水-能源-粮食-生态纽带关系研究的发展动态及展望

刘 雯[1,3], 傅维婷[1,3], 唐志雄[2], 彭石磊[2], 徐宪立[2]

(1.湖南师范大学 地理科学学院, 湖南 长沙 410081; 2.中国科学院 亚热带农业生态研究所, 湖南 长沙 410125; 3.地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室, 湖南 长沙 410081)

摘 要: [目的] 系统梳理水-能源-粮食-生态纽带关系(WEFEN)研究的发展动态,提出其未来研究的侧重点与展望,为生态系统可持续发展提供科学参考。[方法] 基于广泛的文献调研与CiteSpace工具,在厘定纽带关系、水-能源-粮食纽带关系及其概念的基础上,系统梳理国内外研究进展,包括发文趋势、国家合作、热点主题与研究前沿,并从量化评估、模拟优化、关联分析与综合评估4类方法总结WEFEN模型研究,进一步从协同、安全、风险与优化4个视角归纳研究重点。[结果] ①近20 a来WEFEN领域发文量迅速增长,国际合作网络日益紧密,反映出该议题已发展为全球可持续性科学的研究热点。②当前WEFEN模型方法虽渐趋多元,却普遍缺乏对社会经济驱动与自然过程的有机整合,尤其在制度、行为等软系统维度表征不足。③从协同、安全、风险与优化4大视角来看,研究多侧重单一目标而生态要素常被简化处理,社会机制与目标冲突的解析仍较薄弱。④当前研究在不同区域的WEFEN耦合特征与风险差异显著。[结论] 未来应重点关注复合极端气候事件对WEFEN稳定性的冲击机制,地球关键带WEFEN的动态耦合与权衡关系,以及地貌类型驱动的区域定制化特异性模型开发,以提升WEFEN系统协同治理能力与应用前景。

关键词: 水-能源-粮食-生态; 纽带关系; 发展动态; 社会机制

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0460-13 **中图分类号:** X321, X171.1

文献参数: 刘雯, 傅维婷, 唐志雄, 等.水-能源-粮食-生态纽带关系研究的发展动态及展望[J].水土保持通报, 2026,46(3):460-472. Liu Wen, Fu Weiting, Tang Zhixiong, et al. Research progress and prospects of water-energy-food-ecology nexus relationship [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):460-472.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.004 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.004**

Research progress and prospects of water-energy-food-ecology nexus relationship

Liu Wen[1,3], Fu Weiting[1,3], Tang Zhixiong[2], Peng Shilei[2], Xu Xianli[2]

(1.*School of Geographical Sciences*, *Hunan Normal University*, *Changsha*, *Hunan* 410081, *China*; 2.*Institute of Subtropical Agriculture*, *Chinese Academy of Sciences*, *Changsha*, *Hunan* 410125, *China*; 3.*Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application*, *Changsha*, *Hunan* 410081, *China*)

Abstract: [Objective] The research progress of the water-energy-food-ecosystem nexus (WEFEN) relationship was systematically reviewed in order to identify the key priorities and prospects for future research, and to provide a scientific reference for the sustainable development of ecosystems. [Methods] Based on an extensive literature review and the CiteSpace tool, domestic and international research progress is systematically reviewed after the concepts of the nexus relationships, water-energy-food nexus, and WEFEN are classified, including publication trends, national cooperation, research hotspots, and frontiers. WEFEN modeling studies are summarized from four methodological categories, including quantitative assessment, simulation optimization, correlation analysis, and comprehensive evaluation. Additionally, key research priorities are classified from four perspectives: synergy,

收稿日期:2025-11-15 **修回日期:**2025-12-08 **采用日期:**2025-12-12

资助项目:国家自然科学基金项目"喀斯特关键带浅层地下水循环及其生态调蓄与开发利用研究"(U24A20574); 国家重点研发计划项目"极端环境条件高速公路网生态保护与修复技术研究及示范"(2024YFF1307700); 湖南创新型省份建设专项(2024JJ3028); 湖南省科技创新计划项目(2024RC1068)

第一作者:刘雯(1982—),女(汉族),浙江省杭州市人,博士,教授,主要从事生态环境遥感及生态水文、生态安全格局等方面的研究。Email:liuwenww@gmail.com。

通信作者:傅维婷(2002—),女(土家族),湖南省吉首市人,硕士研究生,研究方向为生态水文。Email:fuweiting@hunnu.edu.cn。

security, risk and optimization. [Results] ① Over the past two decades, the number of publications in the WEFEN field has increased rapidly, and the international cooperation networks have become increasingly close, indicating that this topic has developed into a focal point in global sustainability science. ② Although WEFEN modeling approaches have become increasingly diversified, the organic integration of socioeconomic drivers and natural processes is generally insufficient, particularly in the representation of soft-system dimensions such as institutional and behavioral factors. ③ From the four key perspectives of synergy, security, risk, and optimization, research mainly focuses on single objectives, ecological elements are often simplified, and the analysis of social mechanisms and goal conflicts remains insufficient. ④ Significant regional differences are observed in the coupling characteristics and risks of WEFEN systems. [Conclusion] Future research should focus on the impact mechanisms of compound extreme climate events on WEFEN stability, the dynamic coupling and trade-off relationships within the earth's critical zone WEFEN, and the development of regionally customized, specific models driven by geomorphological types, so as to enhance the synergistic governance capabilities and application prospects of the WEFEN systems.

Keywords: water-energy-food-ecology; nexus relationship; research progress; social mechanism

水、能源、粮食和生态是人类可持续发展的4大基石,其复杂的纽带关系日益关键。全球发展压力下,水资源短缺,能源过度消耗,粮食生产不稳定及生态系统退化等问题相互交织,严重威胁人类生存发展的基础。2023年,中国国家领导人在重点生态工程建设座谈会上强调要坚持系统观念,扎实推进山水林田湖草沙一体化保护和系统治理[1]。因此,深入探究水-能源-粮食-生态纽带(water-energy-food-ecology nexus, WEFEN)关系的发展动态与趋势,已成为全球各界关注的焦点议题。传统的线性管理模式往往将水资源、能源、粮食和生态视为相互独立的领域,然而现实中,这4大子系统通过物质循环、能量流动和信息传递等复杂过程相互影响,形成了动态且非线性的网络[2]。因此,要摒弃单一视角,采用系统性、综合性的框架,深入剖析WEFEN的本质与演变规律。目前,"水-能源-粮食"纽带研究是3大子系统可持续发展研究的主要范式[3-5],而生态在该研究框架中主要被视为受3大系统影响的被动承载对象[6],这种外部变量的形式不能充分将生态系统的阈值效应[7-8]和非线性反馈[9]纳入分析。WEFEN框架通过内生化生态要素来重构可持续发展系统的拓扑结构,可构建更完备的人类生存支持系统分析范式[10]。因此,研究WEFEN有利于弥补WEFN框架的关键系统边界缺陷,促进人类对生存支持系统的认知从资源消耗中心向人地耦合系统进行转型。基于此,本研究聚焦WEFEN来系统梳理其发展动态,首先界定核心概念,运用CiteSpace进行文献计量方法分析国内外研究进展,接着从模型方法以及协同、安全、风险及优化等多维视角总结当前研究进展,进而提出未来WEFEN研究的侧重点与展望,以期为今后可持续发展研究提供科学参考。

1　概念溯源:从二元关联到复合系统

1.1　纽带关系

"纽带关系"(nexus relationship)相关概念在资源与环境领域中兴起于20世纪80年代。1983年,由联合国大学发起的"能源-粮食纽带关系计划"首次提出纽带关系的概念,认为纽带关系是不同子系统之间的相互关联性[11]。2013年,联合国亚太经社会发布的《亚太地区水-粮食-能源纽带关系报告》中提出纽带关系在时空上联系紧密,且气候变化等外部因素会对纽带关系产生影响[12]。2014年,联合国粮农组织从粮食安全视角出发对纽带关系予以阐释,并从保障粮食安全和推动农业可持续发展的角度剖析了如何运用纽带关系方法开展决策[13]。本文界定的"纽带关系"是指在多资源系统交互中,通过物质循环、能量流动及政策干预构建的非线性动态网络。其区别于简单"关联"之处在于强调系统整体性与双向反馈,表现为要素流动构成的动态嵌套结构,单点变化触发链式响应,以及管理兼具资源竞争与协同的双重特性。

