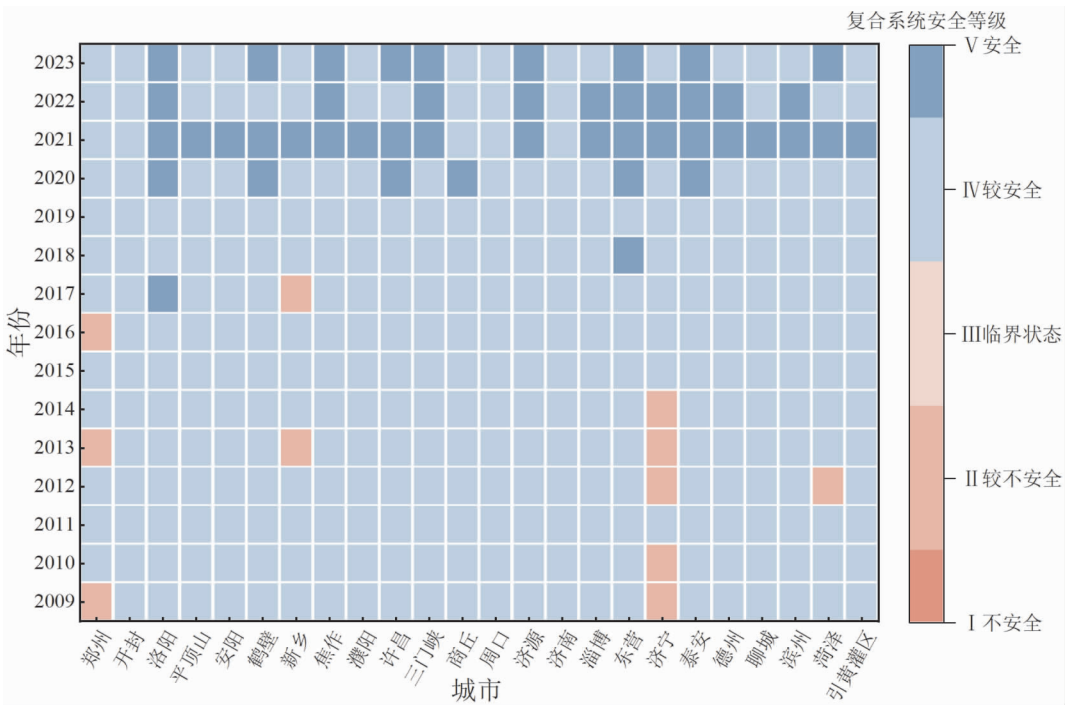


图 5 2009—2023 年黄河下游引黄灌区及 23 个地级市复合系统安全等级

Fig. 5 Security level of composite system in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023

由图 5 可知,2009—2023 年引黄灌区复合系统安全水平呈上升趋势,整体处于Ⅳ级较安全状态,这一结论与已有研究成果<sup>[50]</sup>一致。此外,本文详细分析了各个地级市的水-能源-粮食复合系统安全时空演化水平。2020 年之前,23 个地级市Ⅳ级占比最多,个别城市个别年份处于Ⅱ级较不安全状态,如菏泽 2012 年、济宁 2009—2010 年和 2012—2014 年,2020 年之后,多数城市上升至Ⅴ级安全状态。济宁 2012—2014 年水和能源子系统均处于Ⅱ级较不安全状态,2009—2010 年、2012—2013 年粮食子系统处于Ⅱ级较不安全状态,导致复合系统安全状况在 2009—2010 年、2012—2014 年处于Ⅱ级较不安全状态。

图 6 展示了黄河下游引黄灌区 23 个地级市复合系统安全评价等级的空间分布。可以看出,河南省多数城市长期处于Ⅲ级临界状态。洛阳自 2017 年开始向Ⅳ级较安全状态发展,焦作、三门峡和济源 2022 和 2023 年均处于Ⅳ级较安全状态,各子系统安全等级的提升带动复合系统安全等级的提升。洛阳和三门峡水子系统长期处于Ⅳ级较安全状态,三门峡部分年份处于Ⅴ级安全状态,新乡、焦作和商丘长期处于Ⅲ级临界状态,个别年份达到Ⅳ级较安全状态。洛阳、安阳、新乡和商丘等城市能源子系统长期处于Ⅱ级较不安全状态,平顶山和焦作自 2016 年开始提升至Ⅳ级较安全状态。部分城市如洛阳、许昌、三门峡等粮食子系统长期处于Ⅲ级临界状态,许昌自 2021 年开始提升至Ⅳ级较安全状态,三门峡 2017 年处于Ⅴ级

