

# 水—能源—粮食纽带关系若干问题解析

王红瑞<sup>1,2</sup>, 赵伟静<sup>1,2</sup>, 邓彩云<sup>1,2</sup>, 闫佳伟<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学水科学研究院, 北京 100875;

2. 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 水、能源、粮食均为战略性、基础性资源,三者之间相互关联,彼此制约,深刻影响着人类的生产、生活和生态环境。通过梳理水—能源—粮食纽带关系领域的研究内容、研究方法、研究尺度等,进一步明确了变化环境影响下水—能源—粮食纽带关系概念框架及其风险关系的传递与表达,指出当前对水—能源—粮食纽带关系理解尚未统一,广泛采用的有“联系论”和“方法论”。现有研究对水—能源—粮食纽带关系进行了现状评估,资源间相互消耗关系的量化与不同情景下的仿真模拟。研究中存在数据缺失、不一致,评估因素单一,缺少动态反馈机制,难以真正应用到政策调控中等问题。因此,数据整合、模型集成、风险评估与动态调节、提高韧性、城市尺度研究和智慧管理,均是水—能源—粮食纽带关系发展关注的重点领域。

**关键词:** 水—能源—粮食;纽带关系;概念框架;量化评估;模拟预测

水、能源和粮食是人类生存和发展的重要资源<sup>[1]</sup>。受气候变化、经济增长、社会变化、饮食结构变化等的影响,全球对水、能源和粮食的需求不断攀升。基于2010—2015年间的统计,到2030年,对水的需求预计增加40%,对能源的需求预计增加50%,对粮食的需求预计增加35%<sup>[2]</sup>。但水、能源、粮食资源短缺的现状已经成为全球性的问题,资源供给与需求的矛盾阻碍着经济社会的绿色可持续发展<sup>[3,4]</sup>。

水、能源、粮食之间联系紧密,一种资源的生产或开采往往需要消耗另外两种资源。图1展示了全球范围内三者的消耗关系。其中粮食生产需要投入的水资源最多,占总量的70%<sup>[5]</sup>,能源的开采和消费过程消耗了15%的水资源<sup>[6]</sup>;反之水资源在提取、处理、运输过程中也消耗了8%的能源;能源和粮食之间主要是能源作为粮食生产及运输的动力,部分粮食也可以作为生物质能使用<sup>[7]</sup>。同时,空间分布不协调也是水、能源、粮食资源的显著问题。就我国现状来说,东北及黄淮海两大粮食主产区的水资源短缺问题较为突出,西部地区能源基地水资源禀赋也较差,南方地区虽然水资源条件较好,但是其能源及粮食生产与之并不匹配,空间分布的不协调性使得资源无法得到有效利用<sup>[8-10]</sup>。此外,水、能源、粮食之间相互制约,任一种资源的不当调控可能会使得其他系统遭到破坏,例如印度为促使粮食增产提出的电力补贴政策,引发了含水层枯竭等一系列的问题<sup>[11]</sup>。水、能源、粮食联系紧密、相互制约、空间分布不协调的问题备受关注,它们之间复杂的关系被称为水—能源—粮食纽带关系(WEF Nexus)。

学者们围绕水—能源—粮食纽带关系在不同尺度展开了理论探讨与实证研究,从多个视角对纽带关系的概念框架进行了辨析,运用多种方法进行了量化评估、模拟预测和

收稿日期: 2020-12-22; 修订日期: 2021-04-03

基金项目: 国家自然科学基金项目(51879010)

作者简介: 王红瑞(1963-),男,河南新乡人,博士,教授,研究方向为水资源系统分析和环境规划与评价。

E-mail: henrywang@bnu.edu.cn

工具集成。但是当前对于纽带关系的理解尚未明确与统一,现有的实证研究也较难真正应用于资源管理体系与政策的建立当中。通过梳理水—能源—粮食纽带关系的发展历程,辨析纽带关系的不同理解与概念框架,提出了包含影响因素与潜在风险的水—能源—粮食纽带关系概念框架;从研究内容、研究方法、研究尺度和研究要素对水—能源—粮食纽带关系进一步梳理,分析了国内外研究面临的难点问题与未来的研究方向。

## 1 水—能源—粮食纽带关系理论分析

### 1.1 水—能源—粮食纽带关系发展历程

2006年在印度举行的专题研究会上提出关于水—能源—粮食纽带关系的初步认识,会议探讨了印度地下水灌溉与电力资源间的纽带关系<sup>[12]</sup>。2008年Siegfried等<sup>[13]</sup>在此基础上,正式提出了对水、能源和粮食相互作用的认识。随后,2011年的德国波恩会议上预测了世界人口的增长和经济发展将对水、能源和粮食安全产生威胁,导致资源枯竭、生态系统服务退化与社会和环境不可逆转的变化,同时指出水、能源、粮食是一个复杂的耦合系统。因此,研究需要从耦合而非孤立的角度展开来应对全球变化带来的挑战<sup>[14]</sup>。此后关于水—能源—粮食纽带关系的研究成果数量逐年增加,从概念理解发展到关系量化再到模拟预测与集成工具,内容也不再局限于水、能源和粮食,还考虑了气候、生态环境、经济社会等相关要素。目前对于该领域的研究逐年攀升(图2)。

