

以水为核心的“水-能-粮-生” 关系研究

李彬权^{1,2}, 赵麦换³, 刘静², 徐晨光⁴

(1. 河海大学流域水循环与水安全全国重点实验室, 210098, 南京; 2. 河海大学水文水资源学院, 210098, 南京;
3. 黄河勘测规划设计研究院有限公司, 450003, 郑州; 4. 华北水利水电大学, 450046, 郑州)

摘要: 水-能源-粮食纽带关系各环节均会影响到生态环境, 因此充分考虑生态环境保障要求, 将水-能源-粮食关系拓展到水-能源-粮食-生态关系进行研究很有必要。现有研究主要集中在水-能源-粮食-生态系统大尺度二元纽带关系及多维概念分析上, 缺乏对多元要素相互作用的剖析及关键过程的物理描述。在总结水-能源-粮食-生态关系相关研究成果基础上, 探讨了水-能源-粮食-生态复杂系统定义和发展历程, 剖析其内涵及构成要素; 以水资源流为核心, 初步搭建了资源流-生态要素“核心关联”及自然社会因子“外部关联”的水-能源-粮食-生态系统研究方法框架, 提出融合流域水量水质-作物生长-能源足迹-生态效应耦合模拟的物理机理模型构建方法, 为水-能源-粮食-生态协同调控提供相对科学合理的研究依据。

关键词: 水-能-粮-生; 资源流; 生态环境; 定量分析; 物理机理模型

Study on the water-centered Water-Energy-Food-Ecology Nexus//LI Binqun, ZHAO Maihuan, LIU Jing, XU Chenguang

Abstract: The interconnections among water, energy, and food significantly impact the ecological environment. Therefore, it is imperative to incorporate ecological protection requirements and extend the Water-Energy-Food (WEF) Nexus to a Water-Energy-Food-Ecology (WEFE) framework. Existing research predominantly focuses on large-scale binary relationships within the WEFE system and multidimensional conceptual analyses, lacking comprehensive insights into the interactions among multiple elements and the physical description of key processes. Building upon a review of current studies on the WEFE nexus, this paper explores the definition and developmental trajectory of the complex WEFE system, analyzing its connotations and constituent elements. Centered on water resource flows, a preliminary research framework is established, featuring “core linkages” between resource flows and ecological elements, and “external linkages” with natural and social factors. A method for constructing a physically based coupled model is proposed, integrating watershed water quantity and quality, crop growth, energy footprint, and ecological effects. This provides a relatively scientific and rational foundation for developing coordinated management strategies for the WEFE system.

Keywords: Water-Energy-Food-Ecology; resource flow; ecological environment; quantitative analysis; physical mechanism model

中图分类号: TV213.4 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2025)09-0014-07

DOI:10.3969/j.issn.1000-1123.2025.09.002

收稿日期: 2025-04-25

作者简介: 李彬权, 副教授, 主要从事水文水资源研究。

基金项目: 国家自然科学基金面上项目“黄河流域水-能源-粮食-生态系统竞合关系与演化风险研究”(42471049)。

一、引言

气候变化、快速城镇化、人口增长等现实因素引发水、能源、粮食等资源时空供需矛盾加剧,水-能源-粮食(Water-Energy-Food, WEF)三者之间存在着复杂竞争与互馈关系,传统以供给侧开发为主导的资源管理模式无法确保水资源可持续利用。联合国粮食及农业组织(FAO)、联合国环境规划署(UNEP)、“未来地球计划”(FE)、欧盟委员会联合研究中心(JRC)及美国国家科学基金会(NSF)等国际组织机构持续资助WEF可持续发展研究,助推WEF成为国际学界、政治与经济界的关注焦点。

水资源开发利用、能源生产和粮食生产都与生态环境密切相关,近年一些学者提出将生态环境纳入WEF纽带关系,即“水-能-粮-生”(Water-Energy-Food-Ecology, WEFE)协同调控。目前关于WEFE的研究还处于探索阶段,系统、完善的理论方法体系尚未形成,相关研究多数是对纽带关系概念的诠释以及宏观层面的资源供需平衡分析,对多元资源要素交互作用的关键过程描述不足,缺乏基于系统性机理模型的WEFE竞合关系解析与风险评估,无法有效支撑WEFE协同安全保障科学决策。