1.2　水-能源-粮食纽带关系

WEFN早期研究主要集中在水-能源、能源-粮食、水-粮食等两两子系统之间的关联分析上。2006年,印度Hyderabad举行的专题研究会上提出了对WEFN的初步认识[14]。2011年,德国波恩会议首次系统性地总结了水、能源与粮食3者之间相互依存、紧密交织的作用关系,并将其概括为一种全新的纽带关系——水-能源-粮食纽带关系[15],由此开启了WEFN的研究热潮[16-18]。综上所述,本文界定的WEFN是指由水资源、能源和粮食3个子系统组成,通过水资源用于能源开采与粮食灌溉、能源驱动水

利设施与农业机械、粮食生产消耗水与能源等多重反馈机制相互作用，旨在实现资源高效利用、保障系统安全韧性的复合依存体系。

1.3 水–能源–粮食–生态纽带关系

WEFN框架着重探讨水、能源和粮食3者间的相互作用及其协同与权衡关系。然而，未能全面涵盖区域自然资源要素与社会经济发展间错综复杂的内在联系，存在一定局限性。随着WEFN的深入发展，科学家逐渐将“生态”加入WEFN研究中，提出“水-能源-粮食-生态”纽带（water-energy-food-ecology nexus，WEFEN）关系[19-21]。WEFEN聚焦于生态系统所发挥的关键支撑与调节功能[22]，对“生态”的定义呈现多元维度。在自然环境范畴，WEFEN是景观异质性、生物多样性和生态循环共同形成的网络基础[23]；从生态系统角度，WEFEN是由生物、非生物及其相互作用组成，能提供一系列生态系统服务的可再生的自然资本[24]；基于生态系统服务视角，WEFEN界定关键在于“自然组分-生态过程-生态功能-生态服务-获得利益”之间关系的阐释[25]。综合研究进展，本文将WEFEN的复合系统界定为由水资源、能源、粮食及生态4大子系统构成的复杂动态体系（图1）。该体系通过多维交互机制实现要素联动：水资源是生态过程的介质和能源与粮食生产的关键投入，能源开发影响水生态质量与粮食安全，粮食种植模式改变能源消耗结构并重塑生态格局，生态系统则通过物质循环与反馈调节机制优化资源配置。此定义强调系统要素耦合、功能协同及可持续目标，为资源利用及系统演化提供理论支撑。

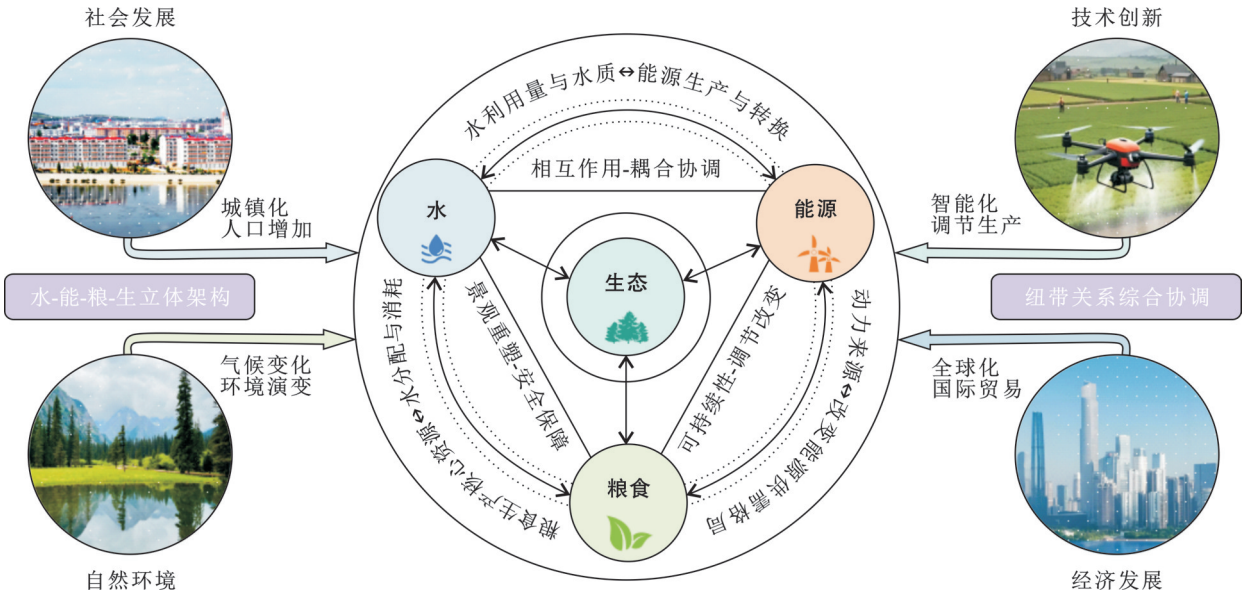


图1 水-能源-粮食-生态纽带关系（WEFEN）概念示意图

Fig.1 Conceptual diagram of water-energy-food-ecology nexus (WEFEN)

2 研究进展：多维视角下的发展动态

2.1 基于文献计量的研究脉络与热点演进

本文采用CiteSpace软件对国内外WEFEN进行图谱可视化分析。文献样本取自CNKI中国知网和Web of Science数据库，以水（water）、能源（energy）、粮食（food）和生态（ecology）为主题进行高级检索，检索时间范围设定为1977—2024年，得到文献样本共1 113篇（中文文献为178篇；英文文献为935篇），并进一步从发文量、国家合作情况、研究热点、研究前沿与发展趋势4个方面对WEFEN研究进展进行阐述。

2.1.1 发文量

1977—2024年WEFEN领域的发文数量稳步增加（图2），且可划分为3个阶段。第1阶段（1977—1990年）为研究初始阶段，发文数量相对较低，主要发文国家为美国和加拿大，该阶段侧重研究单资源要素及双要素之间的关联关系。第2阶段（1990—2015年）为研究快速发展阶段，发文数量快速增长，中国、英国、西班牙和澳大利亚的发文数量显著增加。该时期全球对水、能源和粮食的协同发展等问题的关注度提高，研究重点逐步转向WEF三要素之间的耦合关系。第3阶段（2016—2024）为研究稳定发展阶段，发文量在2022年左右达到高峰，表明国际政府对该领域的重视程度进一步提高，美国、中国和澳大利亚等国对该领域的研究投入和产出得到稳定增长。该时期相关研究开始将生态要素耦合进WEFN进行整体研究。

2.1.2 国家合作情况

基于WEFEN领域相关文献绘制了国际合作弦图及其地理分布图，进一步对国家合作情况进行分析（图3）。由图3可知，该领域已形成以美国为核心

的欧美传统合作圈与以中国为枢纽的亚洲新兴合作网络并存的格局。受地缘政治、文化同源性以及长期学术交流传统等因素的综合影响,美国与英国、德国等众多欧美国家合作紧密相连。而中国的中心地位源于其独特的双轨并行战略,在区域内,凭借地理邻近性与共存的资源环境挑战,主导构建了解决亚洲特异性问题的合作核心;在全球层面,则以其丰富的治理实践、持续的研究投入以及作为复杂系统研究典型范本的体量,主动对接并融入全球知识体系。这一结构深刻揭示 WEFEN 研究的未来发展已不能仅依赖于传统的科研互补,而必须转向基于共同挑战,由核心国家驱动的“协同攻关”新范式,以应对日益复杂的系统性风险。

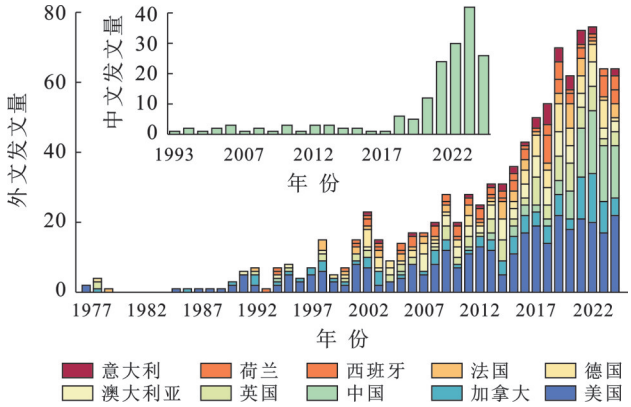


图 2　WEFEN 领域 1977—2024 年发文量变化

Fig.2　Annual publication trends in WEFEN research (1977—2024)