安全状态,2021—2022 年处于Ⅳ级较安全状态。

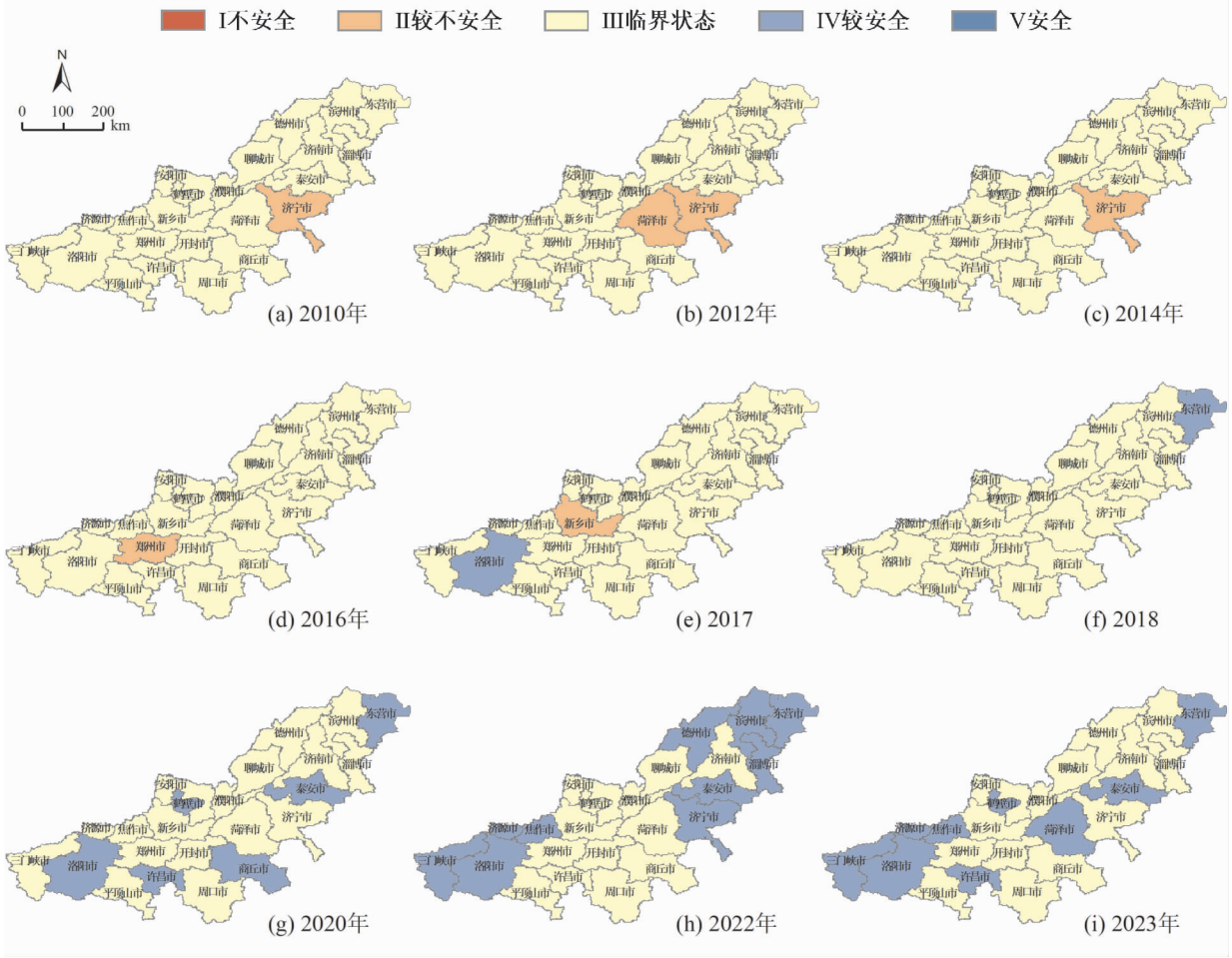


图 6 2009—2023 年黄河下游引黄灌区复合系统安全等级空间分布

Fig. 6 Distribution of the composite system security level in the irrigation area of the Lower Yellow River from 2009 to 2023

