科学通报 2020 年 第 65 卷 第 16 期: 1569 ~ 1580
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

水-粮食-能源关联系统述评: 文献计量及解析

张宗勇[1,2], 刘俊国[1*], 王凯[1], 田展[1], 赵丹丹[1,3]

1. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055;
2. Water Security Research Centre, School of International Development, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK;
3. Water & Development Research Group, Department of Built Environment, Aalto University, Espoo 00076, Finland

* 联系人, E-mail: junguo.liu@gmail.com, liujg@sustech.edu.cn

2020-02-05 收稿, 2020-03-13 修回, 2020-03-14 接受, 2020-03-16 网络版发表
中美国际合作网络IRCN项目(51711520317)、国家杰出青年科学基金(41625001)和南方科技大学高水平专项经费(G02296302, G02296402)资助

摘要 水、粮食和能源安全是联合国2030可持续发展议程的核心内容. 世界范围内水资源短缺、能源短缺和粮食不足导致区域冲突加剧, 因此需要重新审视水、粮食和能源安全及内在关联. 以往研究大多关注单一独立要素, 或在水、粮食和能源中的两元素之间建立二元局部联结, 缺乏将三者作为一个系统的研究. 本文通过对1995~2018年长时序中水-粮食-能源关联系统进行文献计量分析, 应用引文空间(CiteSpace)技术, 梳理水-粮食-能源关联系统的研究历史与现状, 为形成三元协同管理策略提供理论依据和决策支撑. 分析发现: 系统关联受到国际社会的普遍关注, 其中水要素的研究社群相对活跃. 2010~2016年间的研究体现出日益加强的多领域交叉特点. 在区分目前文献中"强关联"与"弱关联"的基础上, 阐明水、粮食、能源作为彼此的投入与产出要素, 相互之间存在密切关联并形成了跨越部门和区域的级联效应; 水、粮食和能源3个资源要素构成一个整体的系统, 即水-粮食-能源命运共同体. 未来仍需针对关联系统的边界、影响因素和生态环境效应等建立研究框架, 探讨多要素耦合驱动机制. 采用"合奏式"的思路, 可以克服现有的单一部门资源管理模式, 突破不同部门相互割裂的局限, 有利于协调不同自然资源, 增加协同效应, 提高系统效率.

关键词 水资源, 粮食, 能源, 跨部门管理, 关联系统

联合国可持续发展目标期望到2030年消除饥饿、获取现代化能源和洁净且低成本的饮用水[1], 然而当前世界范围内由于水资源短缺、能源短缺和粮食不足所造成的冲突却日趋强烈. 在供给能力一定的情况下, 全球大部分粮食生产都高度依赖水资源和能源, 能源生产对水资源的需求也持续增加[2]. 例如在美国火力发电厂和核电站的取水量占全国45%[3], 过度用水导致很多河流和湿地萎缩甚至消失[4]. 在西班牙和巴西等国家, 大规模的生物质能源替代化石能源, 导致灌溉用水激增甚至超出本地资源承载能力[5,6]. 中国作为全球灌溉面积最大的国家, 其农业用水占63%[7]. 然而, 随着地下水资源日益匮乏, 农民需要消耗更多的能源, 才能从更深的含水层中取水, 使得水、粮食和能源之间的冲突愈来愈突出. 这种冲突倒逼人类重新审视水、粮食和能源安全及内在关联, 驱动了三元要素关联研究的发展.

以往研究大多考察单一独立要素, 或在水、粮食和能源中的两元素之间建立二元的局部联结[6,8,9], 缺乏将三者作为一个系统的研究. 直到2011年, 德国伯恩召开的水-能源-粮食安全联盟会议, 首次用"Nexus"一词

引用格式: 张宗勇, 刘俊国, 王凯, 等. 水-粮食-能源关联系统述评: 文献计量及解析. 科学通报, 2020, 65: 1569–1580
Zhang Z Y, Liu J G, Wang K, et al. A review and discussion on the water-food-energy nexus: Bibliometric analysis (in Chinese). Chin Sci Bull, 2020, 65: 1569–1580, doi: 10.1360/TB-2020-0105

© 2020《中国科学》杂志社

表述水-粮食-能源关联系统, 超越了单一要素效率研究而成为新的范式. 根据柯林斯词典, Nexus的含义为“从无到有的联结”[10]. 目前中文文献中较常见的翻译包括系统关联[11~13]、纽带关系[14~16]、轴心关系(世界粮农组织中文官网)、耦合联系(往往侧重定量的模型应用)[17]. 自伯恩会议后对于关联系统的研究迅速增长. 为增进科学理解、帮助形成三元的协同管理策略并支撑制定相关政策, 本文对1995~2018年长时间序列下水-粮食-能源关联系统进行文献计量分析, 对三元关联的内涵、影响因素和耦合方法进行文献回顾. 在此基础上初步探讨关联系统未来的重点研究方向.

1 水-粮食-能源关联系统文献计量

参考张灿灿和孙才志[18]及Guan等人[19]的方法, 在Web of Science以检索式“Water and Food and Energy and Nexus”对研究主题进行检索、剔除无关论文后(剔除仅为两两关联的外文文献), 得到625篇聚焦三要素关联系统(WFE)的论文. 为了对比, 本文检索了Water and Energy(不含and Nexus)等, 将其结果同时报告在表1(右列). 但是我们发现它们与主题的相关性较差, 因为多数文献仅仅是在针对单一独立要素问题的讨论部分, 提及其他的两个要素. 我们认为这些文献并非指代“关联系统”, 无法形成三元的协同管理策略. 因此未作为本文的目标文献.

应用引文空间(CiteSpace)技术进行结果可视化[20](图1~3), 图1显示发文数量最多的机构及相互联系. 该领域最具生产力的机构分别是德克萨斯农工大学(Texas A&M Univ, 24篇)、牛津大学(Univ Oxford, 16)、埃克塞特大学(Univ Exeter, 12)、国际食品政策研究所(Int Food Policy Res Inst, 12)、利兹大学(Univ

表 1 不同检索式的文献数量(截至2019年3月26日)[a)]

Table 1 Number of papers based on different search logics (before 26th March, 2019)

