学术信息与动态

DOI: 10.20103/j.stxb.202307261592

李潋,赵勇,姜珊,王浩,齐恬鑫,凌敏华,朱永楠,李海红,何凡,何国华.基于文献计量分析的水、能源和粮食纽带关系研究进展.生态学报,2024,44(17):7909-7922.

基于文献计量分析的水、能源和粮食纽带关系研究进展

李 潋[1],赵 勇[1],姜 珊[1,*],王 浩[1],齐恬鑫[2],凌敏华[2],朱永楠[1],李海红[1],何 凡[1],何国华[1]

1 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室,北京 100038

2 郑州大学水利与交通学院,郑州 450000

摘要:水、能源和粮食(WEF)是满足人类基本需求和社会经济发展的重要资源,自 2008 年至今,WEF 相关研究引起国内外广泛关注,论文数量增加近百倍,已成为当前研究热点。但考虑目前只处于初步研究阶段,亟待系统梳理已有研究以期指导未来发展,基于此采用定量及定性结合的方法梳理国内外 WEF 纽带关系的研究进展,通过解析国内外研究尺度、方法及对象的异同之处,力求研判我国 WEF 未来领域研究方向。结果表明:(1)2008—2022 年 WEF 纽带研究大致可分为概念探索、初步开发和蓬勃发展三个阶段。(2)根据定量 Citaspace 方法发现,研究热点方面国际上侧重基于量化评估方法开展资源间的流动研究,国内则聚焦于影响因素分析以支撑政策制定;研究前沿方面国际研究逐步实现了从宏观管理到微观应用再到更深入的多要素化研究转变,相较而言国内研究较为滞后。(3)根据定性归纳总结发现,研究尺度方面共包括全球、国家、流域、区域、城市、家庭六种尺度,国际聚焦于人口密集的城市尺度,而国内聚焦于 WEF 矛盾突出地区尺度,例如黄河流域、京津冀地区。研究方法方面国际聚焦于量化评估及模拟优化,而国内聚焦于量化评估和指标评价。研究对象方面国内外均聚焦于 WEF 内部研究。未来我国需在 WEF 纽带机理认识、研究尺度扩展、集成模型开发、外部要素耦合方面加强关注。

关键词:水、能源、粮食纽带;知识图谱;文献计量分析;对比;进展

水、能源和粮食(WEF)是支撑经济社会健康可持续发展的重要资源。受人口及经济增长、城镇化水平提高、饮食结构变化等因素影响,有关学者研究预计到 2030 年,全球对水、能源和粮食的需求将分别增长 40%、35%和 50%[1],届时水资源短缺与能源、粮食需求增长之间矛盾更加突出。WEF 之间存在相互关联、制约与依存的纽带关系,一种资源的生产与开发离不开其他两种资源的支撑[2]。WEF 中任何一个子系统的变化都会对其他子系统产生影响,因此开展三者耦合研究是必然趋势,开展系统性、综合性的集成研究将有利于加强不同系统间的管理,有助于推进 WEF 协同可持续管理与发展[3]。

受 2008 年油价危机、食品价格上涨引发的粮食安全危机、水资源短缺危机影响,该年开始出现 WEF-Nexus 相关问题研究[4]。随后几年国际组织认识到水、能源和粮食政策不能孤立管理,自 2011 年波恩会议上正式提出 WEF 纽带关系,资源安全[5]、协同效率[6]、系统优化[7]等相关研究便成为国内外研究热点,仅 2011—2015 年间,约有 300 个来自学术界、商业和政府的相关组织机构参与了 WEF 纽带关系研究[8]。由于 WEF 纽带关系属于跨学科、交叉领域研究,因此,具有多中心、多维度且时空动态不确定性与复杂性交织的特

基金项目:国家自然科学基金项目(52025093,52061125101);国家重点研发计划项目(2021YFC3200204)

收稿日期:2023-07-26; **网络出版日期**:2024-06-26

* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: jiangs@ iwhr.com

点[9]。具体来看,国内外学者基于不同研究尺度、研究方法、研究内容等开展过相关研究,取得了丰硕成果,诸如研究尺度方面,主要针对全球、国家、城市以及家庭等尺度;研究方法方面,研发出的 CLEWS、WEF nexus Tool 2.0、WEFSiM、Q-Nexus、MuSIASEM、NexSym、PRIMA 等集成模型[10]引发较高关注;研究内容方面,前期主要以探索 WEF 系统中水、能源、粮食两两关系为主,如 Chen 等[11]、Zhang 等[12]主要以水能关系开展分析,后期主要以 WEF 为核心纽带关系,逐步增加了对社会、经济、环境和气候等因素的考虑,如在 WEF 研究基础上增加考虑粮食种植结构、人口、经济、气候变化征收碳税、废水排放等影响分析。通过归纳分析已有研究发现,现阶段仅侧重于方法或文献计量分析[10]中某一方面研究,缺乏从整体角度出发的 WEF 三者全方位、系统性的研究进展梳理。除此之外,国内 WEF 纽带研究起步相对较晚,与国际 WEF 研究存在较大差异[13]。因此,首先有必要针对研究尺度、研究方法、研究内容开展 WEF 全方位的、系统的研究进展梳理,以厘清现阶段 WEF 纽带关系研究的整体框架及演进脉络。其次,基于国内外对比分析厘清国内外 WEF 纽带关系研究区别,借鉴国际上 WEF 研究前沿,提出适应于我国 WEF 未来研究发展方向,为国内 WEF 研究提供理论参考[14—15]。

基于此,本文拟采用定量及定性结合的方法开展国内外 WEF 研究对比。其中,定量方面基于 CiteSpace 软件开展量化研究,利用 2008—2022 年的 Web of Science(WOS)以及中国知网(CNKI)数据库构建知识图库,了解国内外发文基础信息,重点开展研究热点和前沿知识图谱对比分析,掌握国内外 WEF 研究的热点聚类分布、主题漂移规律和前沿研究趋势,全面梳理国内外研究进展。在此基础上,通过定性归纳总结对比国内外研究内容,诸如研究尺度、方法及研究对象等方面的异同点,提出 WEF 研究新方法和新思路,以期为国内 WEF 研究、解决管理矛盾、实现资源可持续发展战略提供理论参考。

1 研究框架方法与数据来源

1.1 研究框架与方法

本文研究框架主要包括三大步骤,如图 1 所示,第一步采用定量及定性结合的研究方法,构建基于 WOS 和 CNKI 数据库的知识图库,全面梳理现阶段 WEF 文献,主要包括全面综述[16]、重点关注类综述[17]、综合分