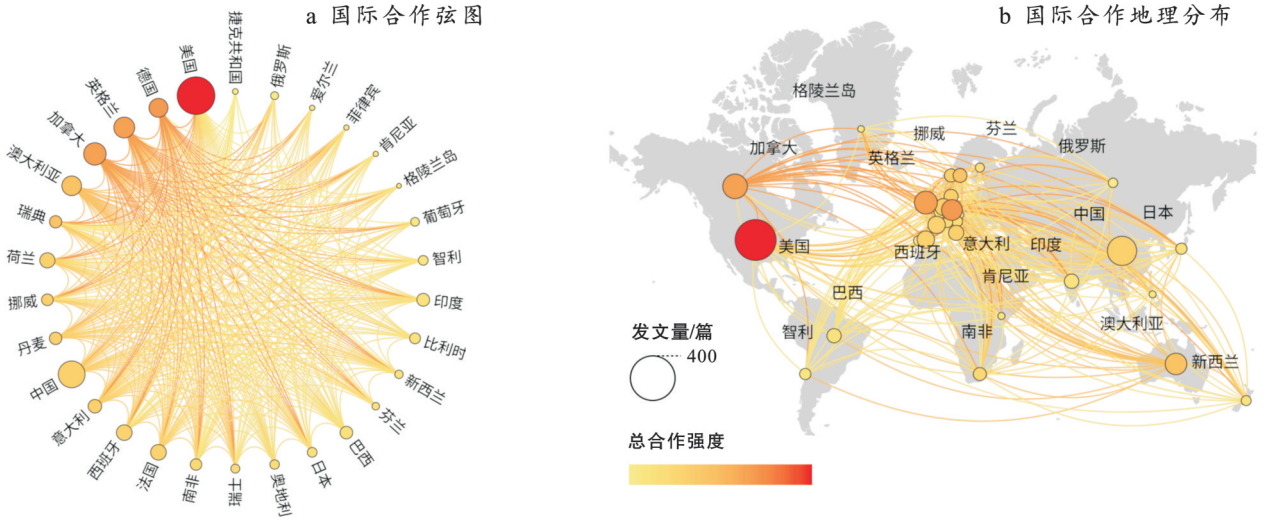


图 3　WEFEN 研究领域主要国家合作强度的弦图及地理分布

Fig.3　Chord diagram and geographical distribution of major countries' cooperation intensity in WEFEN research field

2.1.3　研究热点

基于网络分析图谱方法对 WEFEN 研究领域进行热点分析(图 4)。研究发现,国际研究长期聚焦生态、食物网与气候变化(图 4a),呈现出从微观物质循环到宏观系统模拟的多尺度整合特征,这一格局根植于其长期形成的以生态系统为研究对象、注重自然过程机理的学术传统,并深受如 IPCC 评估报告和生物多样性公约等全球性环境议程的推动。相较之下,国内研究则显著聚焦于区域研究、耦合协调及水资源等议题(图 4b),这一取向深刻反映了中国以问题为导向的科研范式——研究议程紧密契合国家战略需求。如流域综合治理、粮食安全战略与生态文明建设等政策框架下的具体资源管理挑战。从演进路径来看,国际研究自 1990 年代起逐步从生态学描述转向模型驱动的机制解析,并在 2005 年后出现“系统”这一核心热点,标志着其研究范式实现了从二元关系向系统集成的理论跃升。这一转变与系统论、复杂性科学在环境研究中的深入应用密不可分。而国内研究的演进则更具政策响应性。2013 年后“可持续性”成为热点,与国家生态文明建设战略的推进高度同步;2020 年以来“耦合协调”研究的兴起,则直接呼应了国家在高质量发展阶段对多系统协同治理,特别是空间均衡与资源协调的迫切政策需求。未来研究需在吸收国际系统思维精华的同时,进一步立足本土复杂情境,构建兼具理论洞察力与政策适应性的 WEFEN 整合分析框架。

2.1.4　研究前沿与发展趋势

采用突现词来呈现 WEFEN 相关文献的最新演变动态(图 5)。国际研究中“气候变化”的高强度突现(强度 9.68)不仅体现其作为关键胁迫因子的共识,更标志着研究范式从要素解析向系统耦合的深化。通过“关联”构建多要素相互作用的理论框架,并借助“模型”实现复杂系统行为的模拟与预测,反映了应对全球性挑战的方法论自觉。反观国内研究,演进路径

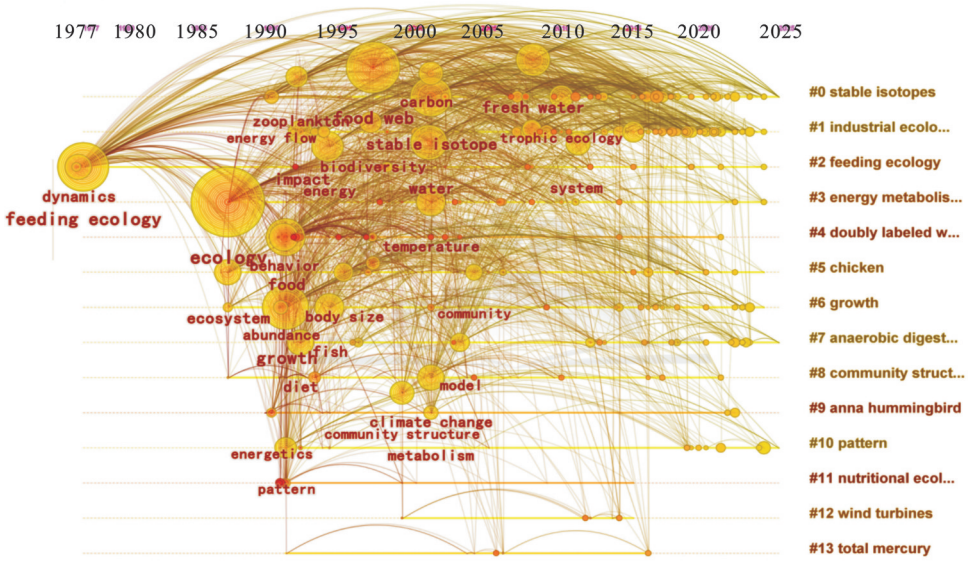
呈现出鲜明的政策响应特征。早期对系统“不确定性”的关注，源于国家生态安全与风险管控的战略需求。而近期“优化模型”的突现，则体现了在高质量发展目标驱动下，研究重心从机理解析向多目标协同调控的实践转向。这一对比不仅揭示了全球 WEFEN 研究理论驱动与问题牵引的双重演进逻辑，更彰显了学术前沿与国家战略需求的深度互构，预示着该领域正迈向机理探索与治理实践深度融合的新阶段。



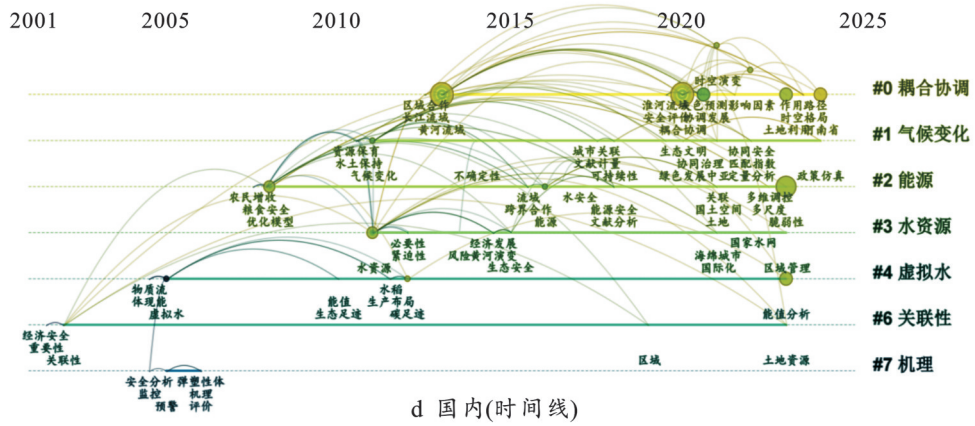
a 国际(关键词)



b 国内(关键词)



c 国际(时间线)



d 国内(时间线)