本文以理论和方法研究为主导,通过归纳总结国内外有关WEF和WEFE的相关研究,深入剖析WEFE本质,阐述WEFE复杂系统定义,揭示其内涵及构成要素,以水资源为核心搭建WEFE研究方法框架,为WEFE协同调控提供相对科学合理的研究依据。

二、“水-能-粮-生”系统的概念与内涵

1.WEF的概念与发展历程

1983年,联合国大学(UNU)发起探索粮食和能源之间重要联系的“粮食-能源纽带关系计划”,并于次年在巴西举行了“粮食、能源与生态系统”会议。美国是最早开展WEF耦合系统相关研究的国家之一,20世纪80年代中期的研究重点主要集中在美国西部水资源与电力之间的相互关系上。20世纪90年代,世界银行开始使用“纽带关系(nexus)”一词描述水、粮食和贸易三者之间的关系。20世纪90年代中后期至21世纪初,美国哥伦比亚大学水中心对印度的水、能源、农业三者之间的关系进行了重点研究。在“虚拟水”和“水足迹”概念提出后,纽带关系概念得到进一步深入研究,众多学者认识到有必要将能源作为与水、粮食联

系中的第三支柱。2011年德国波恩召开的“水-能源-粮食安全纽带关系会议”正式将水、能源、粮食三者关联性确定为纽带关系,突出“绿色经济”概念。此后,一些国家政府和社会相继启动WEF纽带关系研究,德国建立水、能源和粮食安全纽带关系资源平台,并于2012年建立联合国大学物质通量与资源综合管理研究所(UNU-FLORES),开展水、废物和土壤环境资源综合管理等方面研究。

纽带关系的概念并无定论,对其理解取决于不同地区或部门(如水利、能源和农业)对资源的需求目标。2014年FAO将WEF Nexus定义为“水-能源-粮食纽带关系已成为描述和解决全球资源系统复杂而相互关联性质的概念;它能够平衡不同资源用户的目标和利益,同时能够保持生态系统的完整性”。20世纪90年代提出的以水资源为中心的“水-粮食-贸易纽带关系”在某种程度上与虚拟水概念相似,不仅着眼于水资源本身,还聚焦于嵌入农产品中的虚拟形态水资源的流动过程。虚拟水和水足迹能评估产品或服务的水资源耗用过程,水足迹侧重于生产角度,虚拟水侧重于贸易角度。在水资源领域,通过强调水资源综合管理在WEF纽带关系中的核心地位,可以提升资源利用效率并促进不同部门间的合作。

2.WEFE的提出及其内涵

水资源的开发利用、能源生产和粮食生产都直接影响到生态环境。例如水库是水资源开发利用的重要形式,是水-粮食关系(水库供水灌溉)和水-能源关系(水力发电)的重要媒介。水力发电不仅能够提供可再生能源,还可以带来巨大的经济效益。但在某些流域,水库建设很可能会付出较大的社会和环境代价。水库建设改变了河流系统的自然流态及其连通性,破坏了生物和沉积物的运动,而与水库运行相关的蓄水过程可能会改变地貌并破坏生态系统。同时,在某些淡水鱼种类丰富的流域,河流开发可能会破坏鱼类的生境,影响当地居民的鱼类食物来源以及部分珍稀鱼类物种的生态系统。

农业生产也会对环境产生影响,化肥施用量的增加在提高粮食产量的同时也会造成水质持续恶化,该问题在20世纪80—90年代的美国和欧洲国家以及当前的中国等经济快速发展的发展中国家较为普遍。针对WEFE关系问题,国内外学者开展了探索研究,提出了基于风险管控的研究框架,但是对生态系统与WEF之间关联系统的整体研究较少,仅部分研究关注