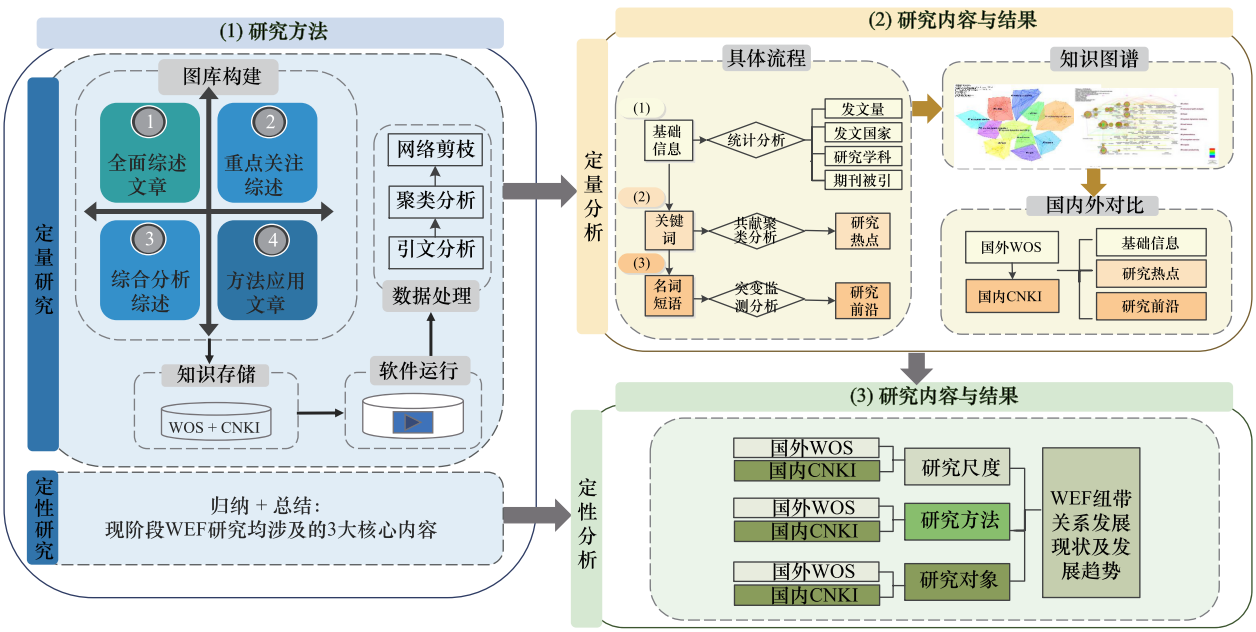


图 1 WEF 纽带知识图谱构建框架图

Fig.1 WEF nexus knowledge graph construction framework

WEF:水、能源和粮食 Water, energy and food;WOS:Web of Science;CNKI:中国知网

析综述[18]、方法应用[5]四大类文献[19];第二步开展定量分析,主要通过运用 CiteSpace 引文可视化分析软件(6.2.R4)构建知识图谱[20—21],定量地对基础信息、研究热点、研究前沿三方面开展国内外对比分析;第三步开展定性分析,通过文献归纳总结,分析国内外研究尺度、方法及研究对象的特点,全面对比国内外研究现状,客观揭示国内外 WEF 研究动态、发展过程及演变趋势,发现国内 WEF 研究存在的不足之处,以期推动国内未来 WEF 研究发展。

1.2　数据来源

为增强国内外对比效果并考虑软件可操作性,本文收集 2008—2022 年间 WEF 纽带研究相关文献。在 WOS 数据库中使用高级检索,以“主题”=“water”and“energy”and“food”and“nexus”,文献类型选择“Articles”和“Review Articles”,精确检索,检索截止时间为 2022 年 12 月 31 日,共得到检索结果 1850 条,剔除不满足要求的文献后,最终整理得到 1172 篇。在 CNKI 数据库中使用高级检索,以“篇名”=“水”and“能源”and“粮食”或“水”and“能”and“粮”或“水”and“能源”and“食物,精确匹配搜索,共得检索结果 158 条,剔除不满足要求的文献后(如 2008 年以前文献、非水资源及环境相关专业文献),最终整理得到 147 篇。

2　WEF 纽带研究发文态势

2.1　年发文量与国家

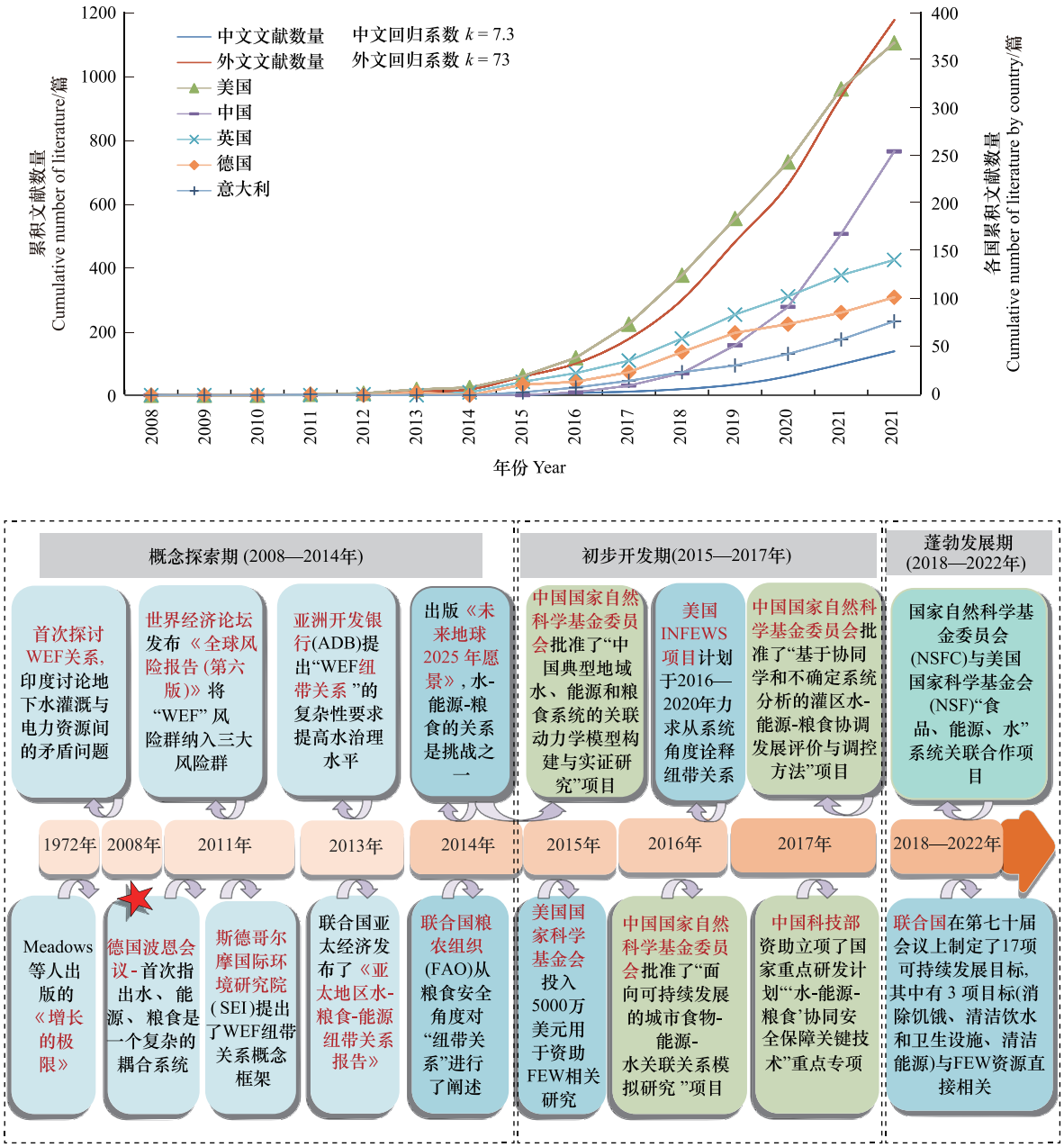
按发文年份对检索文献进行数量统计,得到了 2008 年至 2022 年 WEF 纽带研究领域文献的时间分布图(图 2)。在过去 15 年中,WEF 纽带研究文献数量呈现出明显稳定的上升趋势,根据文献数量大致分为三个阶段:(1)概念探索期(2008—2014 年),2008 年首次提出 WEF 概念,主要为解决当时印度鼓励农业发展大量开采地下水引发含水层枯竭,倒逼影响水资源、农业可持续发展这一问题。而后至 2011 年德国波恩召开“水-粮食-能源安全纽带关系会议”成为纽带关系研究的里程碑事件,此后多个国际组织倡议开展 WEF 等研究。但该阶段文献发表数量徘徊在低位甚至无文献,该阶段属于理论探索阶段。(2)初步开发期(2015—2017 年),由于美国、中国等多个国家增加了相关科研管理机构相关资助项目,使得 WEF 纽带研究逐渐增多,但该阶段论文增速仍然较为缓慢,年文献发表数量约为 50 篇。(3)蓬勃发展期(2018—2022 年),经上一阶段初步发展,WEF 纽带关系引起了各国政府、企业和学术界的广泛关注和高度重视,该阶段国内外文献发表量逐年上升,其中仅美国、中国两国发文量就占到总发文量 60%左右,2022 年文献数量最多,当年外文文献数量为 239 篇,中文文献数量为 42 篇。外文文献相关回归系约为中文文献回归系数的 10 倍,其增长速度明显高于中文文献数量的增长速度。

2.2　研究学科

对检索到的中外文献进行统计分析,图 3 展示了发文量排名前 7 位的学科。国际上 WEF 领域研究文献分布在 197 个学科,其中以环境科学与生态学、社会科学和工程学为主,占总发文量的比例分别为 61%、43.6%和 26.4%。而国内 WEF 领域研究文献则分布在 12 个学科,主要集中于农业经济、工业经济、水利水电工程和动力工程等方面,占总发文量的比例分别为 83.5%、70.9%、66.9%和 60.6%。可以看出,国际上主要集中于环境科学、社会科学等方面,而国内主要集中于农学、工程学等方面。同时,能够看出 WEF 关系研究涉及的学科众多,内容也相对广泛,借助多学科交叉理论来研究 WEF 问题已成为主要趋势。