检索式	文献数量	检索式	文献数量
Water and Energy and Nexus	1418	Water and Energy	269732
Water and Food and Nexus	711	Water and Food	108705
Food and Energy and Nexus	684	Food and Energy	71845
Water and Food and Energy and Nexus	625	Water and Food and Energy	12539

a) 对于逻辑算符“and”(与), 检索词之间的顺序不影响检索结果

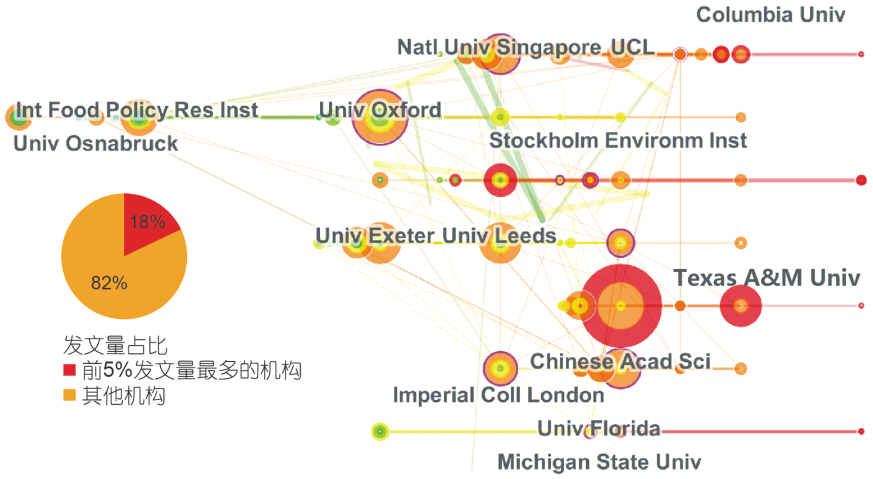


图 1 1995~2018年水-粮食-能源英文文献发文机构图谱. 节点的圆环越宽越红反映机构的发文量越多; 两个节点之间连线粗细表示彼此合作发文密切程度, 位于中心的机构其合作网络更广泛; 连线的颜色越红代表其中单个机构发文贡献越多, 颜色越绿代表其中单个机构发文贡献较少; 为清晰美观删去了数量少的节点名称

Figure 1 A map for institutions of water-food-energy nexus publications in English from 1995 to 2018. The broader and more-red a ring was, the more papers an institution published. The thickness of lines indicates the number of co-author publications between the two institutions. Central institutions had widespread cooperation. The more-red lines indicated the more contributions from one of its co-author institutions, while the more-green indicated the fewer. Note that, labels of the institutions that had only a few publications were not shown for clarity

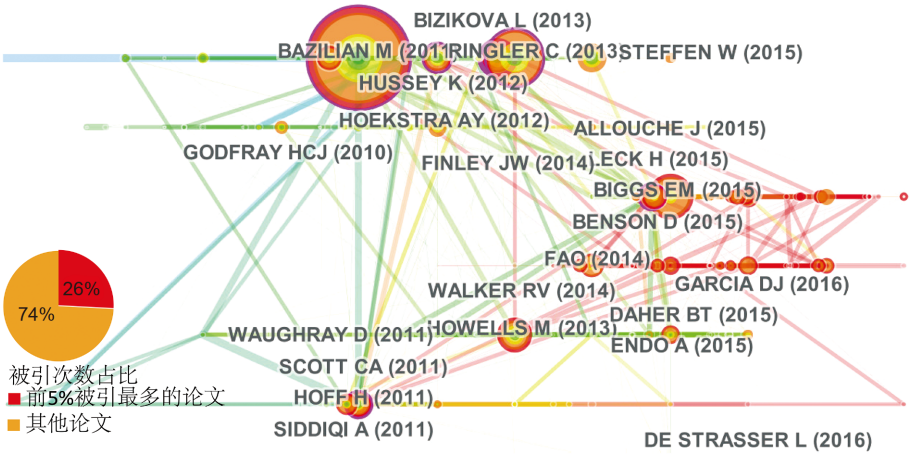


图 2 1995~2018年水-粮食-能源英文被引文献图谱. 括号内数字代表年份; 节点大小反映被引频次; 两个节点之间连线粗细表示彼此引用的多少及相关度

Figure 2 A map for cited papers of water-food-energy nexus in English from 1995 to 2018. Numbers in the parentheses stand for the year of publication. The size of a node indicates the number of citations. The thickness of links between two nodes represents the number of citations (i.e., relevancy between the two nodes)

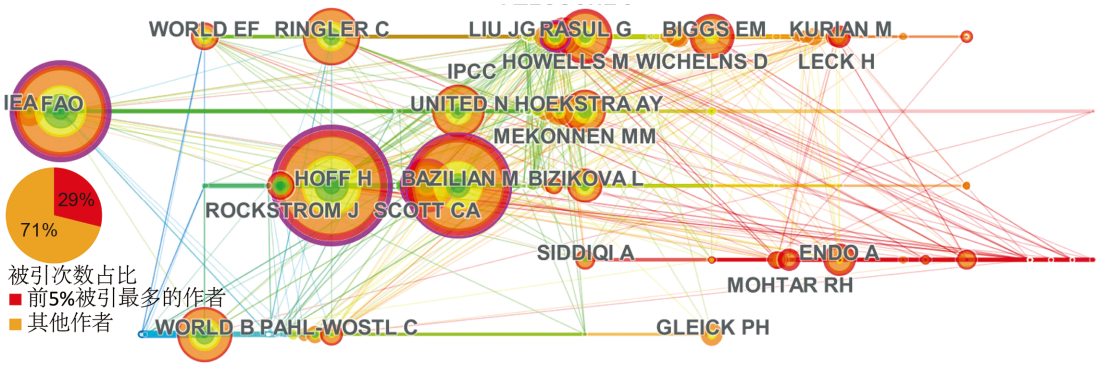


图 3 1995~2018年水-粮食-能源英文被引作者(机构)图谱. 节点大小反映被引用量

Figure 3 A map of authors (or institutions) for cited publications in English from 1995 to 2018. The size of nodes indicates the number of citations

Leeds, 12)、中国科学院(Chinese Acad Sci, 11)和新加坡国立大学(Natl Univ Singapore, 11)等. 左下角饼图表示, 发文最多的前5%机构的发文数量占全部发文量的18%, 图谱呈现明显的离散状态, 说明发文数量分布比较分散, 机构间发文数量相对均匀、差别不显著.

图2显示高被引文献及相关度. 31376篇被引文献集中分布于近15年(2004~2018年). 高被引文献包括: (1) Bazilian等人[21]构建了CLEWs模型框架来研究WFE的权衡取舍和冲突协调, 识别关联系统的典型影响因素, 并倡导城镇WFE研究; (2) Ringler等人[22]提出跨部门效率模型(WELF), 同时考虑关联系统的生态环境影响; (3) Biggs等人[23]强调"关联系统-生计"框架(Nexus-livelihood framework)和环境生计安全. 排名前5%的文献的被引用次数占所有引用量的26%, 同时图谱状态介于离散与团聚之间, 说明被引频次分布介于集中与分散之间. 图3显示该领域最有影响力的研究人员, 前三名分别是Hoff Holger(189次)、Bazilian Morgan(169次)和Ringler Claudia(103次). 例如, 瑞典皇家理工学院的Bazilian Morgan被包括FAO、IIASA和SEI等在内的众多机构的作者引用. 排名前5%的作者被引用次数占所有引用量的29%, 同时图谱呈现团聚状态, 说明作者被引频次分布比较集中. 整体上看, 该领域发文数量分布较分散, 说明水-粮食-能源关联系统作为资源环境领域的研究热点现已比较普遍; 而被引频次分布较集中, 可能是由于该领域高水平研究成果一定程度上需要做到广度和深度兼备.