了单独要素与生态系统的关联问题。

我国自“八五”计划以来就启动过多项聚焦水、能源和粮食之间关系的研究项目；国家能源部门从“十二五”开始立项资助“水资源约束对能源开发利用的影响研究”方面的研究项目。但是，WEF纽带关系在我国仍处于探索阶段，受不同行业部门壁垒所限，现有研究大多聚焦于水-能源、水-粮食和能源-粮食二元关系研究层面，关于WEFE关系的研究则很少。国家自然科学基金委员会于2015年启动了“西南河流域区径流变化和适应性利用”重大研究计划，西南河流域区供水-发电-环境多目标互馈关系是该计划的重点研究内容；2017年，国家自然科学基金委员会与美国国家科学基金会启动“食品、能源、水”系统关联合作网络项目。通过这些专项研究计划，WEFE关系研究取得重要进展。表1列出了2020年以来国家自然科学基金

委员会资助的与WEFE相关的研究项目清单，可以看出越来越多研究关注WEF与生态（环境）、碳、土等子系统的关系，并应用于水库群调度、水资源优化配置等场景。此外，国家重点研发计划相关专项也资助过类似的研究项目，如“十三五”国家重点研发计划项目“‘水-能源-粮食’协同安全保障关键技术”，该项目系统开展了WEF理论方法、关键技术 with 战略支撑等三个层面的研究工作，创建了全国WEF协同安全保障框架。

三、“水-能-粮-生”系统研究方法和框架

WEFE系统是一个结构复杂、功能多样的巨系统，从结构和功能上可将其划分为水、能源、粮食、生态4个子系统，各子系统相互作用、相互影响，形成复杂的纽带关系。这种纽带关系又受到外部因子影响，如气

表1 2020年以来国家自然科学基金委员会资助的与WEFE相关的研究项目

年份	项目名称	项目类型	承担单位
2020	INFEWS: U.S.-China: “粮食-能源-水”互馈机理、耦合模拟与协同调控: 中国京津冀和美国加州中央谷地比较研究	国际(地区)合作与交流项目	中国水利水电科学研究院
2020	水-能源-粮食-生态纽带关系下区域高质量发展诊断预警及治理策略研究——以长三角城市群为例	面上项目	河海大学
2020	吉林西部生态脆弱区水-能源-粮食系统可持续性评价与协同优化研究	面上项目	中国科学院东北地理与农业生态研究所
2020	东北农作区水资源高效利用下水-能源-粮食耦合机制与模拟	面上项目	辽宁师范大学
2020	黄河流域重点能源区水-能源-粮食系统演变机理与模拟模型研究	青年项目	华北水利水电大学
2021	区域水-土-能源-粮食耦合系统风险特征识别及其调控机理研究——以黑龙江省为例	面上项目	东北农业大学
2021	水资源-能源-粮食关联视角下的黄河流域水安全协同保障研究	面上项目	同济大学
2021	基于水-能源-粮食-碳关联框架的作物种植结构空间协同优化研究	青年项目	香港大学深圳研究院
2021	水-能源-粮食纽带关系空间均衡作用机制与测度模型	青年项目	华北水利水电大学
2021	区域水-能源-粮食关联风险形成机理及协同治理策略研究	青年项目	北京建筑大学
2022	干旱灌区基于新型农业模式的“水-粮食-能源-生态”系统可持续协同调控机制研究	国际(地区)合作与交流项目	中国农业大学
2022	“双碳”目标下多层次水-粮食-能源-生态关联优化方法与模型研究	面上项目	北京师范大学
2022	黄河流域水-能源-粮食系统协同耦合机理及风险评估	面上项目	北京师范大学
2022	城市群“粮食-能源-水-土地”关联的时空特征及其影响机制	面上项目	上海师范大学
2022	黄河流域粮食和能源产业用水竞争协同机制与多维调控	面上项目	西北农林科技大学
2022	长江中游水-能源-粮食-环境互馈系统的协同演变与致灾阈值	青年项目	北京大学
2022	基于“水-能源-粮食-生态”纽带关系的澜沧江水库群调度策略研究	青年项目	长江水利委员会长江科学院
2022	基于“水-粮食-能源”纽带系统的黄河流域水资源优化配置	青年项目	陕西师范大学
2023	海河流域“地下水-粮食-能源”的系统韧性、反馈机制及优化协同效益研究	青年项目	北京大学
2023	考虑水资源“量-质”可持续性的跨区域粮食贸易系统建模及动态补偿研究: 基于粮食-水-能源-生态视角	青年项目	安徽省(水利部淮河水利委员会)水利科学研究院
2024	黄河流域水-能源-粮食-生态系统竞合关系与演化风险研究	面上项目	河海大学