2.3　期刊共被引分析

利用 CiteSpace 软件的“Cited Journal”功能对 WOS 文献数据进行期刊共被引分析,按照共被引频次进行排序,列出排名前七的期刊于表 1 之中。从表 1 中可以看出文献发表期刊类型大多是影响力较大的期刊,较多属于中国科学院分区(2022 年)1 区,期刊影响因子接近或超过 10,所载相关 WEF 文献一定程度上能够代表 WEF 领域研究的核心与前沿热点。共被引频次最高的期刊发表在 *Energy Policy*,共被引频次为 606 次。其次为 *Environmental Science & Policy*、*Journal of Cleaner Production* 和 *Science of The Total Environment* 等,共被引频次分别为 604、602 和 598 次。



注：图中蓝色方框为国际事件，绿色方框为国内事件，蓝绿色为中美联合项目

图 2 2008—2022 年 WEF 纽带研究发文量及发展历程分布

Fig.2 The number and development history of WEF nexus research papers from 2008 to 2022

FEW 为食品、能源、水

3 WEF 研究热点与前沿

3.1 研究热点与知识基础

3.1.1 国际研究热点与知识基础

对源自 WOS 的 1172 篇文献进行关键词共现分析，利用 CiteSpace 软件将各关键词进行 Timeline View 聚类，得到图 4。根据软件计算共生成 381 个节点，1105 条连线，密度为 0.0153，将结果以时间线图展示，图 4 中节点越大(节点指圆圈大小)表示该关键词在 WEF 领域外文文献中出现的频次越高。右侧序号越小(序号指纵轴序号数字)，则表示所包含的文献数量越多。

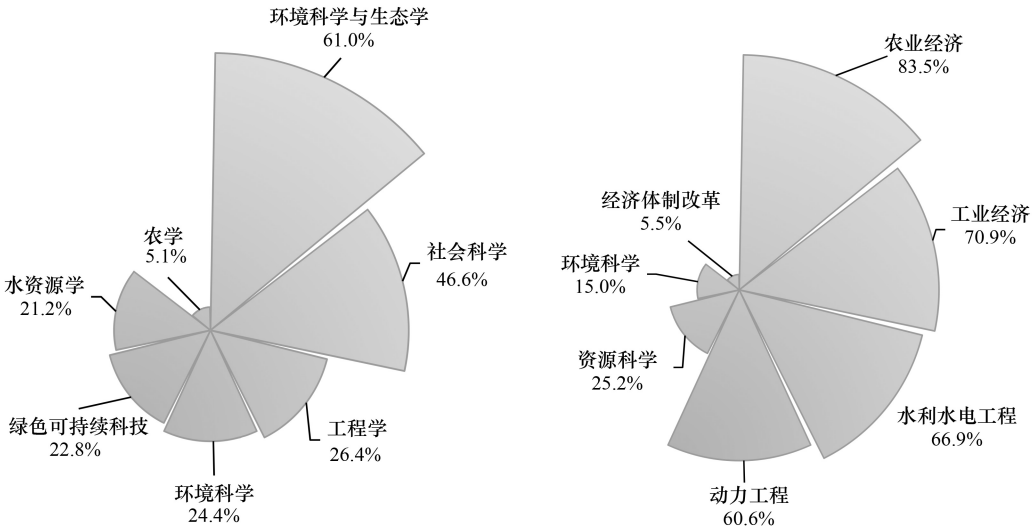


图 3　国内外 WEF 纽带研究学科统计

Fig.3　Domestic and foreign WEF nexus research subject statistics

表 1　2008—2022 年 WEF 领域外文文献共被引期刊

Table 1　WEF nexus foreign literature journals were cited from 2008 to 2022

序号 Number	共被引频次 Co-citation frequency	期刊 Journal	中国科学院分区 Division of Chinese Academy of Sciences	影响因子 Impact factor
1	606	Energy Policy	1	7.576
2	604	Environmental Science & Policy	1	6.424
3	602	Journal of Cleaner Production	1	11.072
4	598	Science of The Total Environment	1	10.753
5	499	Applied Energy	1	11.446
6	497	Environmental Research Letters	1	6.947
7	474	Renewable & Sustainable Energy Reviews	1	16.799

结合国际研究进展分析,以图 4 中较具有代表性的聚类为例,可将聚类划分为 3 种类型。第一种聚类 0“城市(urban)”是指在文献快速增加期所开展的具体研究区域应用,具有稳定的研究前景。主要由于目前世界上超过一半的人口生活在城市中,未来城市化趋势仍将继续,预计到 2030 年城镇化率将由 2015 年的54.5%升至 60%,城市是 WEF 矛盾突出的关键节点,使得城市成为 WEF 研究热点[22]。

第二种聚类 2“粮食(food)”、聚类 4“水-能-粮纽带(WEF nexus)”、聚类 5“工具(tool)”、聚类 9“水生产(water productivity)”,这类聚类的特点是研究起步早,但随着研究的不断深入,研究方向越来越精细化。粮食问题是当今世界面临的重大问题之一,尤其是在水资源紧缺或是能源匮乏地区,粮食安全直接影响民生,除联合国粮农组织(FAO)外,世界各国及相关机构均密切关注气候变化[23]、新型冠状疫情和地缘政治冲突给全球粮食安全带来的严峻考验,因此粮食系统安全较早于 2011 年最先被提出。而后 2013 年左右,气候变化和日益增长的人类活动对资源环境造成巨大压力引起广泛关注[24],随着向气候变化等研究转变表明 WEF 研究更加多要素化和细致化。

第三种聚类 1“结构路径分析(structural path analysis)”、聚类 3“系统动力学建模(system dynamics modeling)”、聚类 5“工具(tool)”,是方法具体应用的体现,也是研究阶段过程中非常重要的一环,主要由于研究区域及对象不同,所适配的研究工具也有所不同,诸如国家尺度的研究工具无法适用于家庭尺度,因此,针对不同尺度及研究内容分别研发了与之相适配的工具,使得“工具”成为研究热点[25]。受全球经济一体化影

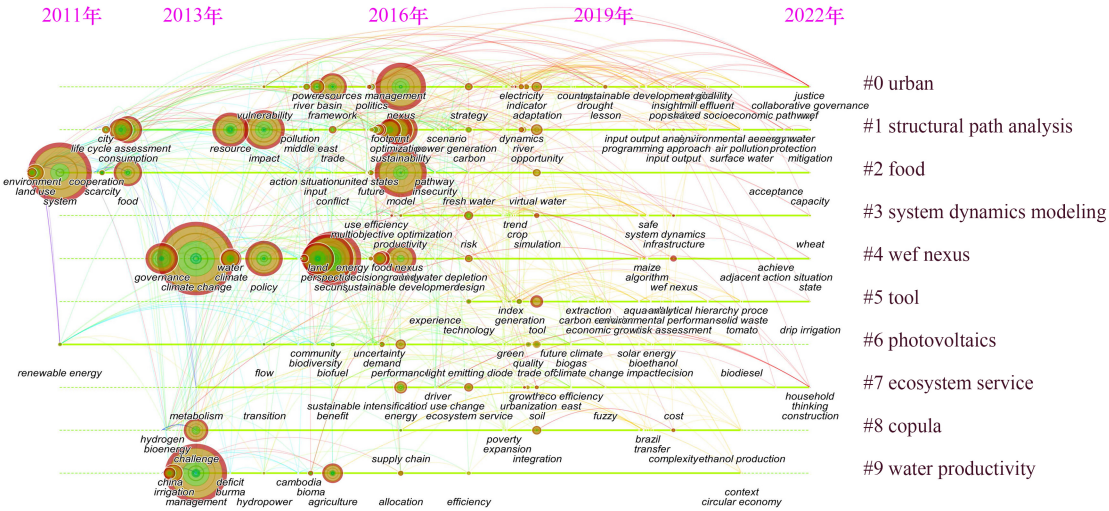


图 4 国际 WEF 纽带研究聚类(Timeline View)图谱

Fig.4 International WEF nexus research cluster Timeline View diagram

响进程,使得贸易成为解决资源匮乏地区的重要途径,虚拟贸易地位日益凸显,因此“结构路径分析”方法成为研究热点。

3.1.2 国内研究热点与知识基础

对源自 CNKI 的 147 篇文献做关键词共现分析,利用 CiteSpace 软件的“Keyword”分析功能,得到聚类(Timeline View)图 5,共生成 118 个节点,190 条连线,密度为 0.031。