我们发现水-能源关联(Water and Energy and Nexus)研究出现较早; 水-粮食关联(Water and Food and Nexus)与能源-粮食关联(Energy and Food and Nexus)研究出现相对较晚; 涵盖三者的关联系统在其后出现. 根据四类研究的数量变化可以划分为3个时期(图4(a)): 2011年之前相关研究都较少, 处于研究的萌芽阶段; 2011~2014年为初期发展阶段; 2014年至今快速发展. 水-能源关联研究每年发文数量均最多. 三元关联数量均小于二元联结数量.

关联研究载文期刊的前三位分别是*Water*、*Environ Sci Policy*和*Sci Total Environ*(图4(c)). 这些期刊涵盖了水资源和环境等多个领域, 说明系统关联得到国际社会的普遍关注. 值得注意的是载文期刊中水领域期刊比较多: 位列前10的英文刊物有3个刊(*Water*、*Water Int*和*Int J Water Resour Dev*), 位列前10的中文期刊中有5个刊(表S1). 说明水要素的研究社群相对活跃. 2011年,伯恩会议提出的关联系统框架也认为“可用水量”是关联系统的核心要素[24]. 原因可能是粮食生产、能源供应等对水资源的依赖表现得更为突出[16], 使得水资源需求迫切、供给紧张. 特别是, 由于暂时没有可以替代水的资源或要素, 面对未来人口数量增长、生活条件愈发富足, 能源和粮食生产对水资源的使用和依赖也变得愈来愈具有竞争性[25], 也使得水要素成为了水-粮食-能源关联系统的主要动因. 同时, 粮食和能源的研究视角也值得注意. 《亚太地区水-粮食-能源关联系统报告(2013)》[26]及联合国粮农组织是从保障粮食安全和农业可持续发展的角度阐述关联系统[27]. 也有研究指出能源要素是保障水-粮食-能源可持续发展的突破口[28]. 在国别方面, 美国、英国、德国分别位列发文国家(地区)的前三位, 其中美国291篇尤其突出(图4(d)). 不同国家在该领域发文数量差别较大, 原因可能是不同国家对该领域的关注度及相应投入的科研实力存在差异.

近5年发表数量平均增速为70%(2014~2018年). 在2011和2015年增长显著、2018年增长较快. 不同年份发表数量的增长波动很大(图4(b)), 说明关联研究尚未发展成一个稳定而独立的学科, 仍有较大不确定性. 该领域被引最多的前10篇论文有3篇来源于专刊, 说明少数专刊或者研究团队推动了该领域研究的发展. 例如, 2011年伯恩会议奠定了关联系统研究的基础. 2015年

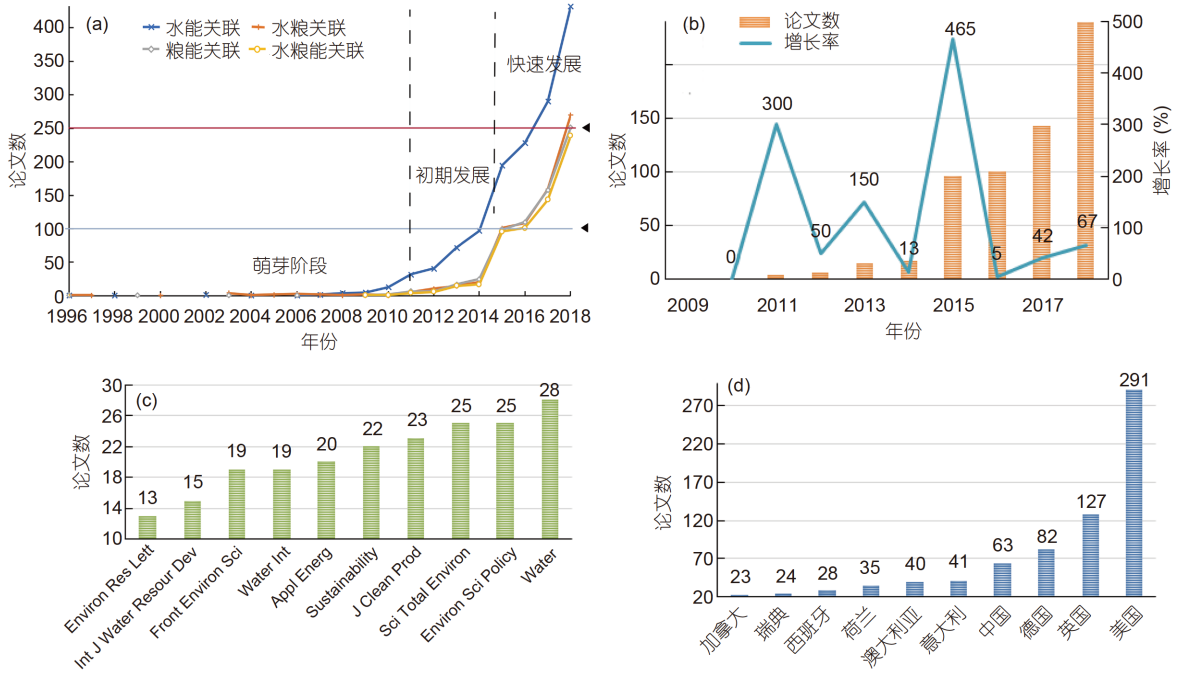


图 4 水-粮食-能源关联系统研究文献统计. (a) 1996~2018年二元与三元研究文献数; (b) 2009~2018年论文数(左轴)及其增长率(右轴); (c) 载文数量前10的英文期刊发文量; (d) 发表数量前10的国家(地区)发文量

Figure 4 Statistics for publications on water-food-energy nexus research. (a) The number of publications of dual and ternary nexus research in 1996–2018; (b) the number of publications (left) and their growth rates (right) from 2009 to 2018; (c) the number of publications from top-10 English journals ranked by the number of publications; (d) the number of publications from top-10 countries (regions) ranked by the number of publications

联合国提出“2030可持续发展目标”，核心内容之一便是水-粮食-能源关联系统. 在其影响下相关研究迅速增长: *Water*专刊“亚洲大河流域水-能源-粮食系统关联”针对跨界流域探讨关联系统方法在灌溉系统管理和可持续发展方面的作用. *Water Int*专刊侧重不同尺度的管理实践. 2016年9月美国科学基金会资助水-粮食-能源关联系统研究. 中国国家自然科学基金委员会与美国科学基金会在2017~2020年也发布食品-能源-水关联系统合作研究项目指南，强调突破单资源要素研究的局限性，应用耦合关系方法，增强资源整合与协同分析. *Appl Energy*先后于2016和2018年组织专刊[29]探讨耦合方法的趋势，分析在未来粮食和水资源约束下的清洁能源技术发展[30]，并重点讨论水-粮食-能源耦合研究对于可持续发展的重要作用[29]. 2018年，*Sust Cities Soc*组织了“系统关联协同与权衡”专刊.