候变化、城镇化和经济发展等。因此在WEFE关系分析方法方面,需要从4个子系统内部“核心关联”以及整个大系统与外部因子“外部关联”两个层次进行研究(见图1)。

1. “核心关联”层面分析内容及方法

(1) 子系统关系分析

在内部各子系统相互关联层面,需要重点分析水与能源、水与粮食、能源与粮食以及WEF资源流与生态环境之间的关系。

①水-能源关系。需要分析能源产业发展对水资源的需求,例如煤炭开采洗选,石油和天然气开采,电力、蒸汽、热水供应,石油加工,炼焦,煤气生产和供应以及新能源产业等用水。一般采用统计类方法。

②水-粮食关系。利用作物需水理论估算粮食作物对水资源的需求,研究粮食作物生育期的耗水规律、水分胁迫对粮食产量的影响,分析粮食生产、贸易、消费全过程用水环节。一般采用机理分析方法。

③能源-粮食关系。需要研究粮食生产对煤炭、柴油、电力等主要能源的直接消耗。从水资源流层面看,水电能源开发利用中的水量供给与粮食作物灌溉用水需求在时间上重合度较高,能源与粮食同时存在较强的水资源竞争关系。一般采用统计类方法。

④WEF资源流-生态环境关系。需要研究能源-粮食生产引起水资源竞争协调、水资源时空分布响应

及对生态用水的影响等。主要分析方法包括数理统计和机理分析两类。

(2) 用水竞争定量分析

动态桑基图(Sankey)是定量分析水资源、能源(水电、煤炭和天然气等)、粮食(水稻、小麦和玉米等)资源流关联关系的有效方法,可以与机器学习算法等结合,挖掘WEF资源流利用与生态环境用水的竞争性以及系统特征的空间变化。此外,基于水足迹理论,可以定量描述能源-粮食纽带系统的耗水及生态环境保障需水的演变特征,研究流域不同空间区域能源开发与粮食种植单元交错布置、河道生态环境用水之间水资源竞争性和相容性关系。图2给出了利用动态桑基图与水足迹理论研究WEFE用水竞争关系的概化流程。

2. “外部关联”层面分析内容及方法

分析外部因子对WEFE系统影响,需要在整体视角下研究以水资源流为脉络的核心关联关系变化,并进一步分析核心关联关系变化过程中产生的外部关联关系及对应要素转换特征。主要分析方法有数理统计、系统动力学模型及物理机理模型等。

(1) 融合水量水质-作物生长-能源足迹-生态效应的机理模型框架

流域尺度的WEFE耦合模型需要具备描述水量水质变化、作物生长耗水全过程的能力,同时还需要适应河流水电能源开发导致汇流阻断的特点。图3以已开发的WEF Nexus Tool和SWAT模型为例,给出构建融合水量水质-作物生长-能源足迹-生态效应的机理模型框架。其中,将SWAT模型中水文模型架构、农业非点源污染模块及作物生长模块EPIC等集成至WEF Nexus Tool(保留其他模块),提升模型对流域尺度水量水质过程、不同作物生长的模拟能力。