结合国内研究进展分析,聚类关键词可划分 2 种类型,如图 5 所示。其中,第一种主要针对 WEF 矛盾突出的研究区及对象开展研究,如聚类 0“黄河流域”、聚类 1“能源”,主要由于黄河流域作为支撑西部大开发及“一带一路”发展的重要区域[26—28],是典型的资源丰富与干旱结合地区,而黄河流域又是重要的能源基地,区域资源矛盾突出,是我国 WEF 典型研究区,学者赵良仕等[26]、彭少明[27]均开展过相关研究,提出支撑黄河流域 WEF 协同、高质量、可持续发展的重要举措。第二种聚类 2“粮食安全”、聚类 4“影响因素”,为早期探索阶段,较为关注粮食安全及影响因素分析。

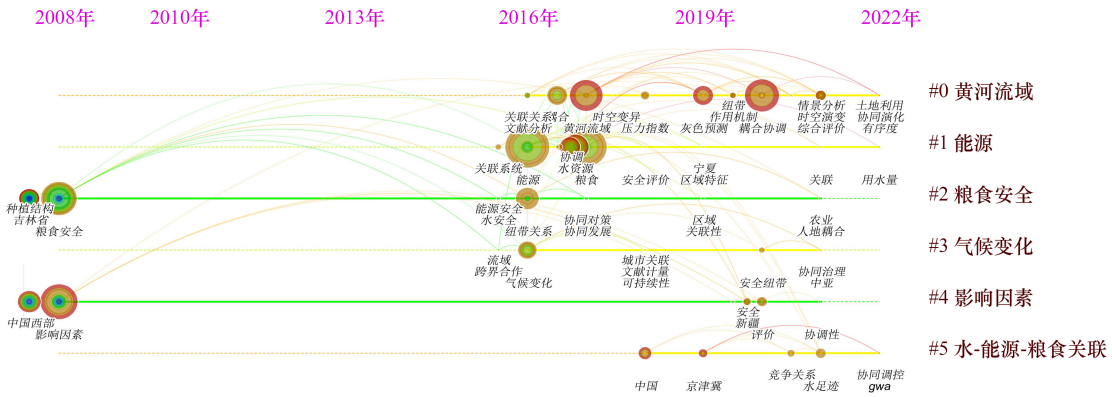


图 5 国内 WEF 纽带研究聚类(Timeline View)图谱

Fig.5 Domestic WEF nexus research cluster Timeline View diagram

3.2 研究前沿与发展趋势

3.2.1 国际研究前沿与发展趋势

前沿的识别与追踪可以提供学科最新演变动态,揭示各阶段研究的侧重与发展。本文采用的时间切割设

置为 1 年,即图 6 中每一条蓝线代表 1 年,图 6 左侧关键词则是红线时间段内出现的高频关键词,该图表征时间变化上的关键词突现状况,在一定程度上反映特定时期的研究热点及发展趋势。从图 6 可以看出突变主要包括 3 个阶段,第一个阶段(2010—2013 年)的突现词为环境(environment)、灌溉(irrigation)、稀缺(scarcity)、治理(governance)。这一阶段 WEF 纽带关系研究刚刚进入大众视野,重点关注对象为 WEF 资源安全,考虑到随着人口及经济增长带来的资源枯竭、生态系统服务退化与社会和环境不可逆转等威胁[29],因此该阶段侧重于宏观管理,提出了较多的 WEF 治理相关管理办法。

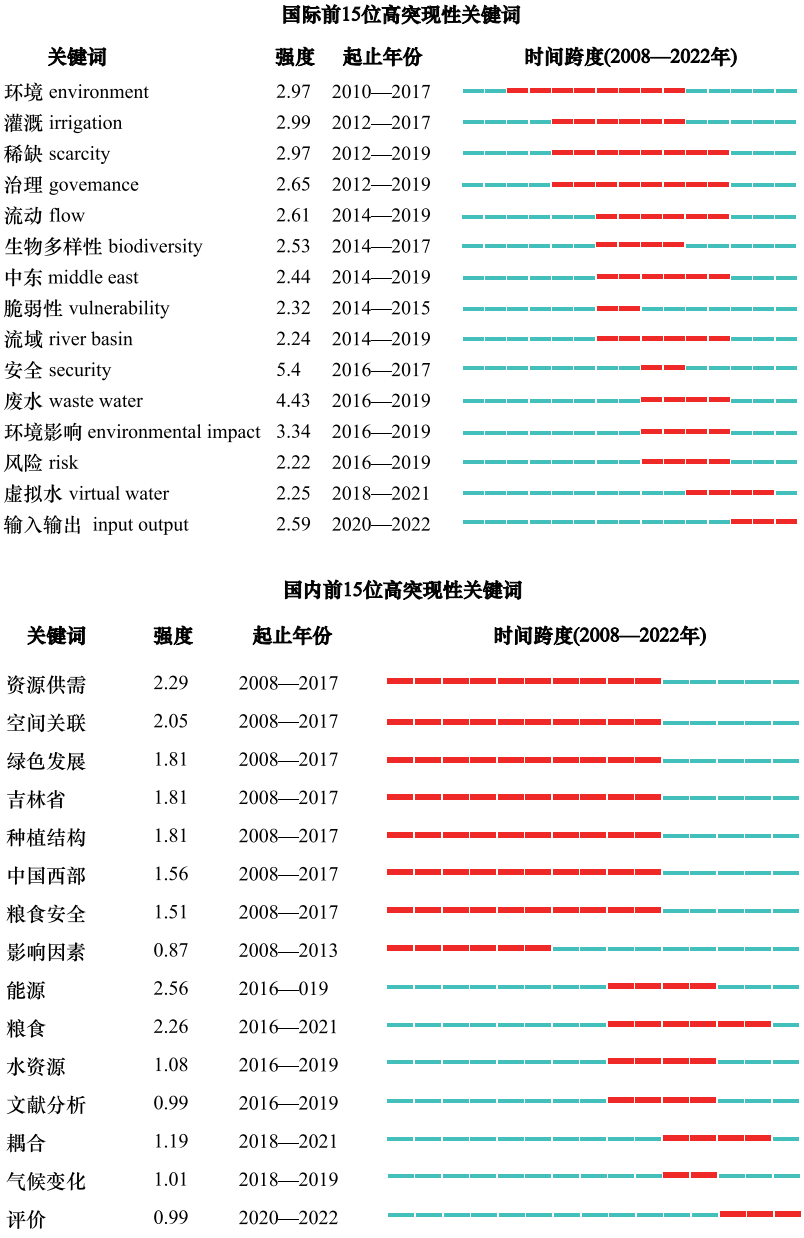


图 6　国内外 WEF 纽带研究突现词变化

Fig.6　WEF nexus research at nternational and domestic sudden word change

第二个阶段(2014—2015 年)突现词为多样性(biodiversity)、中东(middle east)、脆弱性(vulnerability)、流域(river basin)。旨在构建基于当地资源禀赋条件的 WEF 配置框架,确定国家 WEF 资源配置战略,较为典型的研究区域为中东地区的卡塔尔和伊朗[30]等地。同时,微观角度如生物多样性问题也受到了广泛关注[22]。该阶段与第一阶段有所不同,呈现出从宏观、笼统走向微观、具体区域地点研究的发展趋势。

第三个阶段(2016—2022 年)的突现词为安全(security)、废水(waste water)、环境影响(environmental impact)、风险(risk)、虚拟水(virtual water)、投入产出(input output)。其中,“安全(security)”一词的突现强度最高,达到 5.4,表明水资源、粮食和能源安全问题成为重点研究对象。此外,随着全球化贸易的发展,贸易计划作为缓解资源紧缩的一种潜在战略受到国际上广泛关注[8],使得水、能源和粮食等资源贸易得到快速发展。由此可见,这一阶段的研究更加深入和多要素化,进入了活跃期和深化期。