与河南省较为接近,山东省多数城市也处于Ⅲ级临界状态。自 2020 年开始,东营、泰安一直处于Ⅳ级较安全状态,济宁多年处于Ⅲ级临界状态。东营能源和粮食子系统安全等级的提升,以及泰安水和粮食子系统安全等级的提升推动复合系统整体安全等级得以提升,而济宁 3 个子系统的发展状况相对不容乐观。具体来看,东营和泰安水子系统长期处于Ⅲ级临界状态,泰安自 2018 年开始提升至Ⅳ级较安全状态。东营能源子系统 2012—2018 年、2020—2023 年处于Ⅴ级安全状态,泰安则长期处于Ⅳ级安全状态。东营粮食子系统长期处于Ⅲ级临界状态,部分年份如 2021—2022 年处于Ⅴ级安全状态,2017、2020 和 2023 年处于Ⅳ级较安全状态。泰安粮食子系统长期处于Ⅲ级临界状态,2021 年开始提升至Ⅳ级较安全状态。济宁水子系统 2009—2015 年在Ⅲ级和Ⅱ级间变动;能源子系统长期处于Ⅱ级较不安全状态;粮食子系统长期处于Ⅲ级临界状态,部分年份如

2009、2010、2012 和 2013 年处于Ⅱ级较不安全状态。

3.2 复合系统组态分析

3.2.1 复合系统高安全水平的单一条件必要性

当一致性水平高于 0.9 时,可认为该条件构成结果的必要条件,结果如表 4 所示。所有前因条件的一致性水平平均低于 0.9,不存在复合系统高安全的必要条件。该结果表明,单一影响要素难以发挥决定性作用,需要多要素互动协同、联合互补才能提升复合系统安全水平。

3.2.2 产生复合系统高安全水平的组态

实现复合系统高安全水平的路径如表 5 所示,单一解的一致性均高于阈值 0.8,表明 5 条组态充分有效,结果可信。组态解的总体一致性为 0.959,说明 5 条组态包含的所有案例中,有 95.9% 的案例呈现出高安全水平。解的总体覆盖度为 0.498,意味着 5 条组态可以解释 49.8% 的高安全水平案例。为避免案例数据的偶然性对结

果产生偏差,本文通过调整一致性阈值和案例频数阈值进行稳健性检验,将 PRI 一致性由 0.7 调至 0.75,案例频数阈值由 1 调至 2。分析发现,得

到的结果较调整前的组态构型、组态数量、一致性、覆盖度未发生实质性改变,说明研究结果具有良好的稳健性。

表 4 单一必要性条件分析结果

Tab. 4 Results of single-condition necessity analysis

| 变量   | 一致性   | 覆盖度   | 变量    | 一致性   | 覆盖度   |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 资源状况 | 0.688 | 0.609 | ~资源状况 | 0.326 | 0.330 |
| 利用结构 | 0.750 | 0.605 | ~利用结构 | 0.316 | 0.359 |
| 环境污染 | 0.897 | 0.521 | ~环境污染 | 0.124 | 0.315 |
| 能源禀赋 | 0.547 | 0.485 | ~能源禀赋 | 0.488 | 0.493 |
| 开发利用 | 0.599 | 0.473 | ~开发利用 | 0.430 | 0.504 |
| 环境安全 | 0.737 | 0.555 | ~环境安全 | 0.097 | 0.225 |
| 生产安全 | 0.676 | 0.488 | ~生产安全 | 0.343 | 0.468 |
| 消费安全 | 0.758 | 0.507 | ~消费安全 | 0.048 | 0.208 |
| 生态安全 | 0.675 | 0.483 | ~生态安全 | 0.343 | 0.476 |