图 4 基于关键词共现聚类的 WEFEN 研究热点主题及其时间演化

Fig.4 Keyword co-occurrence clustering-based research hotspot themes and their temporal evolution in WEFEN field

a 国际被引突现强度排名前21的关键词

关键词	年份	强度	开始年份	结束年份	1977—2024年
climte change	2001	9.68	2018	2024	
industrial ecology	2015	7.33	2015	2021	
trophic ecology	2010	6.68	2019	2024	
ecology	1987	6.37	2004	2010	
nexus	2021	6.26	2021	2024	
bird	1992	5.43	1992	2011	
communtiy	2004	5.31	2022	2024	
system	2011	4.86	2016	2020	
flow	1994	4.78	2019	2021	
flld web	1997	4.66	2015	2017	
diversity	1996	4.60	2021	2024	
sustainability	2019	4.44	2019	2024	
organic matter	2007	4.35	2013	2019	
food web structure	2016	4.33	2016	2018	
behavior	1991	4.32	1994	2009	
nitrogen	2008	4.24	2012	2016	
life cycle assessment	2014	4.19	2017	2021	
pattern	1991	4.12	2019	2024	
doubly labeled water	1992	4.00	1992	2001	
dynamics	1977	3.99	2014	2017	
model	2003	3.92	2022	2024	

b 国内被引突现强度排名前18的关键词

关键词	年份	强度	开始年份	结束年份	1977—2024年
粮食安全	2008	2.28	2008	2019	
虚拟水	2005	2.17	2005	2012	
黄河流域	2013	2.14	2021	2024	
气候变化	2011	1.76	2016	2021	
水资源	2011	1.67	2011	2015	
优化模型	2008	1.61	2022	2024	
能源	2016	1.57	2016	2021	
影响因素	2022	1.30	2022	2024	
预警	2005	1.28	2005	2006	
水安全	2017	1.22	2017	2018	
生态安全	2015	1.21	2015	2018	
纽带关系	2020	1.10	2020	2022	
耦合协调	2020	1.01	2021	2024	
不确定性	2014	1.00	2014	2019	
安全续带	2020	0.99	2020	2021	
水土保持	2011	0.81	2011	2020	
协同发展	2022	0.78	2022	2024	
变化环境	2022	0.76	2022	2024	

图 5　WEFEN 领域关键词突现排序及时间线图解

Fig.5　Keyword burst ranking and timeline diagram in WEFEN field

此外，本文基于期刊双图叠加图谱来分析 WEFEN 领域的前沿发展，其可展示宏观结构上知识前沿与知识基础之间的引用关系。由图 6 可以看出，就该领域而言，Z 值为 8.53，被引频率为 23 640 的主要引用路径为集中型单线条，表示 WEFEN 领域期刊的研究主要集中在“生态学、地球、海洋（ecology，earth，marine）”这一核心期刊类群，而“植物、生态学、动物学（plant，ecology，zoology）”是其来源期刊类群。这一高度集中的知识结构揭示了该领域当前仍处于生态学主导的学科范式阶段，即以生态过程和自然系统为核心视角来理解纽带关系，尚未实现与社会科学、工程科学及管理学的深度融合。这种知识结构的单一性在赋予研究坚实自然科学基础的同时，也可能限制了应对复杂人地系统挑战所需的跨学科整合能力，预示着未来 WEFEN 研究亟需打破学科壁垒，构建更加多元、均衡的知识基础，以推动从生态解析到系统治理的范式跃升。

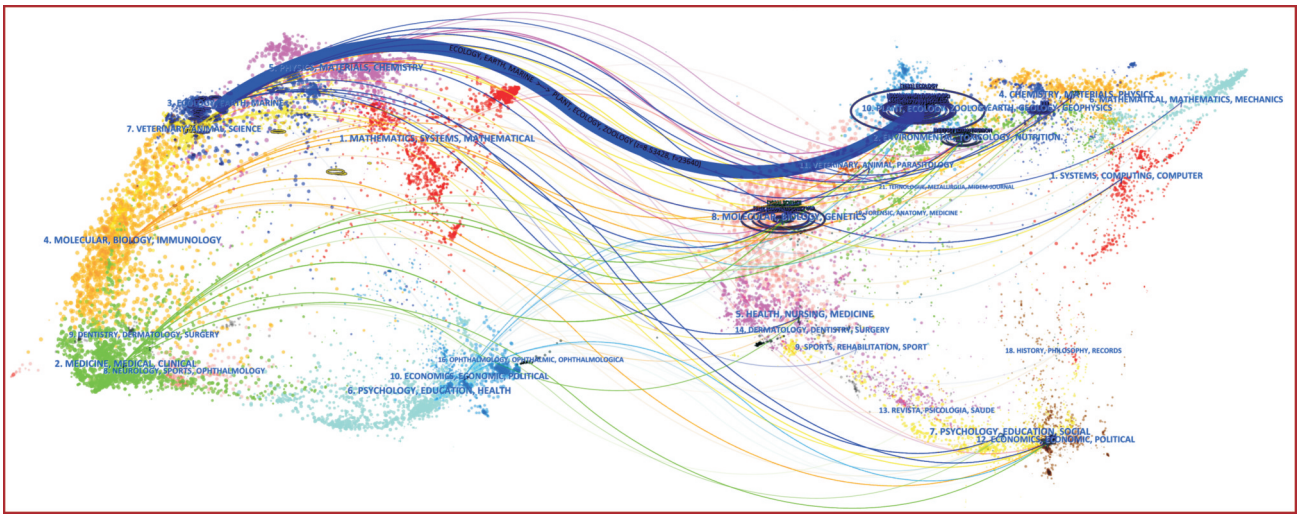


图 6　WEFEN 期刊双图叠加

Fig.6　Dual-overlay map of WEFEN journals

总体而言，当前 WEFEN 研究呈现出显著的自然要素解析强而社会系统整合弱的局限性。这种学科壁垒导致研究成果难以转化为有效的治理实践，特别是在制度设计、行为机制和技术赋能的交叉领域表现出明显不足。未来的突破亟需构建一个融合自然核算、社会经济驱动与政策设计的整合框架，通过跨学科知识体系的再造，推动该领域从分散的机理认知向系统的综合治理范式跃迁。

2.2　模型方法的研究进展评述

本研究结合国内外大量文献，对 WEFEN 系统不同模型方法和案例进行了总结。由表 1 可知，WEFEN 借助多种模型方法来进行耦合协同评估，主要可分为量化评估、模拟优化、关联分析和综合评估 4 种应用类别。量化评估类侧重于数据驱动的指标

构建、概率分析、协调度计算等，旨在揭示系统状态、关系与问题。模拟优化类侧重于动态建模与策略优化，通过耦合模型、算法或情景模拟，解决资源分配、冲突权衡等问题。关联分析类侧重于解析要素间的交互作用与依赖关系，通过挖掘变量关联、识别影响路径，揭示WEFEN系统的内在耦合机制。综合评估类侧重于整合多维度信息与方法，通过构建综合框架或集成模型，实现对系统整体状态、风险韧性及可持续性的全面评判。

总体来看，当前WEFEN模型方法虽呈现多元化发展，却在系统整合上存在局限。各类模型多聚焦特定要素的量化评估或局部优化，缺乏对社会经济驱动与自然过程的有机耦合，尤其在制度安排、行为决策等软系统维度表征不足。未来突破亟需深化多学科方法的实质性融合，通过增强模型对复杂人文因素的解析能力，构建能够同时处理自然约束与社会选择的集成评估框架，以推动研究从技术优化向系统治理的范式转型。

2.3 多维视角下的研究议题聚焦

2.3.1 协同视角

基于协同视角，WEFEN领域研究逐步走向多元化、区域化。从多元化的角度，WEFEN领域研究更为注重跨系统与跨学科协同。学者们从探究WEFEN系统下水-能源[26]、水-粮食[27]、粮食-生态等[28]两两之间的协同，到水-能源-粮食、水-粮食-生态等3者之间的协同，再逐步转换为探究WEFE4要素的协同发展，更全面揭示子系统间相互作用机制。且在分析方法上多采用GIS[29]、经济学[30]、数学等多领域学科交叉方法进行WEFEN协同研究。从区域化的角度，WEFEN领域研究从行政尺度[31]转移到地理尺度[32]，利于更精准地识别跨部门资源流动与生态关联，提升系统协同管理的科学性。然而，现有研究缺乏对WEFEN协同关系随时间动态演化的长期追踪和机制解析，且“生态”的角色常被简化或工具化，作为WEFEN韧性核心基础的生态系统服务缺乏深入整合。