3.2.2 国内研究前沿与发展趋势

从突现强度整体来看,国内整体强度较低,突现强度最大的词为“资源供需(2.29)”、“能源(2.56)”、“粮食(2.26)”。通过梳理发现国内突现词变化主要分为三个阶段,第一阶段(2008—2016 年)突现词为资源供需、空间关联、空间分布、绿色发展、吉林省、种植结构、中国西部、粮食安全、影响因素。该阶段研究主要集中于中国东北地区及西部地区的资源短缺或不匹配问题[31]。可以看出该阶段 WEF 研究重点聚焦于空间分析,旨在解决典型区域资源分配不均问题。第二阶段(2016—2018 年)突现词包括能源、粮食、水资源、文献分析,由于水、能源、粮食纽带研究涉及因素较多,此时国际已产生不少相关研究,因此国内掀起了文献分析热潮,旨在通过文献计量的形式开展研究现状与进展分析[14—15,32—33]。第三阶段(2018—2022 年)突现词为协调、耦合、气候变化、评价、纽带关系,该阶段开始关注气候变化等外部因素研究[34—35]。

3.3 国内外 WEF 研究核心内容比较

3.3.1 研究尺度方面

明确研究尺度是开展 WEF 纽带关系分析的基础,研究尺度是开展 WEF 纽带关系研究的第一步,针对不同系统边界分析将产生不同的研究结果。

通过梳理文献得到表 2,国际上 WEF 研究较为全面的包含了全球[36]、国家[37]、流域[38]、区域[39]、城市[40—42]、家庭[43—44]六种尺度。结合聚类分析结果(图 4)来看,国际上较多集中于城市和国家尺度研究,根据计算,城市尺度研究占比可达 11%,主要由于城市是水、能源、粮食矛盾最显著区域[45],且未来城市化进程进一步加剧,加之城市尺度大小适中,拥有较为完善的基础设施和数据收集系统,数据获取相对集中可行,使得城市尺度研究相对较多[46]。较为典型的研究主要集中在资源矛盾突出的印度新德里[8]、中国北京[40]、美国底特律[41]、美国亚利桑那州凤凰城等[42]等地区。国家尺度研究占比为 9%,主要由于 WEF 资源在全球尺度内流动,进而可能影响部分国家政策,而国家是调控 WEF 发展基调与目标的最高层面[47],基于此不少研究针对国家尺度开展,如早期 2011—2017 年间较多研究集中在资源矛盾突出的巴西、卡塔尔、英国等国家[48],现阶段较为集中在南非、美国、中国和印度等贸易大国。

国内研究主要集中在国家[49]、流域[26]、区域[31]、城市[50]四种尺度,针对 WEF 矛盾较为突出且与行政区划具有较高重合度的区域、城市群开展研究较多,例如能源相对富集但水资源紧张的粮食产地黄河流域(结合图 5 中聚类结果 0 黄河流域),以及人口众多使得 WEF 需求大,且禀赋较差的京津冀地区[46],重点分析典型区域资源间竞争关系,为当地资源可持续发展提供参考[51—52]。

3.3.2 研究方法方面

研究方法是 WEF 纽带研究的具体实现。通过归纳总结,涉及方法类的文献共有 587 篇,其中,定量方法类文献 380 篇,占方法类文献总量的 65%,主要分为量化评估、模拟优化两大类(详见表 2)。其中,量化评估主要包括状态评估以及分析 WEF 系统内资源流动及消耗物理关联过程评估两大类。模拟优化则重点针对 WEF 三者内部或外界因素影响开展资源安全状况模拟,较为常见的是以土地利用、粮食种植结构、人口、生活方式、经济、气候、生态环境变化等为切入点开展情景模拟,并在此基础上开展进一步优化配置[53]。归纳总结研究方法具体内容见表 2。

国际上研究方法较为重视方法应用与创新,结合图 4 中聚类结果 1(结构路径分析)表明量化评估方面较为侧重于物理关联分析,重点描述 WEF 三者资源间的物理流动;图 4 中聚类结果 3(系统动力学模型)说明模拟优化方面 SD 模型较为流行,主要由于 SD 模型具有普适性特点,较适用于多学科、多因素的 WEF 纽带研

究。学者们开发的集成模型诸如 CLEWS[23]、NexSym[54]、WEFO[55]、WEF Nexus Tool 2.0[56]、Q-Nexus[57]、MuSIASEM[58]、ABM[59]、PRIMA[60]等虽引发较高关注,但这些集成工具大多存在一定的适用局限性,更换区域或指标再次模拟应用时存在一定限制,而模型修改又具有一定难度,相较之下,SD 这类通用性模型在世界范围内流行较为广泛。

在国内研究方法中,图 5 聚类结果 4(影响因素)体现了国内 WEF 研究较为侧重量化评估中的状态评估方法,基于评估开展影响因素分析。

表 2　WEF 纽带研究主要内容(根据参考文献总结梳理)

Table 2　Main contents of WEF nexus research (summarize and sort according to references)

研究内容 Research Contents	细化 Refinement		主要内容 Main content	国内外研究异同 Research similarities and differences between domestic and foreign
研究尺度 Research scale	尺度边界		包括全球、国家、流域、区域、城市、家庭六种尺度	国际:包括全球、国家、流域、区域、城市、家庭六种尺度,较为集中在城市及国家尺度; 国内:包括国家、流域、区域、城市四种尺度,聚焦于区域和城市群尺度
研究方法 Research methods	(1)量化评估①—②		①状态评估:主要针对安全状态及空间分异特征、压力、效率、韧性与可持续性等特性开展量化评估。常见的有耦合协调评价,可持续性评价等 ②物理关联:主要分析 WEF 子系统(资源要素)之间的资源流动及足迹影响。一般包括三种方法,分别是自上而下法、自下而上法和混合法。自上而下法研究主要基于历史数据进行过程分析,包括生命周期法、定额法、水足迹等;自下而上法的代表性方法为投入产出法,该方法将生产者和消费者关联起来,根据投入量和产出量核算资源在不同部门间的流通。混合法指通过网络分析、物质流和能量流分析、结构路径分析等方法开展进一步分析	国际:主要聚焦于量化评估中的②物理关联-结构路径分析方法和模拟优化中的③模拟预测-SD 模型方法; 国内:主要聚焦于量化评估中的①状态评估-综合评价及影响因素分析
	(2)模拟优化③—④		③模拟预测:主要针对 WEF 资源间的供需开展模拟预测,常见的有多主体模型(ABM)和系统动力学模型(SD)等 ④集成优化:主要通过多因素预测模型集成形成,常见集成模型主要包括土地利用模型(LUCC)、水资源模型(WEAP)、水文模型(SWAT)、能源系统模型(LEAP)、农业生态模型(AEZ)、经济模型等模型耦合集成新的综合型模型,通常需要一种模型的输出作为另一种模型的输入。除此之外,多目标规划模型和协同优化模型能够对水-能源-粮食系统进行优化配置	
研究对象 Research object	内外因素	内部	内部特征:指在 WEF 整体系统构建的基础上,重点分析三者内部的关键过程,如水、能源、粮食、水-能源、水-粮食、粮食-能源等内部某几项关键过程	国内外:聚焦于 WEF 三者内部因素研究
		外部	外部特征:指基于 WEF 整体系统之上,考虑其他因素对 WEF 三者的影响,根据来源又可分为两类,一类为自然因素,另一类为社会因素。自然因素主要指气候变化、极端天气、自然灾害等。社会因素主要指强人类活动下的城市化和经济全球化、土地利用变化等影响,从外部环境对 WEF 资源带来较大影响	
	性质		可靠性、协同性、韧性、弹性、可持续性等是 WEF 内部和外部均具备的共同性质。如可靠性表征 WEF 内部各系统可靠程度,协同性表征两两系统间的转化效率和影响程度,韧性是指系统在外部冲击或干扰期间的抗风险能力,可持续性是指系统在外部因素影响下可持续发展的能力。	国际:聚焦于可靠性、协同性、韧性、可持续等水平研究; 国内:聚焦于耦合协调性等安全指数水平研究

3.3.3　研究对象方面

将研究对象划分为内部和外部因素是确定驱动因子的关键步骤。根据文献总结将研究对象归纳为 2 大

类,一类为探讨系统内部相互作用,另一类为探讨外部因素对 WEF 系统的影响,摸清研究对象将有助于在初始建模阶段定义系统边界并澄清主要研究问题,掌握 WEF 机理性质有利于从零散化、碎片化研究中挖掘出核心内容,以期从顶层指导学科的研究发展。除此之外,可靠性[5]、协同性[5]、韧性[61]、弹性[62—63]、可持续性[64]等是 WEF 内部和外部均具备的共同性质,开展性质研究有利于宏观把控 WEF 研究方向,微观是宏观的基础,宏观是微观的环境,开展性质研究有利于将宏观和微观相结合全面解析内部及外部驱动因子。研究对象具体内容见表 2。