(2) 资源流全过程解析及生态环境影响分析

①资源流全过程相互作用分析。利用构建的WEFE耦合模型可以模拟研究区不同时空尺度(上中下游、干支流区域空间尺度,以及旬、月、年、年际时间尺度)水资源利用、能源足迹(水电、煤炭和天然气等能源流动过程)、粮食生产-消费过程,分析不同资源流输入-输出转化过程的时空变化规律,研究

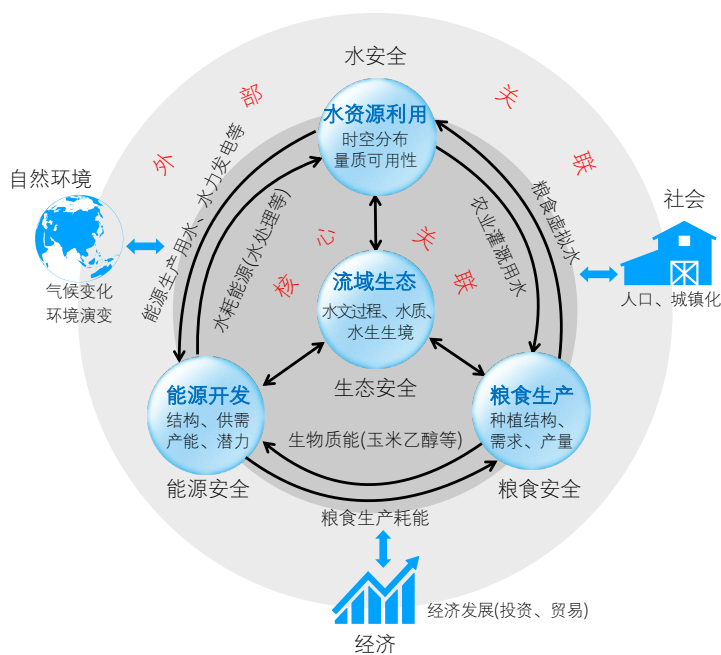


图1 WEFE系统的“核心-外部”双关联模式概化

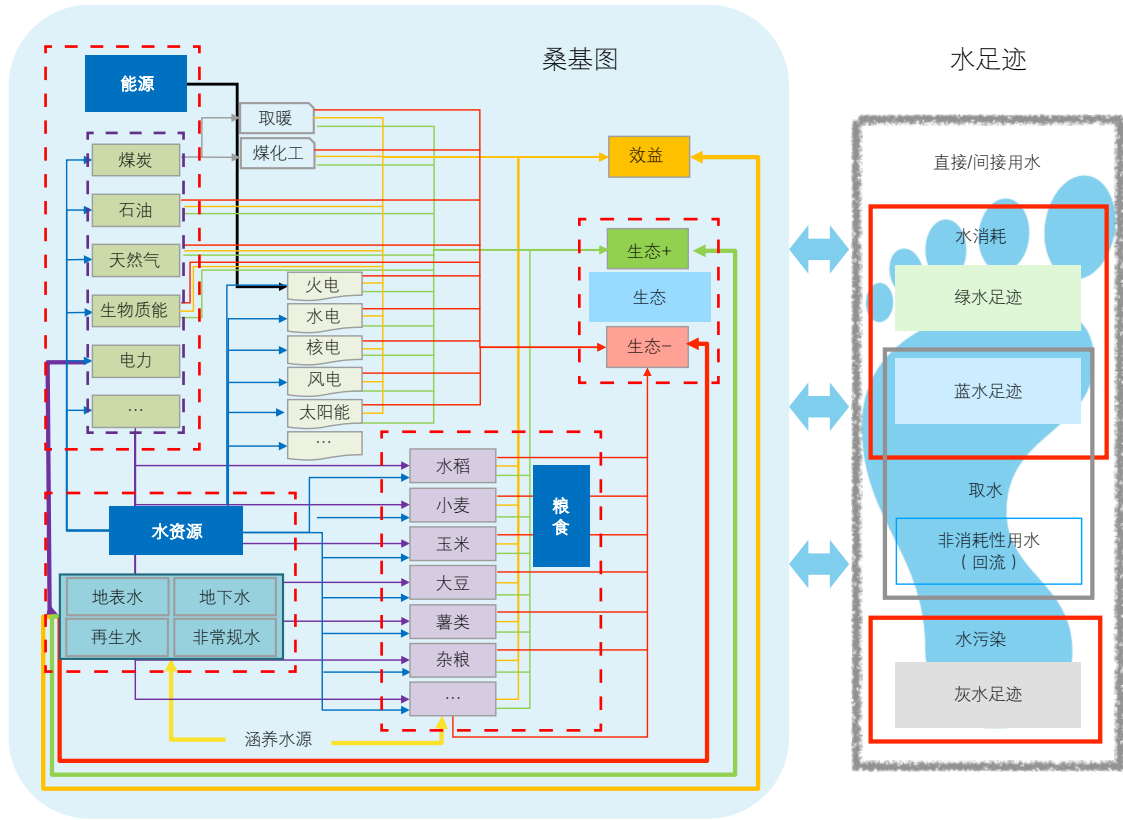


图2 WEFE用水竞合关系研究概化流程