2.3.2 安全视角

基于安全视角，WEFEN领域研究侧重于安全理论与韧性研究。安全理论的WEFEN研究涉及资源供需平衡以及灾害风险防控，旨在构建稳健的资源保障体系。同时，韧性研究强调系统应对如极端气候等突发扰动的适应与恢复能力，通过优化资源管理策略，增强跨部门协同和提升技术创新来降低系统脆弱性。该视角下的WEFEN研究在关注短期风险缓解的同时更致力于构建长期可持续的韧性框架。然而，现有研究重资源供给，轻系统韧性，对生物多样性、生态连通性等深层韧性要素的关注度不足。

2.3.3 风险视角

基于风险视角，WEFEN领域研究侧重于污染物、要素间风险与环境脆弱性问题。工业化和城市化的快速发展使得重金属等污染物通过水循环、能源生产和食物链在WEFEN系统中不断迁移和累积[33]，形成跨介质、跨部门的复合型环境风险。这些风险在气候变化和人类活动的双重压力下被进一步放大，导致生态系统服务功能退化，加剧区域环境脆弱性[34]。该视角下WEFEN研究致力于构建多要素耦合的风险评估模型，以降低系统性环境风险和增强生态系统的可持续韧性。然而，现有研究聚焦单一风险类型而忽视多风险因子的协同放大效应，偏重自然驱动风险而弱化社会制度的作用。

2.3.4 优化视角

基于优化视角，WEFEN领域研究侧重于多要素协同优化及技术集成优化（表1）。当前研究聚焦于开发多要素耦合优化模型，通过量化水、能源、食物和生态系统之间的复杂互馈关系，构建跨部门协同决策框架[35]。而在技术集成层面，研究聚焦CBFP，DEA，PPM等多技术的集成应用，其为多要素系统的动态模拟与协同调控提供了强有力的工具支撑。该视角下的WEFEN研究着力开发多要素协同的优化决策模型，以实现跨部门协同管理和优化系统运行效能。然而，现有研究普遍追求技术效率最大化或经济效益最优而忽视多元目标的本质冲突，动态适应性优化的方法不足，且技术集成优化注重技术叠加而非系统重构。总体而言，当前WEFEN研究在4大视角下均面临深层整合不足的局限。各视角虽有所侧重，却普遍存在生态要素被工具化处理、社会制度维度弱化、多元目标冲突回避等共性问题，暴露出当前研究在解析“自然-社会”复杂互馈机制上的系统性缺失。未来突破亟需构建跨视角的整合分析框架，在方法上融合多维度要素的动态模拟与适应性优化，推动研究从各自为政的分散探索转向能够协调多元目标、平衡短期效益与长期韧性的系统治理范式。

3 结论与展望：迈向系统治理的范式转变

本研究系统梳理了水-能源-粮食-生态纽带关系（WEFEN）研究的知识结构、模型方法与多维视角下议题聚焦的动态进展。综上所述，WEFEN领域已呈现出从理论构建向机理深化与协同调控纵深发展的

脉络。然而,面对全球气候变化加剧与区域人地系统差异化发展的双重挑战,现有研究在应对复合性扰动、解析特殊地貌区耦合机制,以及提升模型区域适配性等方面仍存在一定局限(图7)。为推动研究进一步从机制解析迈向系统治理,面向未来,WEFEN领域亟需推动以下3大范式转变。

表1　WEFEN研究的模型方法梳理及分类评述

Table 1　Classification and review of modeling methods in WEFEN research

类别	模型/方法名称	应用案例	特点
量化评估	数据包络分析	西班牙坎塔布里亚捕鱼船队[36] 巴西食品饮料行业[37]	评估系统中各决策单元在多投入和多产出下的相对效率
	基于指标的评估框架	乌兹别克斯坦[38] 印度那格浦尔[39]	构建指标体系量化耦合协调度与相关性,揭示系统性不平衡
	Copula双层分数规划	伊犁-巴尔喀什流域[40] 咸海盆地[41]	描述系统中不确定变量的联合概率分布,量化多变量间的关联风险
	生态安全格局评价模型	粤港澳大湾区[31]	利用夜光数据修正生态阻力面,量化生态安全格局并优化
	压力-状态-响应模型	伊朗亚兹德省皮什库赫流域[42] 长江流域[43]	系统性量化梳理影响系统健康的因素及因果关系
	虚拟水	哥伦比亚[44] 黄河流域[45]	量化流域隐含的水资源消耗量,以评估水资源利用效率
	跨边界流域关联评估方法	萨瓦河等多流域[46]	通过多部门协作与跨边界对话识别资源利用权衡关系和协同机会
模拟优化	双层分散式机会约束规划	咸海流域[32] 中亚国家[47]	模拟两级利益相关者权衡,优化水资源分配并提升系统效益
	系统动力学模型	时空分类模拟模型开发[48]	模拟城市群协同化发展对资源环境承载力的动态影响
	水-粮-能-生协同调控模型	京津冀[49]	基于NSGA-Ⅱ算法模拟多目标协同优化,提出综合协同指数
	多Agent仿真模型	宁东基地[50]	模拟多Agent合作共生网络的演化过程,支持复杂系统动态分析
	不确定性模糊多目标规划	洱海流域[51]	通过情景模拟预测水环境承载力,为可持续发展提供优化路径
	水土评价工具	印度东部上拜塔拉尼河流域[52] 中国黑土区辽河流域[53]	模拟长时间尺度的流域水文过程、水质变化及农业管理措施影响
	水资源评价与规划系统	巴西南部大西洋雨林一个流域[54] 哥伦比亚马格达莱纳河流域[55]	分析水资源供需平衡、气候变化影响,优化水资源分配与规划方案
	低排放分析平台	乌尔米亚湖流域[56]	能源系统建模工具,模拟不同政策情形下的能源需求、气候变化影响
	气候-土地-能源-水系统框架	毛里求斯等案例的框架评估[57]	耦合气候、土地利用和水资源模块,模拟气候变化下的资源竞争与协同管理
	社会-生态代谢多尺度分析	西班牙与毛里求斯[58]	基于物质流分析和能值理论,模拟社会-生态系统的代谢过程,优化资源循环
关联分析	因果循环图	城乡一体化区域[59] 印度尼西亚卡拉旺县[60]	基于参与式循环的结构,识别和分析关联系统的复杂问题
	贝叶斯网络	锡尔河流域[61] 京津-河北地区[62]	基于概率分布开展水-能-粮-生因果关系复杂性与不确定性的关联分析
	耦合协调度模型	长江三角洲[63] 黄河流域[64]	量化WEFE这4个系统之间的相互作用关系及协调发展水平
	解释结构模型-层次分析法	新疆各区域[65]	通过解释结构模型和层次分析法,实现系统复杂关联的结构化分析
	空间莫兰指数	美国人口普查区[29]	衡量不同要素间的空间自相关性,从而对系统进行关联分析
综合评估	能值生态足迹模型+ARIMA模型	中亚五国生态安全评估[66]	综合分析和评估生态足迹和承载力,并实施模型预测
	投影寻踪模型	中国黑龙江省13个地级市[67] 中亚地区[68]	对复杂系统开展综合评估,量化分析多指标及非线性评估问题
	投入产出分析	跨境的费尔干纳河谷[30] 重庆市地下水系统[69]	利用投入产出比量化多部门关联与资源流动,综合分析供需平衡

3.1　复合极端气候事件对纽带关系稳定性的冲击机制

近年来复合极端事件频发,1961—2020年中国95%的观测站点发生过高温—暴雨复合事件[70]。其对水、能源、粮食、生态均产生影响,如中国鄱阳湖盆地复合时空极端降水事件对当地农业生产和生态系

统构成重大威胁[71]，长江中下游平原的高温干旱复合型极端事件对当地居民生活用水、能源开发使用带来严重危害[72]。目前，探究复合极端气候事件对单一的或者两两要素之间的研究较多，但是对整个WEFEN系统的研究仍有空缺，因此，亟需探究从单要素影响分析转向复合扰动系统的响应研究，重点解析复合极端气候事件对WEFEN系统稳定性的多维冲击机制与韧性构建路径。