注:“~”表示逻辑运算“非”。

表 5 2009—2023 年高安全水平组态路径

Tab. 5 Configuration path of high safety level from 2009 to 2023

| 前因条件  | 高安全水平组态                                                                                                                                     |       |       |       |       |
|-------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------|-------|-------|-------|
|       | 组态 1                                                                                                                                        | 组态 2  | 组态 3  | 组态 4  | 组态 5  |
| 资源状况  | ●                                                                                                                                           | ●     | ●     | ●     | ⊗     |
| 利用结构  | ●                                                                                                                                           | ●     | ●     | ●     | ⊗     |
| 环境污染  | ●                                                                                                                                           | ●     | ●     | ⊗     | ●     |
| 能源禀赋  | ●                                                                                                                                           | ●     | ⊗     | ⊗     | ●     |
| 开发利用  | ●                                                                                                                                           |       | ⊗     | ⊗     | ●     |
| 环境安全  | ●                                                                                                                                           | ●     | ●     | ●     | ●     |
| 生产安全  | ⊗                                                                                                                                           | ⊗     | ●     | ●     | ●     |
| 消费安全  | ●                                                                                                                                           | ●     | ●     | ●     | ●     |
| 生态安全  |                                                                                                                                             | ●     | ⊗     | ●     | ●     |
| 一致性   | 0.976                                                                                                                                       | 0.974 | 0.970 | 0.854 | 0.854 |
| 原始覆盖度 | 0.188                                                                                                                                       | 0.174 | 0.118 | 0.083 | 0.102 |
| 唯一覆盖度 | 0.052                                                                                                                                       | 0.034 | 0.104 | 0.067 | 0.095 |
| 覆盖案例  | 洛阳(11,19),平顶山(11,20,21),鹤壁(12),焦作(13),三门峡(10,11,21,22),商丘(13),周口(17),济源(15,16,17,19,21,22),济南(09,10),淄博(09,17),东营(12),泰安(15,16,17,19,22,23) |       |       |       |       |
|       | 洛阳(10),平顶山(10),鹤壁(18,23),三门峡(09,10,11,23),周口(15,18,23),济源(18),济南(20,21),淄博(09,11,20),泰安(20),滨州(15),菏泽(18)                                   |       |       |       |       |
|       | 安阳(16),焦作(11),商丘(15,16,18,19,23),周口(09,10,13,20)                                                                                            |       |       |       |       |
|       | 商丘(12),济南(11,13),东营(18),滨州(12,13,16),菏泽(11,19,20,21,23)                                                                                     |       |       |       |       |
|       | 郑州(18),鹤壁(12,13,15,16),焦作(10,17),许昌(10),东营(11,22)                                                                                           |       |       |       |       |
| 总体一致性 | 0.959                                                                                                                                       |       |       |       |       |
| 总体覆盖度 | 0.498                                                                                                                                       |       |       |       |       |

注:●表示核心条件存在;⊗表示核心条件缺失;●表示边缘条件存在;⊗表示边缘条件缺失;空白表示该条件可出现也可不出现。

由表 5 可以看出,共有 5 条等效路径可以驱动产生复合系统高安全水平,资源状况、利用结构、环境安全和消费安全是影响安全水平提升的核心要素。Wang 等发现能源消耗系数和人均水资源总量是制约水-能源-粮食系统发展的重要内部因素,外部因素则包括降水、气温、人口及夜间光照强度等<sup>[51]</sup>。Yang 等发现城镇化水平抑制了黄河流域水-能源-粮食系统的可持续发展,而对外贸易水平、技术进步水平、环境调控能力、工业化水平、基础设施水平等则促进了可持续发展水平的提升<sup>[52]</sup>。现有研究多是得出单一影响因素,本文发现高安全水平的产生是多因素相互作用的结果,通过影响因素的排列组合,找寻实现高安全水平的组态路径。

1)组态 1 指出,以水子系统资源状况、利用结构、环境污染,能源子系统中的能源禀赋、环境安全和粮食子系统中的消费安全为核心条件,能源子系统中的开发利用为边缘条件可以实现高安全水平。组态 1 的一致性为 0.976,原始覆盖度为 0.188,说明可解释 18.8% 的案例。具备以上组态特征的有洛阳、平顶山、三门峡、济源、济南、淄博、泰安等地区。

2)组态 2 指出,以水子系统资源状况、利用结构、环境污染,能源子系统中的能源禀赋、环境安全和粮食子系统中的消费安全为核心条件,粮食子系统中的生态安全为边缘条件可以实现高安全水平。组态 2 的一致性为 0.974,原始覆盖度为 0.174,说明可解释 17.4% 的案例。具备以上组态特征的有鹤壁、平顶山、周口、济南、淄博等地区。

3)组态 3 指出,以水子系统资源状况、利用结构、环境污染,能源子系统中的环境安全,粮食子系统中的消费安全为核心条件,粮食子系统中的生产安全为边缘条件可以实现高安全水平。组态 3 的一致性为 0.970,原始覆盖度为 0.118,说明可解释 11.8% 的案例。涵盖商丘、周口、焦作等地区。