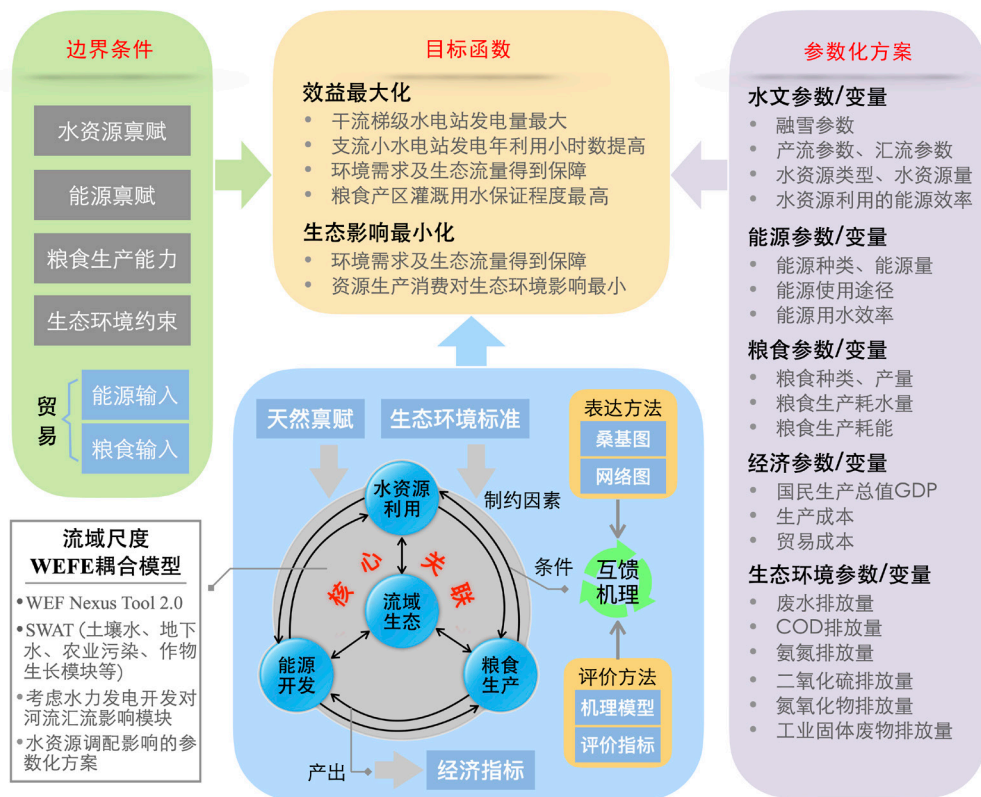


图3 流域尺度WEFE耦合模拟模型架构设计示意

不同空间区域单元之间的资源流以及研究区域内外的资源供需驱动过程,揭示流域尺度水-能源-粮食资源流全过程流动规律。

②生态指标体系及资源流-生态环境关键要素响应模式研究。分析不同资源流全周期过程对生态环境系统的分类影响,挖掘不同资源流生态效应的叠加-抵消规律并量化其综合效应。从河流连通性、水文情势、水环境等方面集成生态环境影响评价指标体系(如流量、水位、水质、生态基流、敏感生态需水等关键生态指标),明确流域不同生态要素对水位、流量及水文过程等的具体需求,研究资源流-生态环境关键要素响应关系。