从2010~2016年的发文量可以看出，关联系统研究体现出愈来愈强的多领域交叉特点(图5)，打破学科之间的藩篱，是认识关联系统的必要条件[24]. 作为多领域交叉研究点，从2010~2016年每两年涉及的Web of Science的学科分类数分别为2、7、22、25个，并且多数学科发文数量持续增加. 如2016年集成了包括环境科学、水资源、能源燃料、绿色可持续技术、环境工程和土木工程的知识，也涉及生态、社会和经济等多个学科. 可以看出关联系统的研究不仅经历了多学科的交叉，而且作为多领域的前沿也更加频繁地交融.

2 水-粮食-能源关联系统文献回顾

2.1 内涵及影响因素

随着全球人口不断增长，预计到2050年水、粮食、能源消费分别增长55%、60%和80%[30~32]，如何满足消费需求是各个国家面临的严峻挑战. 世界经济论坛《全球风险评估报告》也多次强调水、粮食和能源安全风险[33,34]，其中缺乏综合考虑三者之间关联的管理策略是重要挑战之一[35]. 因此研究水-粮食-能源系统关联、形成协同管理策略，成为联合国2030可持续发展议程的核心内容.

水、粮食和能源作为支撑经济、社会和环境可持续发展的主要资源要素，三者之间存在密切的经济和技术关联. 农业是全球用水大户，占世界总用水量的70%[36]，其次为能源生产，占总用水量的15%[37]. 反过来，粮食生产大约占全球能源利用的30%[38]，而取水、

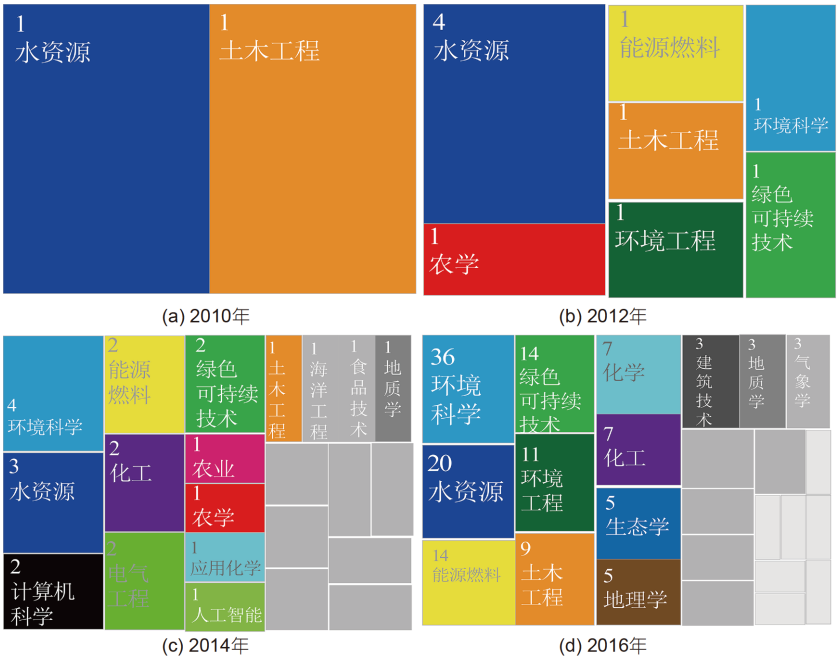


图 5 水-粮食-能源关联系统研究的学科及发文量. 不同颜色代表不同学科分类，数字代表该学科发文数量，面积大小表示当年发文数量所占比例的大小; 为了清晰美观, 删去了数量少的学科名, 而仅以颜色代表

Figure 5 Disciplines of water-food-energy nexus research. Different colors indicate different disciplines. The number stands for the quantity of publications. Size represents the publication share of discipline in the annual total number. Note that, the labels of disciplines with only a few publications were only shown with colors for clarity

输水和污水处理则占全球能源利用的8%[27]. 传统的资源要素管理往往局限于单个部门, 仅关注单一资源要素的利用效率, Daher和Mohtar[35]将其称为“独奏曲”. 然而在三大部门间, 一个部门的变化将会影响关联系统, 导致一系列不可预期的影响. 例如, 中国的节水政策在降低热电厂的用水量的同时, 也可能会提高能源消费量. 能源税的政策也会有助于实现“三条红线”的节水约束[39]. 因此拘泥于单个部门则割裂相互联系. 目前, 仍需要一个集成3个要素的系统框架, 以完善相互之间协同管理的理论与实证研究, 从而保障该整体系统的可持续发展[40]. 在二元局部要素之间的联结(即水-能源、水-粮食、能源-粮食)基础上(表2), 三元耦合的关联系统需要得到进一步发展.

探讨关联系统的概念框架及核心内涵, 研究如何减少冲突、增加协同效应, 近年来成为水-粮食-能源关联系统领域的主要研究方向[63]. 2014年, IPCC报告将其定义为一种旨在系统地管理水、粮食和能源等要素的思维和方法[64], 此后的研究也指出了关联系统的基本原则[65]. 中文则使用“牵一发而动全身”来描述关联系统[14]. “未来地球计划”(2014~2023年)专门成立了相关知识行动网络, 提出重点关注关联系统的跨区域影响. 例如欧洲鼓励生物能源消费可能会通过土地利用变化、农业水需求等危害世界其他地区的粮食与水安全, 形成全球跨部门级联效应. 需要规避跨越区域和部门的级联型风险, 加强综合性耦合研究[66]. 目前文献基本分为“强关联”与“弱关联”两种(表3).

气候变化和国际贸易是关联系统最重要的影响因素[60,70]. 自2011年, 联合国和斯德哥尔摩国际环境研究所等就强调将生态环境影响因素纳入关联思维[24]. 第39届世界经济论坛提出两个彼此依存的“子关联”, 即“水-粮食-贸易”和“能源-气候变化”. 图6表达了气候变化、国际贸易对关联系统影响及其传导. 工农业等生产用水和能源消耗通过全球粮食供应链和能源供应链的传导引发了环境污染和气候变化[71]. 在气候变化背景下, 水、粮食和能源通过生产、分配、消费、浪费和废物处理等环节不断关联. 图6中描述了代表性的12个影响因素, 包括生物燃料、水电生产、集约型农业、可利用水资源量和生态系统服务功能等, 他们互相约束、此消彼长, 产生连锁反应[72~74]. 在气候变化和国际贸易影响下, 这种命运共同体式的耦合联系越来

表 2 二元局部联结的文献要点

Table 2 A summary for key points of dual-interaction research

二元关联	研究内容要点
水粮关联	定性研究主要探讨食品消费与水资源稀缺、粮食生产与水污染关系[41,42]
	定量研究主要探讨生产用水量(或水文灾害)和粮食产出的关系[43~45]. (1) 利用模型[46~48]在全球尺度[49,50]和区域尺度[51,52]模拟作物产出和灌溉用水量的关系; (2) 虚拟水和水足迹[53,54]
水能关联	与能源生产和供给相关的水资源问题, 研究如何提高能源系统水资源利用效率[55~57]
	与水的生产和供应相关的能源消费, 强调因供给水而产生的能源消耗[58,59]
粮能关联	集中在生物质能源[60~62]
	建模分析欧洲和非洲国家的发电厂、土地和农机数据