4)组态 4 指出,以水子系统资源状况、利用结构,能源子系统中的环境安全,粮食子系统中的消费安全为核心条件,粮食子系统中的生产安全和生态安全为边缘条件可以实现高安全水平。组态 4 的一致性为 0.854,原始覆盖度为 0.083,说明可解释 8.3% 的案例。具备以上组态特征的有济南、滨州、菏泽等地区。

5)组态 5 指出,以水子系统的环境污染,能源子系统中的能源禀赋、环境安全,粮食子系统中的消费安全为核心条件,能源子系统中的开发利用以及粮食子系统中的生产安全和生态安全为边缘条件可以实现高安全水平。组态 5 的一致性为 0.854,原始覆盖度为 0.102,说明可解释 10.2% 的案例。具备以上组态特征的有鹤壁、焦作、东营等地区。

部分地区如鹤壁、焦作、商丘、周口、东营存在 3 条路径可以驱动产生高安全水平,这些地区在制定策略时具有更强的灵活性,可根据自身的实际情况,选择合适的路径进行建设。

## 4 结论

本文构建了黄河下游引黄灌区水-能源-粮食复合系统安全评价指标体系,采用五元联系数方法评估了引黄灌区 2009—2023 年复合系统及子系统安全状况,并基于组态分析识别了提升复合系统安全水平的路径,主要结论如下。

1)子系统安全水平差异显著。粮食子系统安全水平最高,2021 年后大部分城市由Ⅲ级临界状态提升至Ⅳ级较安全水平;水子系统整体处于Ⅲ级临界状态;能源子系统长期处于Ⅱ级较不安全水平。

2)2009—2023 年引黄灌区复合系统安全水平整体处于Ⅳ级较安全状态,2021 年提升至Ⅴ级安全水平。23 个地级市长期处于Ⅳ级较安全水平。

3)组态分析表明,有 5 条等效路径可驱动产生高安全水平。资源状况、利用结构、环境安全与消费安全是影响安全水平提升的核心要素,高安全水平由多因素协同作用实现。

4)区域提升路径存在空间分异。河南省多数地区(如洛阳、三门峡、平顶山等)应构建以水环境治理为核心、能源清洁转型与粮食安全保障为支撑的协同体系;山东省多数地区(如济南、淄博、菏泽等)宜实施以能源清洁转型为核心、水资源合理利用与粮食安全保障为支撑的治理路径,因地制宜提升复合系统安全水平。

## 参考文献

[1] Hua E, Han X, Bai Y W, et al. Synergy of water use in water-energy-food nexus from a symbiosis perspec-