四、结语

本研究立足全球水、能源、粮食资源供需矛盾与生态环境约束加剧的现实,围绕WEFE系统进行探讨,在总结国内外成果基础上构建了以水资源为核心的研究方法和框架,为破解多元资源关联复杂问题提供可能的路径。研究梳理了WEF纽带关系从二元关联到三元耦合的演进脉络,揭示了生态环境作为关键纽带嵌入后的系统复杂性,明确WEFE本质是四大子系统通过资源流与生态环境约束形成的互馈网络。在方法层面,提出“核心关联-外部关联”双层次分析框架,其中:核心关联层面通过统计类、机理分析等方法解析子系统间交互作用,结合动态桑基图与水足迹理论量化资源竞争格局;外部关联层面构建融合水量水质、作物生长、能源足迹与生态效应的流域尺度机理模型,实现对气候变化等外部因子驱动下资源流全过程及生态响应的模拟,为多目标协同调控提供了方法支撑。

基于WEFE理论与技术研究成果,可以给出适用于政府和行业管理部门的具体建议,以增强WEFE协同安全保障水平。首先,建立跨部门数据共享与联合决策机制,打破水利、农业、能源、生态等部门的信息孤岛,确保各类监测数据(如水量、用能状况、作物生长、生态健康)能够实时汇流与互认。其次,在典型流域推广基于动态桑基图与水足迹监测的实时预警系统,可将流域内水资源流动、能源消耗、粮食生产用水及生态效应等关键要素通过可视化图谱直观呈现,并结合阈值预警功能,帮助管理者及时调整方案,降低风险与损失。最后,制定WEFE综合考核指标体系,涵盖用水效率、能耗强度、单位作物产量水足迹、生态健康

指数等多维度量化指标,推动基于目标的各部门协同成效闭环考核和动态管理,真正将研究成果转化为提升区域资源安全与可持续发展的决策行动方案。

当前,WEFE研究仍处于探索阶段,系统完善的理论方法体系尚未形成,对多元要素交互关键过程的解析精度、系统性机理模型的构建深度以及风险评估与政策转化的衔接机制仍需深化。未来需进一步加强跨学科数据融合与模型优化,聚焦典型流域开展实证研究,推动WEFE系统从理论框架向区域资源安全保障与生态可持续发展的决策实践转化,为应对全球变化下的资源环境挑战提供更坚实的科学支撑。

参考文献:

- [1] 李红芳,王会肖,赵茹欣,等.基于Copula函数的水-能源-粮食共生安全风险概率[J].农业工程学报, 2021, 37(8):332-340.
- [2] SUI G H, WANG H X, CAI S Y, et al.Coupling coordination analysis of resources, economy, and ecology in the Yellow River Basin[J].Ecological Indicators, 2023(156): 111133.
- [3] JAVAN K, ALTAEE A, BANIHASHEMI S, et al.A review of interconnected challenges in the water-energy-food nexus: Urban pollution perspective towards sustainable development[J].Science of The Total Environment, 2024(912): 169319.
- [4] 张中浩,张永瑶,胡熠娜,等.基于“水-能源-粮食”纽带的生态系统服务供需关系时空分布研究——以长三角生态绿色一体化发展示范区为例[J].生态学报, 2023, 43(22):9430-9445.
- [5] HENRIK L.Renewable energy strategies for sustainable development[J].Energy, 2006, 32(6):912-919.
- [6] LIU W, YANG H, TANG Q, et al. Understanding the water-energy-food nexus for supporting sustainable food production and conserving hydropower potential in China [J].Frontiers in Environmental Science, 2019(7):50.
- [7] SCOTT C A.The water - energy - climate nexus: resources and policy outlook for aquifers in Mexico [J]. Water Resources Research, 2011, 47(6).
- [8] GAO D, CHEN A, MEMON F.A Systematic Review of Methods for Investigating Climate Change Impacts on Water-Energy-Food Nexus [J].Water Resouces Management, 2023, 38(1): 1-43.