表 3 “强关联”与“弱关联”对比

Table 3 A comparison between strong and weak interlinkages

内容	强关联	弱关联
内涵	任何一个要素变化直接对其他要素产生的影响	并列地将水、粮食和能源放在同一框架下进行分析和对比
举例	关注与能源生产和供给直接相关的水资源(粮食)问题, 研究如何提高能源系统的水资源(粮食)利用效率[55]; 或者关注与水的生产和供应直接相关的能源(粮食)消费问题[67], 强调因供水而产生的能源(粮食)消耗	发现在资源税的政策下, 中国水能政策相互之间存在溢出效应. 节水政策在降低热电厂的用水量的同时, 也会提高能源消费量. 能源税的政策也会有助于实现“三条红线”的节水约束[39]
常见方法	系统动力学的仿真等方法、其他模型构建等[28,35]	投入产出分析[25]、可计算一般均衡模型、生命循环周期和代理人基模型等[68]
研究意义	可以回答如何采取适合本地区资源禀赋的技术方案来解决不同要素之间的冲突[69], 从而缓解各自资源稀缺[56]	在三大部门间, 一个部门的变化将会影响关联系统, 导致一系列不可预期的影响

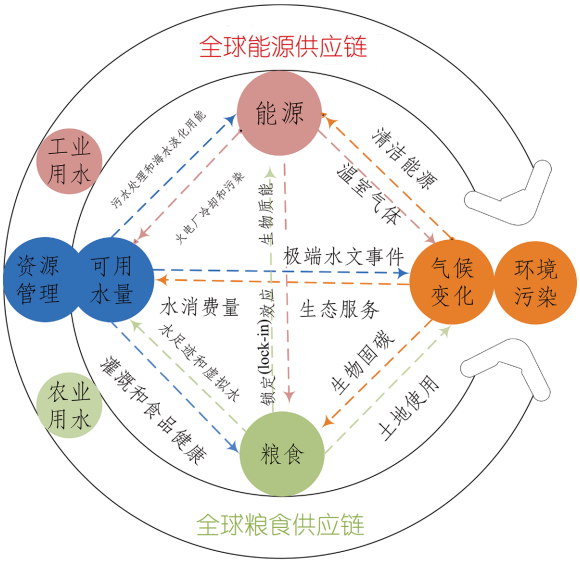


图 6 气候变化和国际贸易对关联系统影响及传导示意图
Figure 6 A schematic diagram for the impacts of climate change and international trade on nexus

越清晰地表现出来[75,76]，相互间的统筹协调任务也更加艰巨，需要各国予以重视.

总体来看，目前三元关联研究的理论和实证基础仍然比较薄弱，亟须建立针对关联系统的边界、影响因素和生态环境效应的研究框架或理论共识，提高系统效率. 基于对现有文献的归纳，我们认为水、粮食、能源作为彼此的投入与产出要素，相互之间存在的密切经济和技术关联，形成了跨越部门和区域的级联效应，是一个整体的系统，即水-粮食-能源命运共同体. 关联系统代表的是全新的可持续安全观念，超越了传统的环境资源(甚至国际冲突)的因果关系，而强调多种资源安全的多重因果联系[16]，有助于形成“合奏式”的资源管理思路和权衡式框架，克服原有的单一部门管理资源、不同部门相互割裂的局限，实现资源管理思路创新.

2.2 耦合方法

侧重定量模型的耦合系统研究已经起步. 该类模型基于三种要素的可获得性，通过开发综合的软件工具、模型平台等[65]，服务于自然资源管理. 在耦合系统定量模拟方面，美国、瑞士等国家的研究相对丰富. 这些国家的研究涵盖了耦合系统的概念框架和决策工具，尤其是5个团队研究成果较多(表4). 此外，自2010年以来，针对单一国家(地区)并采取系统动力学方法的研究也迅速发展，如在卡塔尔[35]和中国[28]等通过仿真建模对自然资源进行需求分析. 水-粮食-能源领域的中文研究成果多数也侧重模型应用层面，但数量仍然较少且均出现在近4年(表S1). 主题分为: (1) 资源供需协同模型体系的构建，以在系统内部实现平衡、良性互动循环; (2) 关联系统的生态环境影响，如污染等外部性研究; (3) 关联系统风险表征及管控等. 总体上该领域文献研究的尺度也经历了由全球到不同区域(包含典型的国别研究)、再到流域、省和城镇的变化.

目前来看，这些模型的假设仍然有较多局限，如粮食仅限农作物，而不包含肉类、奶制品等加工食品; 3个要素之间“线性的、静态的”互动关系的设定比较简

表 4 水-粮食-能源的量化模型汇总
Table 4 A summary for quantitative models of water-food-energy nexus

序号	研究团队	研究目的	主要贡献与特色	文献或网站
1	FAO	建立明确具体的监管指标，形成核算框架(WEF Framework)	分析能源生产和粮食产出数据，同时模拟三种要素的流动. 提出系统关联评价方法	Giampietro[77]、FAO[27]和IRENA[32]
2	Bazilian团队	构建气候-土地-能源-水模型(CLEWs)	综合LEAP/WEAP/AEZ等多学科模型进行系统研究	Bazilian等人[21]或https://www.kth.se/en/itm/inst/energiteknik/forskning/desa/researcharеas/clews-climate-land-energy-and-water-strategies-to-navigate-the-nexus-1.432255
3	美国RAND公司	构建评价水-粮食-能源系统安全系数的指标(WEF Interactive Index)	应用在166个国家，初步掌握本地三要素的可利用数量	Willis等人[78]或https://www.prgs.edu/pardee-initiative/food-energy-water/interactive-index.html
4	Mohtar团队	开发多尺度的模型WEF Nexus Tool 2.0	研究如何采用耦合系统的方法服务于决策	Daher和Mohtar[35]、Mohtar和Lawford[34]
5	IIASA	构建ISWEL优化印度和中国澜沧江等研究区内商品生产	线性优化模型，以总系统成本为目标函数作为协同管理的决策工具	Wada[79]或http://www.iiasa.ac.at/web/home/research/iswel/ISWEL.html

单; 最终的决策系数很大程度依赖于模型过程中间的“专家评分”, 难免地增加主观性; 模拟结果可能与某一种生产要素(如土地)的投入量高度相关, 而对其他要素不敏感, 一定程度上降低了结果的实用性. 这些局限的可能原因是三要素耦合的基础数据仍比较缺乏. 信息缺口限制了投入产出分析、可计算一般均衡模型、生命循环周期和代理人基模型等方法的应用[25,60,80], 有待进一步补充.

总之, 水-粮食-能源三元耦合的定量关系的模型和决策支持工具仍然欠缺, 对于耦合驱动机制和过程机理的认识仍存在很大的不确定性. 耦合方法的研究有望成为未来水-粮食-能源关联系统领域的研究前沿和主要方向.