- itive: A case study in China[J]. *Energy*, 2023, 283: 129164.
- [2] 王浩,姜珊,朱永楠,等. 中国水-能-粮耦合系统协同安全发展战略研究[J]. *中国水利*, 2024(17): 5-12.
- Wang H, Jiang S, Zhu Y N, et al. Research on the collaborative safety development strategy of water-energy-food nexus in China[J]. *China Water Resources*, 2024(17): 5-12.
- [3] 祝庆,吴文婕,王志强,等. 新疆生态系统服务与水-能源-粮食系统安全时空耦合协调关系[J]. *干旱区研究*, 2026, 43(1): 176-187.
- Zhu Q, Wu W J, Wang Z Q, et al. Spatiotemporal coupling and coordination of ecosystem services and water-energy-food system security in Xinjiang[J]. *Arid Zone Research*, 2024, 43(1): 176-187.
- [4] 宋洁,黄静思,何冠楠,等. 水-能源-粮食纽带系统的风险测度与韧性提升研究[J]. *中国管理科学*, 2025, 33(1): 323-334.
- Song J, Huang J S, He G N, et al. Risk measurement and resilience improvement of water-energy-food coupling systems[J]. *Chinese Journal of Management Science*, 2025, 33(1): 323-334.
- [5] Liu S J, Zhao L S. Development and synergetic evolution of the water-energy-food nexus system in the Yellow River Basin[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2022, 29(43): 65549-65564.
- [6] Machado R L, Abreu M R. Multi-objective optimization of the first and second-generation ethanol supply chain in Brazil using the water-energy-food-land nexus approach[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2024, 193: 114299.
- [7] 刘黎明,陈军飞,王春宝. 长江经济带水-能源-粮食-生态脆弱性时空特征及影响机制[J]. *长江流域资源与环境*, 2023, 32(8): 1628-1640.
- Liu L M, Chen J F, Wang C B. Spatio-temporal evaluation and influencing mechanism of water-energy-food-ecology vulnerability: A case study of Yangtze River Economic Belt, China[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2023, 32(8): 1628-1640.
- [8] Ling M H, Qi T X, Li W, et al. Simulating and predicting the development trends of the water-energy-food ecology system in Henan Province, China[J]. *Ecological Indicators*, 2024, 158: 111513.
- [9] 林志慧,刘宪锋,陈瑛,等. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望[J]. *地理学报*, 2021, 76(7): 1591-1604.
- Lin Z H, Liu X F, Chen Y, et al. Water-food-energy nexus: Progress, challenges and prospect[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2021, 76(7): 1591-1604.
- [10] Farmandeh E, Choobchian S, Karami S. Conducting water-energy-food nexus studies: What, why, and how[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 27310.
- [11] Hou Y D, Zhao G Y, Liu Y J, et al. Spatial adaptation patterns and coordinated development of water-energy-food complex system in the Yellow River Basin[J]. *Scientific Reports*, 2024, 14: 31241.
- [12] 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 D, Liu H Y, Zhang X M, 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]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2025, 41(11): 229-242.
- [13] 李刚,康迪,郝铭,等. 黄河流域水-能源-粮食关联系统协同安全时空特征及驱动因素[J]. *地理与地理信息科学*, 2024, 40(5): 84-91, 142.
- Li G, Kang D, Hao M, et al. Spatial-temporal characteristics and driving factors of collaborative security of water-energy-food linkage system in the Yellow River Basin[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2024, 40(5): 84-91, 142.
- [14] 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 W, Jiang S, Zhao Y, et al. Safety evaluation of water-energy-food coupling system in Beijing-Tianjin-Hebei region[J]. *Water Resources Protection*, 2023, 39(5): 39-48.
- [15] 粟浹悦,陈万林,徐志芬,等. 都江堰灌区水-能源-粮食系统耦合协调分析[J]. *华北水利水电大学学报(自然科学版)*, 2024, 45(6): 32-40.
- Su X Y, Chen W L, Xu Z F, et al. Analysis on the coupling coordination of water-energy-food system in Dujiangyan Irrigation District[J]. *Journal of North China University of Water Resources and Electric Power (Natural Science Edition)*, 2024, 45(6): 32-40.
- [16] Zhang W, Liu C, Li L Q, et al. The coupling coordination degree and its driving factors for water-energy-food resources in the Yellow River irrigation area of Shandong Province[J]. *Sustainability*, 2024, 16(19): 8473.