- [9] LV Y X, YUAN M K, ZHOU X F, et al. The water-energy-food nexus: a systematic bibliometric analysis[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2023, 30(59):24170-24181.
- [10] HOFF H. Understanding the nexus: Background paper for the Bonn2011 Nexus Conference [R]. Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2011.
- [11] 姜珊, 王建华, 刘合, 等. 黄河上中游地区水-粮食-能源协同发展策略研究[J]. *中国工程科学*, 2023, 25(4):180-190.
- [12] 张同, 谭倩, 林金柱, 等. 水、能源和粮食纽带关系研究现状与热点分析[J]. *中国农业大学学报*, 2019, 24(9):114-126.
- [13] 常奂宇, 赵勇, 桑学锋, 等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 I: 方法与模型[J]. *水利学报*, 2022, 53(6):655-665.
- [14] 赵勇, 常奂宇, 桑学锋, 等. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究 II: 应用[J]. *水利学报*, 2022, 53(10):1251-1261.
- [15] 王红瑞, 赵伟静, 邓彩云, 等. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2):307-319.
- [16] 孙才志, 魏亚琼, 赵良仕. 干旱区水-能源-粮食纽带系统协同演化——以中国西北地区为例[J]. *自然资源学报*, 2022, 37(2):320-333.
- [17] 郝林钢, 于静洁, 王平, 等. 面向可持续发展的水-能源-粮食纽带关系系统解析及其研究框架[J]. *地理科学进展*, 2023, 42(1):173-184.
- [18] 王玉宝, 蒲傲婷, 闫星, 等. 新疆水-能源-粮食系统安全综合评价[J]. *农业机械学报*, 2020, 51(6):264-271.
- [19] ZHANG L A, JI Z H, FU S R, et al. Water-energy-food nexus efficiency and its factor analysis in China: A dynamic series-loop DDF model[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024(436):140524.
- [20] PROBST E, FADER M, MAUSER W. The water-energy-food-ecosystem nexus in the Danube River Basin: Exploring scenarios and implications of maize irrigation[J]. *Science of The Total Environment*, 2024(914):169405.
- [21] CHAPAGAIN K, BABEL MS, KARTHE D, et al. Integrated assessment of water-energy-food nexus: conceptual framework and application to the Ping River basin, Thailand[J]. *International Journal Of Water Resources Development*, 2024, 40(2):284-318.
- [22] ALLAN J A. Virtual water—the water, food, trade nexus, useful concept or misleading metaphor? [J]. *Water International*, 2003, 28(1):106-113.
- [23] RINGLER C, BHADURI A, LAWFORD R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): potential for improved resource use efficiency? [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6):617-624.
- [24] VITOUSEK P M, NAYLOR R, CREWS T, et al. Nutrient imbalances in agricultural development [J]. *Science*, 2009, 324(5934):1519-1520.
- [25] MCCORNICK P G, AWULACHEW S B, ABEBE M. Water-food-energy-environment synergies and tradeoffs: major issues and cases studies [J]. *Water Policy*, 2008, 10(S1):23-36.
- [26] 李良, 毕军, 周元春, 等. 基于粮食-能源-水关联关系的风险管控研究进展[J]. *中国人口·资源与环境*, 2018, 28(7):85-92.
- [27] YANG J, CAO X, YAO J, et al. Geographical big data and data mining: A new opportunity for “water-energy-food” nexus analysis[J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2024, 34(2):203-228.
- [28] 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.
- [29] 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.
- [30] 李激, 李云玲, 赵勇, 等. 水-能-粮纽带系统多维演变解析研究——以京津冀地区为例[J]. *中国水利*, 2025(6):1-13.

责任编辑 董林玥