现阶段国际上较为重视 WEF 三者纽带关系和其内部关键过程研究,其原因可能为单个系统内部关系已较为复杂,如水资源单系统内部涉及自然水循环的大气、坡面、地下、河道等过程,社会水循环涉及取水、输水、用水、排水、耗水等过程,摸清水资源单系统过程已经较为复杂,现阶段尚未梳理清楚 WEF 三要素之间的耦合关系,因此当前主要任务仍是梳理清楚 WEF 三者内部间的关系。国内同样也较为重视 WEF 三者间纽带关系和其内部关键过程研究,分析原因与国际一致,梳理清楚 WEF 三者内部之间的关系,有利于开展未来外部耦合关系深度研究。

4 未来研究方向及发展趋势

基于国内外对比分析,提出水、能源和粮食纽带关系领域研究的四方面建议为加强机理研究、拓展研究尺度、多元研究方法、构建平台支撑。WEF 纽带研究进展示意图如图 7 所示。

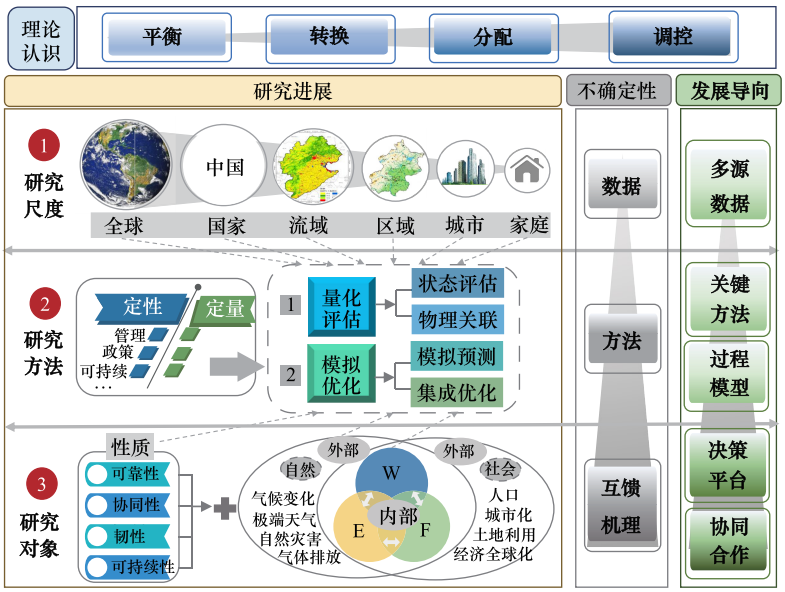


图 7 WEF 纽带研究进展示意图(根据参考文献总结绘制)

Fig.7 Schematic diagram of WEF nexus research progress (drawn based on the summary of references)

4.1 关键机理研究亟待突破

目前 WEF 纽带研究首要解决的问题在于机理认识、理论构建有待丰富和完善。水资源、能源、粮食单系统研究历史悠久,已形成较为完善的评估方法、规划构想、分析要点等研究范式,但对于 WEF 纽带关系内涵和机理仍未给出科学解析。因此,从 WEF 关联机制出发,揭示耦合机理及其协同进化过程,成为未来亟待解决的关键问题。具体来看,关键机理解析旨在回答以下 4 大方面问题(图 7-理论认识所示),①平衡状态判断方面,什么样的 WEF 纽带关系才是平衡的? 如何在考虑资源开发上限和生态保护红线的基础上,通过解析 WEF 纽带关系间供需变化规律并研判 WEF 平衡状态,回答上述问题是开展 WEF 解析的基础。②转换机理解析方面,定量解析 WEF 三者生产、利用、消耗之间的变化特征,以揭示 WEF 要素之间转化机理与定量规律。

分析当某一资源受到限制时,WEF 间是否能够通过转换调节等方式尽可能满足区域内资源需求。③资源优化分配方面,在总量控制的前提下,是否可以通过资源分配实现 WEF 均衡,尤其是随着饮食结构及现代化生产水平提高,如何分配水资源以满足日益增长的粮食和能源需求,如何平衡粮食和能源之间的用水竞争关系成为亟待解决的问题。通过分析 WEF 资源间的关联机制和演化特征,解析 WEF 要素转化过程中风险孕育机理和分配机制是实现资源分配的重要途径[65]。④系统优化调控方面,基于不同的发展目标如何全面调控 WEF 纽带系统使其达到多目标最优? 是否可以通过构建以水为核心的 WEF 要素规则体系,创新 WEF 系统多目标多维度均衡调控理论方法以达到目标最优。现阶段 WEF 协同基础机理认识不足,三者复杂而深刻的互馈作用亟待被突破,未来 WEF 纽带研究发展的底层逻辑离不开上述“平衡-转换-分配-调控”问题的探讨。

4.2　研究尺度需兼顾区域特点及全国统筹规划

统筹考虑区域特点及全国宏观规划确定研究尺度是基础。由于我国资源分布不均、供需不匹配等现实问题,使得不同地区存在不同的 WEF 纽带关系研究问题,例如京津冀地区资源匮乏,但需求旺盛,京津冀地区 WEF 问题主要为本地供给不能满足需求。黄河上中游地区是能源和粮食主产区,资源供给全中国消耗,使得区域内水资源成为限制发展的主要因素,存在能源与粮食对水资源的竞争问题。东南地区水资源丰富,但能源和粮食供给不足且需求量大,该区域主要问题为水资源如何高效服务经济社会发展。西南地区水电资源丰富,在保证粮食生产的基础上,可将丰富的水资源转化成水电输送到东南地区,该区域主要问题为如何实现水资源的效益最大化。随着水网、电网、能源网建设,全国旨在构建统一的水电能源基础设施系统,全面促进各地区间资源优化配置和互联互通。而研究尺度与其所需支撑数据之间关系密切,数据收集通常需要多个部门和行业参与[66],不同研究尺度对应的部门之间数据标准往往不统一,在数据方面给 WEF 关系研究带来较大的不确定性。因此,如何根据不同地域资源禀赋及发展特点且同时考虑全国宏观规划,并结合数据获取可能性,有针对性的开展 WEF 纽带关系研究是基础。

4.3　研究方法及模型趋于多要素化综合化灵活化

研发更为多要素化、综合化、灵活化的 WEF 集成模型是趋势。研究方法方面目前国内较多研究集中于指标评价,缺少对客观数据的挖掘,以及较少利用大数据方法开展更为深入的数据解析。现阶段国内针对单资源已自主开发出了较为成熟的模型,水资源方面,开发了诸如 WACM、WEP、GWAS 等模型,不仅考虑到了“自然-社会”二元水循环,甚至还应用于“山水林田湖草”等多系统模拟。能源模型方面,研发了适用于省际间的中国可再生能源电力规划及运行模型(REPO),探索了气候变化下的 CGEM-CESM(China-in-Global energy model)反馈模型等。粮食方面,基于 CEMM、CARMEM 模型可对粮食产量进行预测。但整体来看,缺乏 WEF 纽带综合研究集成类模型,未来我国应追赶国际研究步伐积极探索 WEF 综合开发模型。且在开发集成模型时,全面考虑 WEF 关键步骤及节点,节点必须足够灵活,以支持模块添加,如可以嵌入土地、气候变化和其他因素,便于在不同时间和空间尺度上开展全方位分析,形成多区域、多尺度、多时间可实现元素间互馈的综合模型。

4.4　研究决策平台应用落地仍需加强

构建平台支撑且逐步提升决策平台落地应用水平。当前国内学界较集中探讨 WEF 系统内部过程,使得外部因素对 WEF 纽带关系驱动机制认识不全面,继而缺乏对整体级联效应的探讨。例如 WEF 纽带关系易受外部诸如不确定的贸易交易、不可预测的气候条件[23]、波动的商品价格和稀缺的资源等不确定性影响[67]。因此,未来应加强 WEF 系统与外部要素之间远程耦合和级联放大效应的关注,提出纽带系统内部与外部要素耦合可持续发展是未来发展趋势。且现阶段纽带关系研究的成果较少应用于决策实践,可以搭建决策支持平台以解决更多实际问题,将学术理论转化为实际决策的工具。为此,伴随着智能化、大数据等技术发展[68],基于各地实际问题建立一个多时空尺度的纽带系统评估决策平台,构建全国动态监测监管机制,使各部门在 WEF 整体系统最优的目标下制定相互协调的长远规划,以提高决策过程的稳健性和可信度。