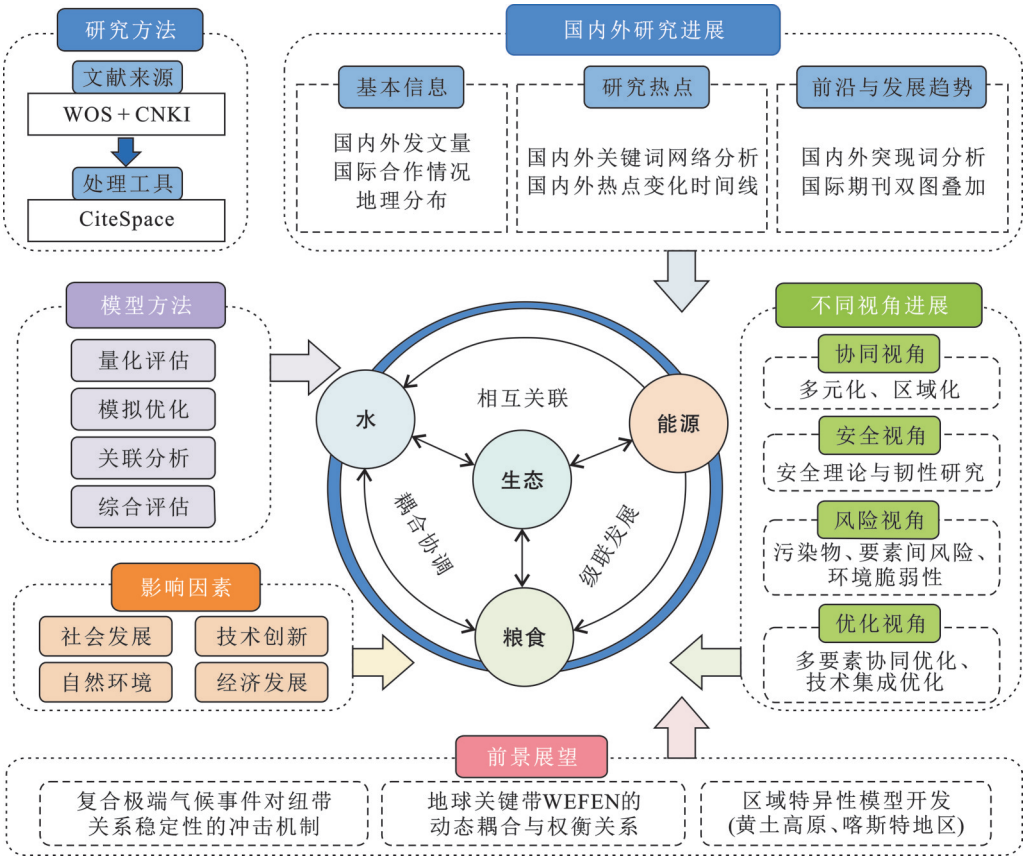


图 7 WEFEN 研究进展及展望概述

Fig.7 Overview of research progress and prospects in WEFEN studies

3.2 地球关键带 WEFEN 的动态耦合与权衡关系

地球关键带是地球表层系统研究的实体操作框架[73]，是人类赖以生存和环境可持续发展的核心地带。作为连接大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的连续体域，地球关键带从地下水底部或土壤-岩石交界面向上延伸至植被冠层顶部[74]。就国内关键带特点而言，黄土关键带的形成是亚洲季风-干旱环境系统长期演变的结果，其以深厚疏松的黄土层为特征，具有显著的垂向渗透性和水土流失敏感性，水-土-气-生相互作用强烈[75]。滨海湿地关键带是陆地-海洋-大气相互作用的区域，其是受潮汐和淡水输入双重调控的、具有高生产力的盐沼生态系统，在容纳沉积物、储水消洪等方面有重要生态作用[76]。喀斯特关键带以可溶性基岩为主导，发育地下溶蚀网络，生态系统脆弱但生物多样性独特[77]，但由于其地表-地下二元水文结构突出，土壤薄且分布不均，对水资源变化响应敏感，加之方法论限制，目前相关研究仍处于初步探索阶段，系统性成果较为有限。总之，地球关键带独特的物质迁移与能量转化过程深刻影响着WEFEN系统的稳定性与可持续性。因此，亟需深入探究由单圈层分析转向地球关键带研究，尤其是喀斯特关键带的WEFEN的动态耦合与多尺度权衡关系。

3.3 区域特异性模型开发

不同区域的地理特征存在显著差异，而当前多数WEFEN研究依赖于普适性框架模型[78]，其局限性在于过度依赖均质化假设，未能充分捕捉特定区域的独特属性。以黄土高原为例，该地貌土壤层深厚，沟壑地貌发育，水土流失严重，传统的统计模型与物理机制模型难以高精度地模拟黄土高原重力侵蚀过程。喀斯特地区则因岩溶孔隙-裂隙双重渗流系统、地表-地下水文过程耦合等复杂特性，常规水文模型难以刻画其快速径流响应与非饱和带动态储水过程。这种区域适配性缺失导致模型难以精准解析复合极端事件下特定区域如黄土、喀斯特等典型关键带的级联

失效路径,亟需从普适性模型转向地理情境化模型,开发地貌类型驱动的区域定制化特异模型。

参考文献(References)

[1] 习近平.习近平著作选读(第一卷)[M].北京:人民出版社,2023:41.
Xi Jinping. Selected readings from the works of Xi Jinping, volume I [M]. Beijing: People's Publishing House, 2023:41.

[2] Ling Minhua, Qi Tianxin, Li Wei, 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.

[3] Liu Junguo, Scanlon B R, Zhuang Jie, et al. Food-energy-water nexus for multi-scale sustainable development [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2020, 154: 104565.

[4] 安志英,孙才志,郝帅.我国东北生态系统服务供需匹配关系:基于水-能源-粮食纽带视角[J].生态学报,2024,44(10):4170-4186.
An Zhiying, Sun Caizhi, Hao Shuai. Matching relationship between supply and demand of ecosystem services from the perspective of water-energy-food nexus in northeast China [J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4170-4186.

[5] 穆雅晴,吴宜进,田培,等.长江中游经济区"水-能源-粮食"系统与城市绿色转型适配性研究[J].自然资源学报,2024,39(9):2140-2154.
Mu Yaqing, Wu Yijin, Tian Pei, et al. The adaptability of "water-energy-food" system and urban green transformation in the middle reaches of the Yangtze River economic zone [J]. Journal of Natural Resources, 2024, 39(9):2140-2154.

[6] Alhanaee G, Sanders K, Meshkati N. Rising temperatures, rising risks: The food-energy-water nexus in the Persian Gulf [J]. Environmental Science & Technology, 2017,51(8):4117-4118.

[7] Muhirwa F, Li Lanhai, Laspidou C. Global ecosystem sustainability indexing and patterns in the success of SDGs of water, energy and food security [J]. Journal of Cleaner Production, 2025,516:145830.

[8] Sasaki T, Koyama A, Okuro T. Coupling structural and functional thresholds for vegetation changes on a Mongolian shrubland [J]. Ecological Indicators, 2018,93:1264-1275.

[9] Yang Liu, Li Zhe, Wang Dianchang, et al. Empirical dynamic modeling helps deciphering the nonlinear feedback loops governing freshwater methane emissions [J]. Ecological Indicators, 2025,177:113791.

[10] 赵文武,尹彩春,张军泽,等.地理学支撑SDGs研究进展与展望:兼议"可持续地理学"理论框架[J].地理学报,2024,79(11):2699-2720.
Zhao Wenwu, Yin Caichun, Zhang Junze, et al. Progress and prospects of Geography in promoting the United Nations Sustainable Development Goals: A discussion on the theoretical framework of Sustainable Geography[J].Acta Geographica Sinica, 2024,79(11): 2699-2720.

[11] Sachs I, Silk D. Food and Energy: Strategies for Sustainable Development [M]. Tokyo: United Nations University Press, 1990.

[12] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Water-food-energy nexus in Asia and the Pacific [EB/OL].(2013-08-01). https://unescaporg/resources/status-water-food-energy-nexus-asia-and-pacific.