3 水-粮食-能源关联系统未来研究方向

水-粮食-能源是支撑经济、社会和环境可持续发展的重要资源要素系统. 实现三种资源权衡式管理、提高系统资源利用效率是重要而紧急的科学问题. 未来该领域的主要研究方向包括但不限于以下三方面:

第一, 研究内容方面应建立针对系统边界、影响因素和生态环境效应的研究框架或理论基础. 在自然-经济复合背景下探索关联耦合的演变规律, 探讨如何在满足不断增长的水、粮食和能源需求的同时, 保持环境安全与生态系统的服务功能, 分析系统内动态调控与反馈等.

未来研究尤其需要解决当前仍然模糊的系统边界问题. 考虑到关联系统的地理错配性(不同地理位置和空间的水、粮食和能源资源禀赋差异显著), 使地理边界难以确定. 更主要的困难在于, 由于三要素密切相关、知识交叉融合性强, 使得当前研究并不限于某种单一特定的资源要素种类, 所涉及的各要素、各个组成部分之间的关联形式多样而复杂[2], 已形成了无法忽视的、跨越部门和地区的级联效应, 暂时难以划分具体而明确的范畴、有形或无形的分割界线, 仍然有待未来研究进一步探索厘清.

第二, 在研究方法方面需要开发针对关联系统的应用工具, 以服务于资源要素的权衡式管理, 推动方法体系的创新. 丰富耦合系统的模型技术与方法[81], 需要进一步补充三要素耦合的基础数据等信息缺口(如本地三要素的可利用数量), 以减少应用建模方法的限制. 此外可考虑建立不同农业灌溉方式耗能的数据库等; 也可以尝试构建新的资源评价指标(体系), 从行业或地区维度考察综合的水-粮食-能源消费的效率指标, 如单位能源消耗的用水量或单位用水量的能源消费; 或探讨作为一个特定概念的“三部门间的水资源稀缺风险”, 来体现耦合系统效率或依赖程度; 利用博弈论等方法从微观层面研究不同部门目标和收益的均衡.

第三, 在研究尺度方面, 需要开展城镇的水-粮食-能源关联系统的分析. 城镇作为未来资源消耗中心和越来越多人的“非正式定居点”, 不同城镇的水-粮食-能源管理水平及实践需求不同, 不同的能源和粮食供应链中也形成了不同的治理结构, 有必要在城镇尺度开展不同区域之间的对比分析[82]. 在城市决策方面加强跨部门的协同, 例如在能源政策中兼顾水资源治理的影响, 防止顾此失彼. 协调政策制定者、非政府组织、教育从业者、研究学者和小微企业等之间的关系[83]. 从城镇尺度的机制设计方面, 某些政策可能达到“一石三鸟”的效果: 如减除农药的过量使用, 可以减少水体中重金属和有毒有机物污染、提高粮食品质、降低能源消耗等.

致谢 感谢荷兰格罗宁根大学能源与环境科学研究中心的王丹女士对提高本文质量的帮助.

参考文献

1 Griggs D, Stafford-Smith M, Gaffney O, et al. Sustainable development goals for people and planet. Nature, 2013, 495: 305–307
2 Romero-Lankao P, McPhearson T, Davidson D J. The food-energy-water nexus and urban complexity. Nat Clim Chang, 2017, 7: 233–235
3 Maupin M A, Kenny J F, Hutson S S, et al. Estimated Use of Water in the United States in 2010. US Geological Survey, Reston, Virginia, 2014
4 Mazdiyasni O, AghaKouchak A. Recognize anthropogenic drought. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: 1–6
5 King C W, Holman A S, Webber M E. Thirst for energy. Nat Geosci, 2008, 1: 283–286
6 Hardy L, Garrido A, Juana L. Evaluation of Spain’s water-energy nexus. Int J Water Resour Dev, 2012, 28: 37–41
7 Liu J, Zang C, Tian S, et al. Water conservancy projects in China: Achievements, challenges and way forward. Glob Environ Change, 2013, 23: 633–643
8 Siddiqi A, Anadon L D. The water-energy nexus in Middle East and North Africa. Energy Policy, 2011, 39: 4529–4540

9 Li J, Shao M A, Zhang X C. Simulation of water potential productivity of winter wheat and soil water dynamics on rainfed highland of the Loess Plateau (in Chinese). J Nat Resour, 2004, 19: 738–746 [李军, 邵明安, 张兴昌. 黄土高原旱塬地冬小麦水分生产潜力与土壤水分动态的模拟研究. 自然资源学报, 2004, 19: 738–746]

10 Hanks P. Collins Dictionary of the English Language. New York: Harper Collins, 1985

11 Li G J, Huang D H, Li Y L. Water-energy-food nexus (WEF-Nexus): New perspective on regional sustainable development (in Chinese). J Central Univ Fin Econ, 2016, (12): 76–90 [李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 水-能源-粮食关联关系: 区域可持续发展研究的新视角. 中央财经大学学报, 2016, (12): 76–90]

12 Liu Q, Zhang Y, Wang Y S. Urban WEF-Nexus toward sustainable development: A bibliometric review (in Chinese). Urban Dev Stud, 2018, 25: 4–17, 25 [刘倩, 张苑, 汪永生. 城市水-能源-粮食关联关系(WEF-Nexus)研究进展——基于文献计量的述评. 城市发展研究, 2018, 25: 4–17, 25]

13 Li L, Bi J, Zhou Y C, et al. Research progress of regional environmental risk management: From the perspectives of food-energy-water nexus (in Chinese). China Popul Resour Environ, 2018, 28: 85–92 [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. 中国人口·资源与环境, 2018, 28: 85–92]

14 Chang Y, Xia P, Wang J P. Overview of water-energy-food nexus and its implications on China (in Chinese). Water Resour Dev Res, 2016, 16: 67–70 [常远, 夏朋, 王建平. 水-能源-粮食纽带关系概述及对我国的启示. 水利发展研究, 2016, 16: 67–70]

15 Zheng R R, Tang J R, Jin X. Water-energy-food nexus: Congnition and solution of earth science (in Chinese). China Min Mag, 2018, 27: 36–41 [郑人瑞, 唐金荣, 金玺. 水-能源-粮食纽带关系: 地球科学的认知与解决方案. 中国矿业, 2018, 27: 36–41]

16 Yu H Y. The energy-food-water security: Nexus security and its implications (in Chinese). Area Stud Glob Dev, 2018, 4: 95–159 [于宏源. 纽带安全: 能源-粮食-水安全威胁及其思考. 区域与全球发展, 2018, 4: 95–159]

17 Bi B, Deng P, Zhang D, et al. The evolutionary characteristics analysis of coupling and coordination of regional water-energy-food (in Chinese). China Rural Water Hydropower, 2018, (2): 72–76 [毕博, 邓鹏, 张娣, 等. 区域水资源-能源-粮食系统耦合协调演化特征研究. 中国农村水利水电, 2018, (2): 72–76]

18 Zhang C C, Sun C Z. A bibliometric analysis of water footprint based on CiteSpace technique (in Chinese). Acta Ecol Sin, 38: 341–353 [张灿灿, 孙才志. 基于CiteSpace的水足迹文献计量分析. 生态学报, 38: 341–353]