5 研究结论

梳理国内发文态势、研究热点和前沿、研究内容等研究进展对比分析,得出以下主要结论:(1)发文态势大致可分为概念探索期(2008—2014 年)、初步开发期(2015—2017 年)和蓬勃发展期(2018—2022 年)三个阶段,国内与国际累积发文量相差约 8.5 倍,中美两国发文量占比高达 60%。(2)研究热点方面,国际上以 WEF 矛盾突出且人类活动显著的城市为突破点,采用一些量化评估方式或工具开展资源间的流动研究,开展气候变化与生态环境相结合的多学科融合发展,研究深度与广度均在不断扩大。而国内 WEF 相关研究起步较晚,主要立足于中国国情,开展 WEF 纽带协同安全评价及影响因素研究,致力于服务政策层面的制定与调整。研究前沿方面,国际上逐步实现了从宏观管理到微观、再到具体区域地点应用等更深入和多要素化的转变,旨在从大到小、从宏观到微观推动该领域研究。相较而言,国内 WEF 纽带研究前沿侧重于解决国内 WEF 资源分配不均衡问题。(3)从研究尺度、方法、内容研究进展来看,尺度方面,国际研究包括全球、国家、流域、区域、城市、家庭六种尺度,聚焦于城市地区,国内研究包括国家、流域、区域、城市四种尺度,聚焦于黄河流域、京津冀地区。方法方面,国际上聚焦于量化评估中的物理关联分析以及模拟优化中的模拟预测,国内聚焦于量化评估中的状态评估及影响因素分析。研究对象方面,国内外均聚焦于 WEF 内部因素研究。

鉴于现阶段 WEF 研究涉因素众多,学科研究呈现百家争鸣态势,本文通过梳理现阶段 WEF 研究进展,发现国内已开展 WEF 研究较为侧重解决实际问题,即以政策决策服务为目的,较多基于大区域、大范围开展研究,易忽略微观、个体对 WEF 的影响,同时也缺乏深入的机理解析。基于此,未来国内 WEF 研究发展应加强机理认识,研究尺度方面兼顾国内各区域资源特点一盘棋全局考虑,研究方法方面加强研发节点灵活、考虑外部因素的综合性集成模型,研究对象方面考虑级联效应加强 WEF 系统与外部要素之间远程耦合分析同时,构建多时空尺度的纽带系统评估决策平台,可为决策者提供切实可行的政策建议,促进 WEF 纽带关系协同发展。

参考文献(References):

[1] Albrecht T R, Crootof A, Scott C A. The Water-Energy-Food Nexus: a systematic review of methods for nexus assessment. Environmental Research Letters, 2018, 13(4): 43002.

[2] Carvalho P N, Finger D C, Masi F, Cipolletta G, Oral H V, Tóth A, Regelsberger M, Exposito A. Nature-based solutions addressing the water-energy-food nexus: review of theoretical concepts and urban case studies. Journal of Cleaner Production, 2022, 338: 130652.

[3] Leese M, Meisch S. Securitising sustainability? Questioning the 'water, energy and food-security nexus'. Water Alternatives, 2015, 8(1): 695-709.

[4] Bruns A, Meisch S, Ahmed A, Meissner R, Romero-Lankao P. Nexus disrupted: lived realities and the water-energy-food nexus from an infrastructure perspective. Geoforum, 2022, 133: 79-88.

[5] Li W, Jiang S, Zhao Y, Li H H, Zhu Y N, He G H, Xu Y R, Shang Y Z. A copula-based security risk evaluation and probability calculation for water-energy-food nexus. The Science of the Total Environment, 2023, 856(Pt 2): 159236.

[6] Hussien W A, Memon F A, Savic D A. A risk-based assessment of the household water-energy-food nexus under the impact of seasonal variability. Journal of Cleaner Production, 2018, 171: 1275-1289.

[7] Hasanzadeh Saray M, Baubekova A, Gohari A, Eslamian S S, Klove B, Torabi Haghighi A. Optimization of Water-Energy-Food Nexus considering CO_2 emissions from cropland: a case study in northwest Iran. Applied Energy, 2022, 307: 118236.

[8] Endo A, Tsurita I, Burnett K, Orencio P M. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017, 11: 20-30.

[9] Hoff H. Understanding the nexus: Background paper for the Bonn 2011 Nexus Conference: The water, energy and food security nexus. Nexus Conference: The water, energy and food security nexus. Bonn: Stockholm Environment In-stitute, 2011: 7-18.

[10] 王红瑞, 赵伟静, 邓彩云, 闫佳伟. 水-能源-粮食纽带关系若干问题解析. 自然资源学报, 2022, 37(2): 307-319.

[11] Chen S Q, Chen B. Urban energy-water nexus: a network perspective. Applied Energy, 2016, 184: 905-914.

[12] Zhang X D, Vesselinov V V. Energy-water nexus: balancing the tradeoffs between two-level decision makers. Applied Energy, 2016, 183: 77-87.

[13] Han X X Q, Zhao Y, Gao X, Wang Y B, Jiang S, Zhu Y N, An T L. The historical footprint and future challenges of water-energy-food nexus research: a bibliometric review towards sustainable development. Environmental Reviews, 2021, 29(2): 260-276.

[14] 黄雅丽, 邓晓军. 基于 Citespace 的“水-能源-粮食”纽带关系研究进展. 中国农业资源与区划, 2020, 41(9): 172-181.
[15] 王雨, 王会肖, 杨雅雪, 李红芳. 水-能源-粮食纽带关系定量研究方法综述. 南水北调与水利科技: 中英文, 2020, 18(6): 42-63.
[16] Zhang C, Chen X X, Li Y, Ding W, Fu G T. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies. Journal of Cleaner Production, 2018, 195: 625-639.
[17] Gai D H B, Shittu E, Ethan Yang Y C, Li H Y. A comprehensive review of the nexus of food, energy, and water systems: what the models tell us. Journal of Water Resources Planning and Management, 2022, 148(6): 04022031.
[18] Srigiri S R, Dombrowsky I. Analysing the water-energy-food nexus from a polycentric governance perspective: conceptual and methodological framework. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 725116.
[19] Endo A, Yamada M, Miyashita Y, Sugimoto R, Ishii A, Nishijima J, Fujii M, Kato T, Hamamoto H, Kimura M, Kumazawa T, Qi J G. Dynamics of water-energy-food nexus methodology, methods, and tools. Current Opinion in Environmental Science & Health, 2020, 13: 46-60.
[20] Chen C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature. Journal of the American Society for Information Science and Technology, 2006, 57(3): 359-377.
[21] 陈悦, 陈超美, 刘则渊, 胡志刚, 王贤文. CiteSpace 知识图谱的方法论功能. 科学学研究, 2015, 33(2): 242-253.
[22] Nair S, George B, Malano H M, Arora M, Nawarathna B. Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: review of concepts, state-of-art and methods. Resources, Conservation and Recycling, 2014, 89: 1-10.
[23] Howells M, Hermann S, Welsch M, Bazilian M, Segerström R, Alfstad T, Gielen D, Rogner H, Fischer G, van Velthuizen H, Wiberg D, Young C, Roehrl R A, Mueller A, Steduto P, Ramma I. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. Nature Climate Change, 2013, 3: 621-626.
[24] Zhou Y C, Wei B, Zhang R, Li H. Evolution of water-energy-food-climate study: current status and future prospects. Journal of Water and Climate Change, 2022, 13(2): 463-481.
[25] Soleimanian E, Afshar A, Molajou A. A review on water simulation models for the WEF Nexus: development perspective. Environmental Science and Pollution Research International, 2022, 29(53): 79769-79785.
[26] 赵良仕, 刘思佳, 孙才志. 黄河流域水-能源-粮食安全系统的耦合协调发展研究. 水资源保护, 2021, 37(1): 69-78.
[27] 彭少明;郑小康;王煜;蒋桂芹; 黄河流域水资源-能源-粮食的协同优化. 水科学进展, 2017, 28(05): 681-690.
[28] 孙才志, 靳春玉, 郝帅. 黄河流域水资源-能源-粮食纽带关系研究. 人民黄河, 2020, 42(9): 101-106.
[29] Hurford A P, Harou J J. Balancing ecosystem services with energy and food security——Assessing trade-offs from reservoir operation and irrigation investments in Kenya′s Tana Basin. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(8): 3259-3277.
[30] Ravar Z, Zahraie B, Sharifinejad A, Gozini H, Jafari S.System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni basin in Iran[J].Ecological Indicators, 108:105682-105682.
[31] 刘凌燕, 王慧敏, 刘钢, 孙冬营, 方舟. 供需视角下水-能源-粮食系统风险的驱动机理与政策仿真——面向东北三省的系统动力学分析. 软科学, 2020, 34(12): 52-60.
[32] 林志慧, 刘宪锋, 陈瑛, 傅伯杰. 水-粮食-能源纽带关系研究进展与展望. 地理学报, 2021, 76(7): 1591-1604.
[33] 张宗勇, 刘俊国, 王凯, 田展, 赵丹丹. 水-粮食-能源关联系统述评: 文献计量及解析. 科学通报, 2020, 65(16): 1569-1581.
[34] 白景锋, 张海军. 中国水-能源-粮食压力时空变动及驱动力分析. 地理科学, 2018, 38(10): 1653-1660.
[35] 盖美, 翟羽茜. 中国水资源-能源-粮食-支撑系统安全测度及协调发展. 生态学报, 2021, 41(12): 4746-4756.
[36] Ringler C, Willenbockel D, Perez N, Rosegrant M, Zhu T J, Matthews N. Global linkages among energy, food and water: an economic assessment. Journal of Environmental Studies and Sciences, 2016, 6(1): 161-171.
[37] Ethan Yang Y C, Ringler C, Brown C, Mondal M A H. Modeling the agricultural water-energy-food nexus in the Indus River Basin, Pakistan. Journal of Water Resources Planning and Management, 2016, 142(12): 04016062.
[38] Amjath-Babu T S, Sharma B, Brouwer R, Rasul G, Wahid S M, Neupane N, Bhattarai U, Sieber S. Integrated modelling of the impacts of hydropower projects on the water-food-energy nexus in a transboundary Himalayan River Basin. Applied Energy, 2019, 239: 494-503.
[39] Fabien M, Lei S, Ayman E, Kgosietsile V, Hubert H. Tracing attribute and scope of research and applied projects in Africa′s water energy food nexus implementation: a review. Environmental Science and Policy, 2022, 136: 33-45.
[40] Dong Q J, Zhang X, Chen Y L, Fang D B. Dynamic management of a water resources-socioeconomic-environmental system based on feedbacks using system dynamics. Water Resources Management, 2019, 33(6): 2093-2108.
[41] Liang S, Qu S, Zhao Q T, Zhang X L, Daigger G T, Newell J P, Miller S A, Johnson J X, Love N G, Zhang L X, Yang Z F, Xu M. Quantifying the urban food-energy-water nexus: the case of the Detroit metropolitan area. Environmental Science & Technology, 2019, 53(2): 779-788.
[42] Jones J L, White D D. Understanding barriers to collaborative governance for the food-energy-water nexus: the case of Phoenix, Arizona. Environmental Science & Policy, 2022, 127: 111-119.
[43] Hussien W A, Memon F A, Savic D A. An integrated model to evaluate water-energy-food nexus at a household scale. Environmental Modelling & Software, 2017, 93(C): 366-380.
[44] Al-Ansari T, Korre A, Nie Z, Shah N. Integration of greenhouse gas control technologies within the energy, water and food nexus to enhance the