- [17] 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 L B, Kang C Y, Jin J L, 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.
- [18] 陈丹, 付责, 张鹏, 等. 基于水-能源-粮食纽带关系的灌区水土资源多目标优化配置模型研究[J]. 中国农村水利水电, 2022(7): 73-81.
- Chen D, Fu Z, Zhang P, et al. Research on the multi-objective optimal allocation model of water and soil resources in irrigation areas based on the concept of water-energy-food nexus[J]. China Rural Water and Hydropower, 2022(7): 73-81.
- [19] Wang Z L, Liu S G, Kang P, et al. Evaluation of the coupled coordination of the water-energy-food-carbon nexus in crop production systems at the irrigation district scale[J]. Journal of Cleaner Production, 2025, 523: 146403.
- [20] Liu L, Ma J Q, Hao X P, et al. Limitations of water resources to crop water requirement in the irrigation districts along the lower reach of the Yellow River in China[J]. Sustainability, 2019, 11(17): 4680.
- [21] 张修宇, 秦天, 杨淇翔, 等. 黄河下游引黄灌区水安全评价方法及应用[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(10): 18-24.
- Zhang X Y, Qin T, Yang Q X, et al. Method of evaluating safety for water usage and its application to water use in irrigation districts in the Lower Reach of the Yellow River[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(10): 18-24.
- [22] 陶洁, 李行, 孙鑫豪, 等. 引黄灌区水资源调配模型及和谐评估[J]. 水资源与水工程学报, 2023, 34(1): 1-9.
- Tao J, Li H, Sun X H, et al. Water resources allocation model and harmony evaluation of the Yellow River Irrigation Area[J]. Journal of Water Resources and Water Engineering, 2023, 34(1): 1-9.
- [23] 申晓晶, 陈猷, 栾文杰, 等. 气候变化和人类活动下玉米需水量时空特征及未来趋势[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 243-253.
- Shen X J, Chen Y, Luan W J, et al. Spatial and temporal characteristics and future trends of maize water requirements under climate change and human activities[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 243-253.
- [24] 徐辉, 王亿文, 张宗艳, 等. 黄河流域水-能源-粮食耦合机理及协调发展时空演变[J]. 资源科学, 2021, 43(12): 2526-2537.
- Xu H, Wang Y W, Zhang Z Y, et al. Coupling mechanism of water-energy-food and spatiotemporal evolution of coordinated development in the Yellow River Basin[J]. Resources Science, 2021, 43(12): 2526-2537.
- [25] Yang G Q, Su Y X, Huo L J, et al. A multi-objective synergistic optimization model considering the water-energy-food-carbon nexus and bioenergy[J]. Agricultural Water Management, 2025, 312: 109431.
- [26] 贺正齐, 周到, 张振扬, 等. 基于PSR与云模型的重要耕地后备资源区水资源能源粮食协同安全评价[J]. 水利经济, 2025, 43(1): 26-31, 47.
- He Z Q, Zhou D, Zhang Z Y, et al. Evaluation of water-energy-food synergistic security in important reserve resource for arable land regions based on PSR and cloud model[J]. Journal of Economics of Water Resources, 2025, 43(1): 26-31, 47.
- [27] 金菊良, 许继荣, 陈梦璐, 等. 五元联系数的效应全偏联系及其在水问题趋势分析中的应用[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(9): 93-101.
- Jin J L, Xu J R, Chen M L, et al. The effect full partial connection of five element connection number and its application in trend analysis of water problems[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(9): 93-101.
- [28] Xiao W, He M. Characteristics, regional differences, and influencing factors of China's water-energy-food (W-E-F) pressure: Evidence from Dagum Gini coefficient decomposition and PG-TWR model[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2023, 30(24): 66062-66079.
- [29] Kang Y H, He S, Ni T F, et al. Analysis of water-energy-carbon coupling and influencing factors in food production[J]. Journal of Water and Climate Change, 2024, 15(12): 5939-5956.
- [30] Chen W Z, Chen Y. Two-step measurement of water-energy-food symbiotic coordination and identification of key influencing factors in the Yangtze River Basin[J]. Entropy, 2021, 23(7): 798.
- [31] 李成宇, 张士强. 中国省际水-能源-粮食耦合协调度及影响因素研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(1): 120-128.
- Li C Y, Zhang S Q. Chinese provincial water-energy-food coupling coordination degree and influencing fac-