19 Guan Y, Kang R, Liu J. Evolution of the field of ecological restoration over the last three decades: A bibliometric analysis. Restor Ecol, 2019, 27: 647–660

20 He J, Ping Q, Lou W, et al. PaperPoles: Facilitating adaptive visual exploration of scientific publications by citation links. J Assoc Inf Sci Technol, 2019, 70: 843–857

21 Bazilian M, Rogner H, Howells M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. Energy Policy, 2011, 39: 7896–7906

22 Ringler C, Bhaduri A, Lawford R. The nexus across water, energy, land and food (WELF): Potential for improved resource use efficiency? Curr Opin Environ Sustain, 2013, 5: 617–624

23 Biggs E M, Bruce E, Boruff B, et al. Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. Environ Sci Policy, 2015, 54: 389–397

24 Hoff H. Understanding the nexus. In: The Bonn2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Stockholm, 2011

25 Bellezoni R A, Sharma D, Villela A A, et al. Water-energy-food nexus of sugarcane ethanol production in the state of Goiás, Brazil: An analysis with regional input-output matrix. Biomass Bioenergy, 2018, 115: 108–119

26 Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, UN. Review of Developments in Transport in Asia and the Pacific 2005. New York: United Nations, 2005

27 Food and Agriculture Organization of the United Nations. The Water-Energy-Food Nexus: A New Approach in Support of Food Security and Sustainable Agriculture. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014

28 Li G J, Li Y L, Jia X J, et al. Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing (in Chinese). Manage Rev, 2016, 28: 11–26 [李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 等. 北京市水-能源-粮食可持续发展系统动力学模型构建与仿真. 管理评论, 2016, 28: 11–26]

29 Liu J, Mao G, Hoekstra A Y, et al. Managing the energy-water-food nexus for sustainable development. Appl Energy, 2018, 210: 377–381

30 Flammini A, Puri M, Pluschke L, et al. Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the context of the sustainable energy for all initiative. In: Environment and Natural Resources Management Working Paper. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014

31 Fatih B. World Energy Outlook 2015. Paris: Organisation for Economic Co-Operation and Development (OECD), 2015

32 International Renewable Energy Agency. Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus. Abu Dhabi: International Renewable Energy

Agency, 2015
33 World Economic Forum. Global Risks 2011: An initiative of the Risk Response Network. Geneva: World Economic Forum, 2011
34 Mohtar R H, Lawford R. Present and future of the water-energy-food nexus and the role of the community of practice. J Environ Stud Sci, 2016, 6: 192–199
35 Daher B T, Mohtar R H. Water-energy-food (WEF) Nexus Tool 2.0: Guiding integrative resource planning and decision-making. Water Int, 2015, 40: 748–771
36 Food and Agriculture Organization of the United Nations. Water Withdrawal by Sector, Around 2010. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2012
37 Fatih B. World Energy Outlook 2010. Paris: International Energy Agency, 2010
38 Varis O, Keskinen M. Discussion of “Challenges in operationalizing the water-energy-food nexus”. Hydrol Sci J, 2018, 63: 1863–1865
39 Zhou Y, Li H, Wang K, et al. China’s energy-water nexus: Spillover effects of energy and water policy. Glob Environ Change, 2016, 40: 92–100
40 Weitz N, Nilsson M, Davis M. A nexus approach to the post-2015 agenda: Formulating integrated water, energy, and food SDGs. SAIS Rev Int Affairs, 2014, 34: 37–50
41 China National Environmental Monitoring Station. 2016 Bulletin of State of the Environment in China (in Chinese). Collection of Environmental Protection Materials, 2017 [中国环境监测总站. 2016年中国环境状况公报. 环保工作资料选, 2017]
42 Liu J, Yang H, Savenije H H G. China’s move to higher-meat diet hits water security. Nature, 2008, 454: 397
43 Wang K, Davies E G R. A water resources simulation gaming model for the Invitational Drought Tournament. J Environ Manage, 2015, 160: 167–183
44 Allan J A. Virtual water: A strategic resource global solutions to regional deficits. Ground Water, 1998, 36: 545–546
45 Yang H, Zehnder A J B. Water endowments and virtual water trade. GAIA-Ecol Perspect Sci Soc, 2002, 11: 263–266
46 Zhang Y, Li C, Zhou X, et al. A simulation model linking crop growth and soil biogeochemistry for sustainable agriculture. Ecol Model, 2002, 151: 75–108
47 Guerra L C, Hoogenboom G, Hook J E, et al. Evaluation of on-farm irrigation applications using the simulation model EPIC. Irrig Sci, 2005, 23: 171–181
48 Ko J, Piccinni G, Steglich E. Using EPIC model to manage irrigated cotton and maize. Agric Water Manage, 2009, 96: 1323–1331
49 Zwart S J, Bastiaanssen W G M. Review of measured crop water productivity values for irrigated wheat, rice, cotton and maize. Agric Water Manage, 2004, 69: 115–133
50 Liu J, Williams J R, Zehnder A J B, et al. GEPIC-modelling wheat yield and crop water productivity with high resolution on a global scale. Agric Syst, 2007, 94: 478–493
51 Priya S, Shibasaki R. National spatial crop yield simulation using GIS-based crop production model. Ecol Model, 2001, 136: 113–129
52 Liu J, Wiberg D, Zehnder A J B, et al. Modeling the role of irrigation in winter wheat yield, crop water productivity, and production in China. Irrig Sci, 2007, 26: 21–33
53 D’Odorico P, Davis K F, Rosa L, et al. The global food-energy-water nexus. Rev Geophys, 2018, 56: 456−531
54 Konar M, Hussein Z, Hanasaki N, et al. Virtual water trade flows and savings under climate change. Hydrol Earth Syst Sci, 2013, 17: 3219–3234
55 Okadera T, Geng Y, Fujita T, et al. Evaluating the water footprint of the energy supply of Liaoning Province, China: A regional input-output analysis approach. Energy Policy, 2015, 78: 148–157
56 Shifflett S C, Turner J L, Dong L, et al. China’s Water-Energy-Food Roadmap: A Global Choke Point Report. Washington DC: Wilson Center, 2015
57 Mekonnen M M, Hoekstra A Y. The blue water footprint of electricity from hydropower. Hydrol Earth Syst Sci, 2012, 16: 179–187
58 Zhang X, Liu J, Tang Y, et al. China’s coal-fired power plants impose pressure on water resources. J Clean Prod, 2017, 161: 1171–1179
59 Zhao X, Jin X K, Guo W, et al. China’s urban methane emissions from municipal wastewater treatment plant. Earth Future, 2019, 7: 480−490
60 Munoz Castillo R, Feng K, Sun L, et al. The land-water nexus of biofuel production in Brazil: Analysis of synergies and trade-offs using a multiregional input-output model. J Clean Prod, 2019, 214: 52–61
61 World Bank. The World Bank Annual Report 2010 Year in Review. World Bank Annual Report, 2010. 37
62 Rudaheranwa N. Biofuel subsidies and food prices in the context of WTO agreements. Commonwealth, 2009, (63): 1−5
63 Newell J P, Goldstein B P, Foster A. A 40-year review of food-energy-water nexus literature with a focus on the urban. Environ Res Lett, 2019, 14: 073003
64 Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). Climate Change 2014: Synthesis Report. In: Contribution of Working Groups I, II and III the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Geneva: IPCC, 2014
65 Alcamo J. Systems thinking for advancing a nexus approach to water, soil and waste. J Environ Econom Manage, 2017, 67: 189−208
66 Rasul G. Food, water, and energy security in South Asia: A nexus perspective from the Hindu Kush Himalayan region. Environ Sci Policy, 2014,