[13] Food and Agriculture Organization of the United Nations. The water-energy-food nexus: A new approach in support of food security and sustainable agriculture[EB/OL].(2014-06-30). https://reliefweb. int/report/world/water-energy-food-nexus-new-approach-support-food-security-and-sustainable-agriculture.

[14] 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.
Wang Hongrui, Zhao Weijing, Deng Caiyun, et al. Analysis on issues of water-energy-food nexus [J]. Journal of Natural Resources, 2022,37(2):307-319.

[15] Ware D M. Risk of epibenthic prey to predation by rainbow trout (*Salmo gairdneri*)[J]. Journal of the Fisheries Research Board of Canada, 1973,30(6):787-797.

[16] Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach [J]. Energy Policy, 2011,39(12):7896-7906.

[17] Lawford R, Bogardi J, Marx S, et al. Basin perspectives on the water-energy-food security nexus [J]. Current Opinion in Environmental Sustainability, 2013, 5(6):607-616.

[18] Finley J W, Seiber J N. The nexus of food, energy, and water [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014,62(27):6255-6262.

[19] Vanham D. Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus? [J]. Ecosystem Services, 2016,17: 298-307.

[20] Yang Jie, Ethan Yang Y C, Khan H F, et al. Quantifying the sustainability of water availability for the water-food-energy-ecosystem nexus in the Niger River basin [J]. Earth's Future, 2018,6(9):1292-1310.

[21] 王奕佳,刘焱序,宋爽,等.水-粮食-能源-生态系统关

联研究进展[J].地球科学进展,2021,36(7):684-693.
Wang Yijia, Liu Yanxu, Song Shuang, et al.Research progress of the water-food-energy-ecosystem nexus [J]. Advances in Earth Science, 2021,36(7):684-693.

[22] Dou Haitao, Lin Tao, Xu Qiao, et al. Ecohydrological significance of microtopography in arid zones: Regulating water, supporting vegetation, promoting ecosystem stability [J]. Ecological Indicators, 2025,171:113200.

[23] 范玉龙,胡楠,丁圣彦.生态系统服务网及其生态学意义[J].生态学报,2020,40(19):6729-6737.
Fan Yulong, Hu Nan, Ding Shengyan. Ecosystem service network and its ecology significance [J]. Acta Ecologica Sinica, 2020,40(19):6729-6737.

[24] 李璞,王晓强,徐卫华,等.基于文献计量分析的生态资产研究现状及启示[J].生态学报,2023,43(21):9082-9095.
Li Pu, Wang Xiaoqiang, Xu Weihua, et al. Research-status and implications of ecological assets based on bibliometric analysis [J]. Acta Ecologica Sinica, 2023,43(21):9082-9095.

[25] 陈能汪,李焕承,王莉红.生态系统服务内涵、价值评估与GIS表达[J].生态环境学报,2009,18(5):1987-1994.
Chen Nengwang, Li Huancheng, Wang Lihong. Reviews on ecosystem services: Connotation, valuation and GIS-based mapping [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2009,18(5):1987-1994.

[26] Jin Yi, Tang Xu, Feng Cuiyang, et al. Energy and water conservation synergy in China: 2007—2012 [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2017, 127: 206-215.

[27] 张正斌,段子渊,徐萍,等.中国粮食和水资源安全协同战略[J].中国生态农业学报,2013,21(12):1441-1448.
Zhang Zhengbin, Duan Ziyuan, Xu Ping, et al. Synergy strategy of food and water security in China [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013,21(12):1441-1448.

[28] Ward F A, Salman D, Amer S A. Managing food-ecosystem synergies to sustain water resource systems [J]. Science of the Total Environment, 2021,796:148945.

[29] Summers H N, Stone T F, Dickey L C, et al. Mapping barriers to food, energy, and water systems equity in the United States [J]. Environmental Science & Policy, 2024,162:103941.

[30] Soliev I, Wegerich K, Kazbekov J. The costs of benefit sharing: Historical and institutional analysis of shared water development in the Ferghana Valley, the Syr Darya basin [J]. Water, 2015,7(6):2728-2752.

[31] 毛源远,张正栋,董剑彬,等."水-能源-粮食"视角下粤港澳大湾区生态安全格局的构建及优化[J].热带地理,2022,42(2):328-338.
Mao Yuanyuan, Zhang Zhengdong, Dong Jianbin, et al. Construction and optimization of ecological security pattern in the Guangdong-Hong Kong-Macao greater bay area from the perspective of "water-energy-food" [J].Tropical Geography, 2022,42(2):328-338.

[32] Ma Y, Li Y P, Zhang Y F, et al.Mathematical modeling for planning water-food-ecology-energy nexus system under uncertainty: A case study of the Aral Sea basin [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,308:127368.

[33] Wen Chen, Li Qi, Zhu Dan, et al. Biofilm-mediated heavy metal bioaccumulation and trophic transfer in a mining-contaminated river [J]. Water Research, 2024, 267:122487.

[34] Rankinen K, Holmberg M, Peltoniemi M, et al. Framework to study the effects of climate change on vulnerability of ecosystems and societies: Case study of nitrates in drinking water in southern Finland [J]. Water, 2021,13(4):472.

[35] 檀汉泽,张泽中,冯凯,等.基于耦合协调度模型的十大孔兑流域水-能源-粮食-生态耦合系统协调及驱动机制[J].人民珠江,2025,46(4):101-112.
Tan Hanze, Zhang Zezhong, Feng Kai, et al. Coordination and driving mechanism of water-energy-food-ecology coupling system in Inner-Mongolia reaches of Yellow River based on coupling coordination degree model [J]. Pearl River, 2025,46(4):101-112.

[36] Martínez-Ibáñez E, Laso J, Vázquez-Rowe I, et al. Integrating the water-energy-food nexus and LCA + DEA methodology for sustainable fisheries management: A case study of Cantabrian fishing fleets [J]. Science of the Total Environment, 2024,949:175223.

[37] Maia R G T, Junior A O P. Eco-Efficiency of the food and beverage industry from the perspective of sensitive indicators of the water-energy-food nexus [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,324:129283.

[38] Song Shiran, Chen Xi, Liu Tie, et al. Indicator-based assessments of the coupling coordination degree and correlations of water-energy-food-ecology nexus in Uzbekistan [J]. Journal of Environmental Management, 2023, 345:118674.

[39] Morey B, Deshkar S, Sukhwani V, et al. Towards circulating and ecological sphere in urban areas: An indicator-based framework for food-energy-water security assessment in Nagpur, India [J] .Sustainability, 2022, 14(13):8123.

[40] Zhang Y F, Li Y P, Huang G H, et al. Planning a water-food-energy-ecology nexus system toward sustainability: A copula bi-level fractional programming method [J]. ACS Sustainable Chemistry & Engineering, 2021,9(45):15212-15228.

[41] Zhang Yunfei, Li Yongping, Huang Guohe, et al. A copula-based stochastic fractional programming method

for optimizing water-food-energy nexus system under uncertainty in the Aral Sea basin [J]. Journal of Cleaner Production, 2021,292:126037.

[42] Pourfallah A S, Sadeghi S H, Vafakhah M, et al. Significance of the water-energy-food nexus on the watershed health status [J]. Water Resources Management, 2025,39(5):2217-2250.

[43] 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 Liming, Chen Junfei, Wang Chunbao. Spatiotemporal evolution 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.

[44] Distefano T, Isaza A S, Muñoz E, et al. Sub-national water-food-labour nexus in Colombia [J]. Journal of Cleaner Production, 2022,335:130138.

[45] 张浩然,徐康宁,郭飞,等.基于水资源生态足迹的黄河流域水资源可持续利用研究[J].环境工程技术学报,2024,14(6):1732-1742.
Zhang Haoran, Xu Kangning, Guo Fei, et al. Research on the sustainable utilization of water resources in the Yellow River basin based on water resources ecological footprint [J]. Journal of Environmental Engineering Technology, 2024,14(6):1732-1742.

[46] De Strasser L, Lipponen A, Howells M, et al. A methodology to assess the water energy food ecosystems nexus in transboundary river basins [J]. Water, 2016, 8(2):59.

[47] Ma Y, Li Y P, Huang G H, et al. Planning water-food-ecology nexus system under uncertainty: Tradeoffs and synergies in central Asia [J]. Agricultural Water Management, 2022,266:107549.