- tors research [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2020, 30(1): 120-128.
- [32] Wang Y, Xie Y J, Qi L, et al. Synergies evaluation and influencing factors analysis of the water-energy-food nexus from symbiosis perspective: A case study in the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 818: 151731.
- [33] 关鑫,魏琨翔,姜文来. 水-能源-粮食关联的中国粮食安全: 保障能力、因素与趋势[J]. *农林经济管理学报*, 2025, 24(1): 13-23.
- Guan X, Wei K X, Jiang W L. China's food security in the context of water-energy-food interlinkage: Security capacity, factors and trend [J]. *Journal of Agro-Forestry Economics and Management*, 2025, 24(1): 13-23.
- [34] Li J X, Liu X P, Wei L, et al. Investigation of the interactions and influencing factors of the Water-Land-Energy-Carbon system in the Yellow River Basin [J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 954: 176654.
- [35] 李贵芳,马恒运,赵翠萍. 黄河下游(河南段)引黄灌区农业用水效率动态演进及驱动因素[J]. *中国农业资源与区划*, 2024, 45(9): 64-74.
- Li G F, Ma H Y, Zhao C P. The dynamic evolution and driving factors of agricultural water use efficiency in the Yellow River irrigation districts: A case study of Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2024, 45(9): 64-74.
- [36] 庞爱萍,易雨君,李春晖. 基于生态需水保障的农业用水安全评价: 以山东省引黄灌区为例[J]. *生态学报*, 2021, 41(5): 1907-1920.
- Pang A P, Yi Y J, Li C H. Evaluation of agricultural water-use security with ecological water demand as a priority: A case study of the Yellow River estuary in Shandong Province [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2021, 41(5): 1907-1920.
- [37] 司舒阳,李道西. 黄河下游引黄灌区深层土壤含水率反演模型研究[J]. *人民黄河*, 2023, 45(8): 124-127, 142.
- Si S Y, Li D X. Study on inversion model of deep soil moisture content in the Yellow River Diversion Irrigation Area [J]. *Yellow River*, 2023, 45(8): 124-127, 142.
- [38] 何淑婷,王秀丽,李程秀,等. 河南省水-能源-粮食土地系统耦合协调性研究[J]. *中国农业资源与区划*, 2023, 44(12): 116-130.
- He S T, Wang X L, Li C X, et al. Study on the coupling coordination of water-energy-food-land system in Henan Province [J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2023, 44(12): 116-130.
- [39] Zhang C J, Wei Y Q, Zhao X Y, et al. Assessment and enhancement pathways of the water-energy-food-economy-ecosystem nexus in China's Yellow River Basin [J]. *Energy*, 2025, 316: 134492.
- [40] 董格,张中华,王帅,等. 黄河流域资源人口产业高质量发展的耦合协调及影响因素分析[J]. *西北大学学报(自然科学版)*, 2024, 54(3): 434-449.
- Dong G, Zhang Z H, Wang S, et al. Coupling coordination and influencing factors analysis of high-quality development of "resource-population-industry" in the Yellow River Basin [J]. *Journal of Northwest University (Natural Science Edition)*, 2024, 54(3): 434-449.
- [41] Zhang C J, Zhao X Y, Shi C F. Efficiency assessment and scenario simulation of the water-energy-food system in the Yellow River basin, China [J]. *Energy*, 2024, 305: 132279.
- [42] 谢庆. 基于 DPSIR 模型的城市水安全评价与保障能力提升[J]. *长江科学院院报*, 2024, 41(7): 41-47, 56.
- Xie Q. Urban water security assessment and improvement suggestions based on driver-pressure-state-response model [J]. *Journal of Changjiang River Scientific Research Institute*, 2024, 41(7): 41-47, 56.
- [43] 侯彩霞,陈柯成,付汉良. 西北地区水安全综合评价及障碍因子分析[J]. *水利经济*, 2025, 43(2): 81-89.
- Hou C X, Chen K C, Fu H L. Comprehensive evaluation of water security and obstacle factor analysis in Northwest China [J]. *Journal of Economics of Water Resources*, 2025, 43(2): 81-89.
- [44] 刘振江,王正,曹玉洁,等. 基于改进 CRITIC-云模型法的机场鸟击风险评价[J]. *生态环境学报*, 2025, 34(1): 135-144.
- Liu Z J, Wang Z, Cao Y J, et al. Risk assessment of bird strike at airport based on improved CRITIC-cloud model [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2025, 34(1): 135-144.
- [45] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[M]. 杭州: 浙江科学技术出版社, 2000: 15-16.
- [46] Fiss P C. Building better causal theories: A fuzzy set approach to typologies in organization research [J]. *Academy of Management Journal*, 2011, 54(2): 393-420.

[47] Kumar S, Sahoo S, Lim W M, et al. Fuzzy-set qualitative comparative analysis (fsQCA) in business and management research: A contemporary overview[J]. Technological Forecasting and Social Change, 2022, 178: 121599.

[48] 于龙哉, 王会肖, 胡雅婷, 等. 黄河流域内蒙古段水-能源-粮食系统协同安全与耦合协调[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2026, 24(1): 77-87.

Yu L Z, Wang H X, Hu Y T, et al. Synergistic security and coupling coordination of the water-energy-food nexus in the Inner Mongolia section of the Yellow River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2026, 24(1): 77-87.

[49] 李海涛, 赵晶瑛, 黄辉. 黄河流域水-能源-粮食系统安全韧性模型[J]. 煤炭经济研究, 2023, 43(3): 21-28.

Li H T, Zhao J Y, Huang H. Safety resilience model of water-energy-food system in the Yellow River Basin [J]. Coal Economic Research, 2023, 43(3): 21-28.

[50] 朱一丁, 郭英, 齐永青, 等. 黄河流域水-能源-粮食系统安全风险评价[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2025, 23(4): 794-805.

Zhu Y D, Guo Y, Qi Y Q, et al. Evaluating the risk of water-energy-food system security in the Yellow River Basin[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2023, 23(4): 794-805.

[51] 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.

[52] Yang Y, Yang L, Gao H H. A novel assessment framework for analyzing the sustainability of water-energy-food nexus system from a pressure-support perspective [J]. Energy Conversion and Management, 2025, 332: 119715.

(编辑 李 静)