39: 35–48
67 Vora N, Shah A, Bilec M M, et al. Food-energy-water nexus: Quantifying embodied energy and GHG emissions from irrigation through virtual water transfers in food trade. ACS Sustain Chem Eng, 2017, 5: 2119–2128
68 Smajgl A, Ward J, Pluschke L. The water-food-energy Nexus—Realising a new paradigm. J Hydrol, 2016, 533: 533–540
69 Williams E, Simmons J E. Water in the Energy Industry: An Introduction. London: BP International Limited, 2013
70 Waughray D. Water Security: The Water-Energy-Food-Climate Nexus. Washington DC: Island Press, 2011
71 Owen A, Scott K, Barrett J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus. Appl Energy, 2018, 210: 632–642
72 Yang H, Pfister S, Bhaduri A. Accounting for a scarce resource: Virtual water and water footprint in the global water system. Curr Opin Environ Sustain, 2013, 5: 599–606
73 Feng K, Hubacek K, Pfister S, et al. Virtual scarce water in China. Environ Sci Technol, 2014, 48: 7704−7713
74 Zhang C, Anadon L D. A multi-regional input-output analysis of domestic virtual water trade and provincial water footprint in China. Ecol Econom, 2014, 100: 159–172
75 Izaurralde R C, Rosenberg N J, Brown R A, et al. Integrated assessment of Hadley Center (HadCM2) climate-change impacts on agricultural productivity and irrigation water supply in the conterminous United States: Part II. Regional agricultural production in 2030 and 2095. Agric Forest Meteorol, 2003, 117: 97−122
76 Thomson A M, Izaurralde R C, Rosenberg N J, et al. Climate change impacts on agriculture and soil carbon sequestration potential in the Huang-Hai Plain of China. Agric Ecosyst Environ, 2006, 114: 195−209
77 Giampietro M. Innovative Accounting Framework for the Food-Energy-Water Nexus. Rome: Food and Agriculture Association of the United Nations, 2013
78 Willis H, David G, Jeanne R, et al. Developing the Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index: Toward a Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment. Santa Monica: RAND Corporation, 2016
79 Wada Y. Towards integrated solutions for water, energy, and land using an integrated nexus modeling framework. The American Geophysical Union Fall Meeting Abstracts, 2017
80 Owens J W. Water resources in life-cycle impact assessment: Considerations in choosing category indicators. J Ind Ecol, 2001, 5: 37–54
81 Liu J, Yang H, Cudennec C, et al. Challenges in operationalizing the water-energy-food nexus. Hydrol Sci J, 2017, 62: 1714–1720
82 Zhang P, Zhang L, Chang Y, et al. Food-energy-water (FEW) nexus for urban sustainability: A comprehensive review. Resour Conserv Recycl, 2019, 142: 215–224
83 Bhaduri A, Ringler C, Dombrowski I, et al. Sustainability in the water-energy-food nexus. Water Int, 2015, 40: 723–732

补充材料

表S1 中文期刊论文发表情况汇总(截至2020年2月5日)

本文以上补充材料见网络版csb.scichina.com. 补充材料为作者提供的原始数据, 作者对其学术质量和内容负责.

Summary for “水-粮食-能源关联系统述评: 文献计量及解析”

A review and discussion on the water-food-energy nexus: Bibliometric analysis

Zongyong Zhang[1,2], Junguo Liu[1*], Kai Wang[1], Zhan Tian[1] & Dandan Zhao[1,3]

[1] *School of Environmental Science & Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;*
[2] *Water Security Research Centre, School of International Development, University of East Anglia, Norwich NR4 7TJ, UK;*
[3] *Water & Development Research Group, Department of Built Environment, Aalto University, Espoo 00076, Finland*
* Corresponding author, E-mail: junguo.liu@gmail.com, liujg@sustech.edu.cn

The security of water, food and energy is a prerequisite for the 2030 Sustainability Development Goals of the United Nations. The increasing constraints and conflicts worldwide caused by water scarcity, energy shortages and food insufficiency have forced us to reflect on the security of each element and their interconnections. In the past, the main body of research had divisions between each independent resource element or built interlinkages between dual elements (e.g., water-food, water-energy and food-energy). There was insufficient research that regarded the three elements as one system. Thus, a ternary nexus system still needs to be explored.

To improve the understanding of the nexus and facilitate ternary synergic management, the present study performed a bibliometric analysis of the literature related to the water-food-energy nexus over a long time range from 1995 to 2018 and applied the CiteSpace technique for visualization. Based on this, we introduced the history and present state of the relevant research. We found that the water scientist community seemed to be relatively more active than other communities for the nexus research. The development tended to be more interdisciplinary from 2010 to 2016. However, nexus research has not yet become a stable and independent discipline and still suffers from large uncertainty in terms of the mechanism and driving forces of multisystem interactions. We categorized the current nexus research into strong or weak nexus, and illustrated that water, food and energy were inextricably interlinked as inputs or outputs for one another and that the existing close interlinkages (both economically and technologically) formed cross-sector/region cascading effects as one integrated system with a shared future for food, water and energy. These cascading effects indicate important interlinkages of the nexus system; nevertheless, they are still not well studied.

Although there is still high uncertainty for future research, future nexus studies should focus on the research scopes, influencing factors and environmental impacts; building a research framework; or exploring the mechanism and driving forces of multielement interactions. The adoption of an ensemble strategy could help make a tradeoff beyond the stereotype of the current single sector regulation and the separation between sectors and could improve the nexus efficiency through conflict coordination and synergy promotion.

In sum, highlights of this study are illustrated below: (1) A nexus thinking is required because the increasing conflicts caused by water scarcity, energy shortage and food insufficiency worldwide are forcing us to re-examine the securities of water, energy and food as well as their interlinkages. (2) We propose that nexus research needs to treat the three systems (water, food and energy) as one system (or “system of systems”). This became a new sustainable security perception beyond the stereotype of efficiency research within a single system. It stressed multi-sector and counterintuitive effects. (3) We suggest that a research framework or theoretical consensus should be developed or clarified in terms of the research scope, determinants and ecological (and environmental) impacts of the nexus system. In particular, urban nexus analysis should be explored. (4) We summarized and identified representative determinants of the nexus system. Climate change and international trade were the first two determinants of significance.

Finally, the nexus system research of three systems was bound to be mixed together based on dual interactions. In the future, synthesis and tradeoffs of the water, food and energy should be more systematically analyzed to gain in-depth insights into sustainable development.

water resource, food, energy, synergic management, nexus

doi: 10.1360/TB-2020-0105