[48] Zahedi R, Yousefi H, Aslani A, et al. System dynamic model of water, energy and food nexus for policy implementation [J]. Applied Water Science, 2024, 14(10):213.

[49] 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.
Chang Huanyu, Zhao Yong, Sang Xuefeng, et al. Research on the coordinated regulation of water resources-food-energy-ecology in Beijing-Tianjin-Hebei Region: Ⅰ. Methods and model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2022,53(6):655-665.

[50] 朱美连,杨国丽,降亚楠,等.基于多Agent模型的宁东基地水-能源-粮食系统协同演化研究[J].中国农村水利水电,2023(12):7-16.
Zhu Meilian, Yang Guoli, Jiang Yanan, et al. A multi-agent-based model for the evolution of water-energy-food system in Ningdong base [J]. China Rural Water and Hydropower, 2023(12):7-16.

[51] 郭怀成,邹锐,徐云麟,等.流域环境系统不确定性多目标规划方法及应用研究:洱海流域环境系统规划[J].中国环境科学,1999,19(1):33-37.
Guo Huaicheng, Zou Rui, Xu Yunlin, et al. An inexact multiobjective programming method and its application in the watershed environmental system planning-environmental system planning of the Lake Erhai basin [J]. China Environmental Science, 1999,19(1):33-37.

[52] Uniyal B, Jha M K, Verma A K. Assessing climate change impact on water balance components of a river basin using SWAT model [J]. Water Resources Management, 2015,29(13):4767-4785.

[53] Zhang Yingqi, Liu Haipeng, Qi Junyu, et al. Assessing impacts of global climate change on water and food security in the black soil region of northeast China using an improved SWAT-CO_2 model [J]. Science of the Total Environment, 2023,857:159482.

[54] Dias I Y P, Lazaro L L B, Barros V G. Water-energy-food security nexus: Estimating future water demand scenarios based on nexus thinking: The watershed as a territory [J]. Sustainability, 2023,15(9):7050.

[55] Angarita H, Wickel A J, Sieber J, et al. Basin-scale impacts of hydropower development on the Mompós Depression wetlands, Colombia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2018,22(5):2839-2865.

[56] Nasrollahi H, Shirazizadeh R, Shirmohammadi R, et al. Unraveling the water-energy-food-environment nexus for climate change adaptation in Iran: Urmia Lake basin case-study [J]. Water, 2021,13(9):1282.

[57] Ramos E P, Howells M, Sridharan V, et al. The climate, land, energy, and water systems (CLEWs) framework: A retrospective of activities and advances to 2019 [J]. Environmental Research Letters, 2021,16(3):033003.

[58] Giampietro M, Bukkens S G F. Analogy between Sudoku and the multi-scale integrated analysis of societal metabolism [J]. Ecological Informatics, 2015,26:18-28.

[59] Rozhkov A, Zellner M, Murphy J T, et al. Identifying leverage points for sustainable transitions in urban - rural systems: Application of graph theory to participatory causal loop diagramming [J]. Environmental Science & Policy, 2025,164:103996.

[60] Purwanto A, Sušnik J, Suryadi F X, et al. Using group model building to develop a causal loop mapping of the water-energy-food security nexus in Karawang Regency, Indonesia [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,240:118170.

[61] Shi Haiyang, Luo Geping, Zheng Hongwei, et al. Cou-

pling the water-energy-food-ecology nexus into a Bayesian network for water resources analysis and management in the Syr Darya River basin [J]. Journal of Hydrology, 2020,581:124387.

[62] Wang Yong, Zhao Yang, Wang Yunyue, et al. Supply-demand risk assessment and multi-scenario simulation of regional water-energy-food nexus: A case study of the Beijing-Tianjin-Hebei region [J]. Resources, Conservation and Recycling, 2021,174:105799.

[63] Ding Jianpeng, Deng Menghua. Coupling coordination analysis of water-energy-food-ecology in the Yangtze River delta [J]. Water Supply, 2022,22(9):7272-7280.

[64] Wang Yirui, Song Jinxi, Zhang Xuexian, et al. Coupling coordination evaluation of water-energy-food and poverty in the Yellow River basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2022,614:128461.

[65] 高静,王小琳,孙旭光,等.基于ISM-AHP方法的新疆能源-粮食-水耦合系统协调发展研究[J].系统科学与数学,2022,42(12):3288-3305.
Gao Jing, Wang Xiaolin, Sun Xuguang, et al. Research on coordinated development of Xinjiang energy-food-water nexus based on ISM-AHP method [J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 2022, 42(12):3288-3305.

[66] Li Jiaxiu, Chen Yaning, Xu Changchun, et al. Evaluation and analysis of ecological security in arid areas of central Asia based on the emergy ecological footprint (EEF) model [J]. Journal of Cleaner Production, 2019,235:664-677.

[67] Wu Di, Zhang Zuowei, Liu Dong, et al. Calculation and analysis of agricultural carbon emission efficiency considering water-energy-food pressure: Modeling and application [J]. Science of the Total Environment, 2024,907:167819.

[68] Qin Jingxiu, Duan Weili, Chen Yaning, et al. Comprehensive evaluation and sustainable development of water-energy-food-ecology systems in central Asia [J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2022, 157:112061.

[69] Zheng Xiaogui, Huang Guohe, Liu Lirong, et al. A multi-source virtual water metabolism model for urban systems [J]. Journal of Cleaner Production, 2020,275:124107.

[70] 胡锦超,方建,赵峰,等.1961—2020年中国不同气候区高温-暴雨复合极端事件时空分布及风险评估研究[J].地理科学进展,2025,44(6):1272-1286.
Hu Jinchao, Fang Jian, Zhao Feng, et al. Temporal and spatial distribution and risk assessment of compound extreme events of high temperature and heavy rainfall in different climate zones of China from 1961 to 2020 [J]. Progress in Geography, 2025,44(6):1272-1286.

[71] Deng Chao, Zhang Yinchi, Ma Miaomiao, et al. Compound temporal-spatial extreme precipitation events in the Poyang Lake basin of China [J]. Journal of Hydrology:Regional Studies, 2025,58:102270.

[72] 唐樱歌,刘伟,高艳红.长江中下游平原2022年高温干旱复合型极端事件的影响因子分析[J].大气科学学报,2024,47(4):533-540.
Tang Yingge, Liu Wei, Gao Yanhong. Analysis of influencing factors of heatwave and drought compound extreme events in 2022 in the middle-lower Yangtze Plain [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2024, 47(4):533-540.

[73] Banwart S, Bernasconi S M, Bloem J, et al. Soil processes and functions in critical zone observatories: Hypotheses and experimental design [J]. Vadose Zone Journal, 2011,10(3):974-987.

[74] 张甘霖,宋效东,吴克宁.地球关键带分类方法与中国案例研究[J].中国科学:地球科学,2021,51(10):1681-1692.
Zhang Ganlin, Song Xiaodong, Wu Kening. Classification method of earth's critical zone and case studies in China [J]. Scientia Sinica (Terrae), 2021, 51(10):1681-1692.

[75] 金钊,王云强,高光耀,等.地球关键带与地表通量综合观测研究为黄土高原生态保护和可持续发展提供有力的科技支撑[J].中国科学院院刊,2020,35(3):378-387.
Jin Zhao, Wang Yunqiang, Gao Guangyao, et al. Comprehensive earth critical zone observation and terrestrial surface flux monitoring provide strong scientific support for ecological protection and regional sustainable development on the Loess Plateau of China [J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2020,35(3):378-387.

[76] 欧阳志云,徐卫华,肖燚,等.中国生态系统格局、质量、服务与演变[M].北京:科学出版社,2017.
Ouyang Zhiyun, Xu Weihua, Xiao Yi. Pattern, Quality, Services, and Evolution of Chinese Ecosystems [M]. Beijing: Science Press, 2017.

[77] 张君,陈洪松,聂云鹏,等.西南喀斯特关键带结构及其水文过程研究进展[J].应用生态学报,2024,35(4):985-996.
Zhang Jun, Chen Hongsong, Nie Yunpeng, et al. Research progress on structure and hydrological processes in the karst critical zone of southwest China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2024, 35(4):985-996.

[78] Zhang Lina, Ji Zhanghanyu, Fu Shengrong, 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.