environmental performance of food production systems.Journal of Cleaner Production, 2017, 162:1592-1606.

[45] Niva V, Cai J L, Taka M, Kummu M, Varis O. China's sustainable water-energy-food nexus by 2030: impacts of urbanization on sectoral water demand. Journal of Cleaner Production, 2020, 251: 119755.

[46] Zhang P P, Zhang L X, Chang Y, Xu M, Hao Y, Liang S, Liu G Y, Yang Z F, Wang C. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review. Resources, Conservation and Recycling, 2019, 142: 215-224.

[47] Wicaksono A, Kang D. Nationwide simulation of water, energy, and food nexus: case study in South Korea and Indonesia. Journal of Hydro-Environment Research, 2019, 22: 70-87.

[48] Namany S, Govindan R, Alfagih L, McKay G, Al-Ansari T. Sustainable food security decision-making: an agent-based modelling approach. Journal of Cleaner Production, 2020, 255: 120296.

[49] 孙才志, 郝帅, 赵良仕. 中国水资源-能源-粮食纽带系统效率时空分异特征. 水资源保护, 2021, 37(1): 61-68, 78.

[50] 张力小, 张鹏鹏, 郝岩, 唐守娟, 刘耕源. 城市食物-能源-水关联关系: 概念框架与研究展望. 生态学报, 2019, 39(4): 1144-1153.

[51] 赵勇, 常奂宇, 桑学锋, 何国华, 王庆明, 姜珊. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究Ⅱ: 应用. 水利学报, 2022, 53(10): 1251-1261.

[52] 常奂宇, 赵勇, 桑学锋, 李海红, 何凡, 翟家齐. 京津冀水资源-粮食-能源-生态协同调控研究Ⅰ: 方法与模型. 水利学报, 2022, 53(6): 655-665.

[53] Taguta C, Senzanje A, Kiala Z, Malota M, Mabhaudhi T. Water-energy-food nexus tools in theory and practice: a systematic review. Frontiers in Water, 2022, 4: 837316.

[54] Martinez-Hernandez E, Leach M, Yang A D. Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym. Applied Energy, 2017, 206: 1009-1021.

[55] Zhang X D, Vesselinov V V. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food security nexus. Advances in Water Resources, 2017, 101: 1-10.

[56] Daher B T, Mohtar R H. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: guiding integrative resource planning and decision-making. Water International, 2015, 40(5/6): 748-771.

[57] Karnib A. Bridging science and policy in water-energy-food nexus: using the Q-nexus model for informing policy making. Water Resources Management, 2018, 32(15): 4895-4909.

[58] Giampietro M. An innovative accounting framework for the food-energy-water nexus: application of the MuSIASEM approach to three case studies..

[59] Khan H F, Yang Y C E, Xie H, Ringler C. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins. Hydrology and Earth System Sciences, 2017, 21(12): 6275-6288.

[60] Kraucunas I, Clarke L, Dirks J, Hathaway J, Hejazi M, Hibbard K, Huang M Y, Jin C L, Kintner-Meyer M, van Dam K K, Leung R, Li H Y, Moss R, Peterson M, Rice J, Scott M, Thomson A, Voisin N, West T. Investigating the nexus of climate, energy, water, and land at decision-relevant scales: the Platform for Regional Integrated Modeling and Analysis (PRIMA). Climatic Change, 2015, 129(3): 573-588.

[61] Ioannou A E, Laspidou C S. Resilience analysis framework for a water-energy-food nexus system under climate change. Frontiers in Environmental Science, 2022, 10: 820125.

[62] Núez-López JM, Rubio-Castro E, Ponce-Ortega J M. Involving resilience in optimizing the water-energy-food nexus at macroscopic level. Process Safety and Environmental Protection, 2021, 147: 259-273.

[63] Schlör H, Venghaus S, Hake J F. The FEW-Nexus city index-Measuring urban resilience. Applied Energy, 2018, 210: 382-392.

[64] Bieber N, Ker J H, Wang X N, Triantafyllidis C, van Dam K H, Koppelaar R H E M, Shah N. Sustainable planning of the energy-water-food nexus using decision making tools. Energy Policy, 2018, 113: 584-607.

[65] de Amorim W S, Valduga I B, Ribeiro J M P, Guazzelli Williamson V, Krauser G E, Magtoto M K, de Andrade Guerra J B S O. The nexus between water, energy, and food in the context of the global risks: an analysis of the interactions between food, water, and energy security. Environmental Impact Assessment Review, 2018, 72: 1-11.

[66] Bazilian M, Rogner H, Howells M, Hermann S, Arent D, Gielen D, Steduto P, Mueller A, Komor P, Tol R S J, Yumkella K K. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach. Energy Policy, 2011, 39(12): 7896-7906.

[67] Simpson G B, Jewitt G P W, Becker W, Badenhorst J, Masia S, Neves A R, Rovira P, Pascual V. The water-energy-food nexus index: a tool to support integrated resource planning, management and security. Frontiers in Water, 2022, 4: 825854.

[68] David L O, Nwulu N I, Aigbavboa C O, Adepoju O O. Integrating fourth industrial revolution (4IR) technologies into the water, energy & food nexus for sustainable security: a bibliometric analysis. Journal of Cleaner Production, 2022, 363: 132522.