### 1.2 水—能源—粮食纽带关系的不同理解

目前对于“WEF Nexus”的基本理解存在差异,主要分为两大类。其中被广泛采用的是“联系论”,即专注于水、能源、粮食之间存在紧密而复杂的联系,世界经济论坛(WEF)、联合国粮农组织(FAO)和国际可再生能源机构(IRENA)分别以水、粮食、

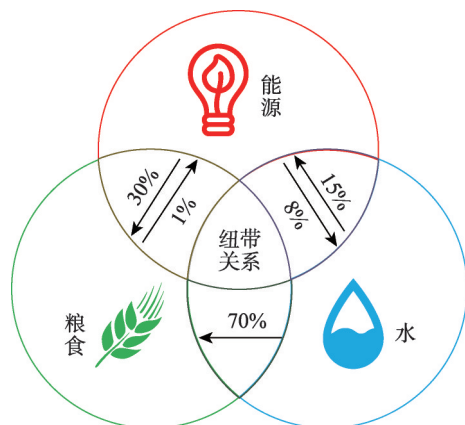


图1 水—能源—粮食纽带关系

Fig. 1 Water-energy-food nexus

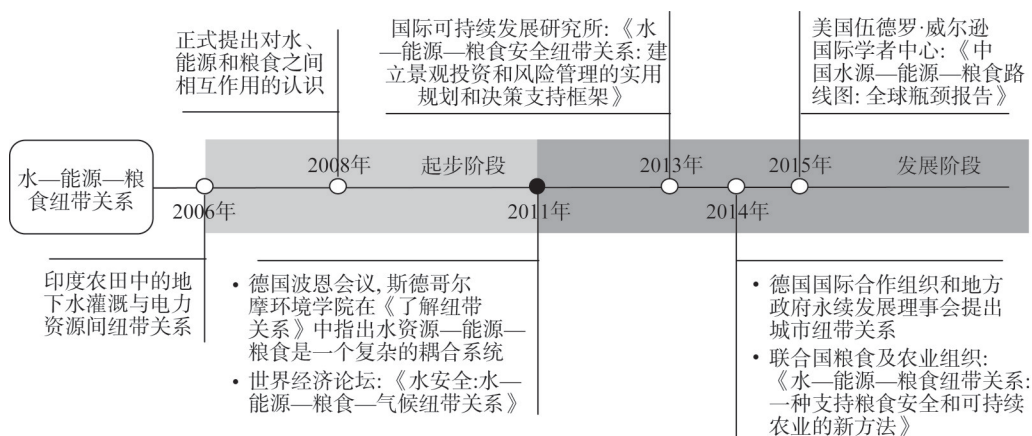


图2 水—能源—粮食纽带关系发展历程

Fig. 2 Development history of water-energy-food nexus

能源作为水—能源—粮食纽带关系的中心进行解读<sup>[15,16]</sup>。第二种理解更注重权衡与协同作用,被称为“方法论”,即将水—能源—粮食纽带关系视为协调资源利用与发展间关系的框架方法,来推动全球政策的实现,分别从实现可持续发展和保障安全的角度进行了阐述。联合国将水—能源—粮食纽带关系研究视为促进可持续发展目标的途径,指出纽带关系的有效管理对实现联合国可持续发展目标(SDG)是必不可少的<sup>[17]</sup>。de Andrade Guerra等<sup>[18]</sup>提出水—能源—粮食纽带关系代表了系统之间复杂的相互关系和相互依赖性,水—能源—粮食纽带关系方法提供了系统的多部门视角,以促进可持续发展并应对全球环境变化带来的挑战。虽然目前对于“纽带关系”的研究视角多种多样,但都承认水—能源—粮食系统具有复杂的联系性,并且系统边界具有模糊性。

### 1.3 水—能源—粮食纽带关系概念框架

根据对纽带关系定义的众多理解,国内外学者以框架图、因果关系图、关系树等构建了水—能源—粮食纽带关系概念框架。框架图从整体视角说明子系统间的影响方向和过程。联合国欧洲经济委员会(UNECE)指出水、能源、粮食安全依赖于健康生态系统提供的资源与服务,生态系统作为可持续性发展的重要条件,认为其在逻辑上与土地和水资源重叠,因此将生态作为水与粮食系统的结合体构建了水—能源—粮食—生态纽带系统<sup>[19]</sup>。Conway等<sup>[20]</sup>将Hoff在波恩会议中提出的概念框架进行了修订,从纽带关系影响因素出发,包括气候变化、人口、经济以及科学技术,考虑了相关利益者的行动及框架研究要到达的最终目的,即实现平等可持续的资源利用并提高纽带关系的适应性能力,使得水、能源和粮食安全得到保障。Biggs等<sup>[21]</sup>考虑了可持续民生生计与水—能源—粮食系统的关系,指出水—能源—粮食系统通过饮用水、粮食、工资等影响着民生生计,反之劳动力、基础设施建设、政策实施等支撑着水—能源—粮食系统的运转。因果关系图细化了框架图中的相关因素,显示了系统边界内因素间的联系以及因果循环<sup>[22]</sup>。Endo等<sup>[23]</sup>指出农业、渔业和人类生活是连接水、能源和粮食的枢纽,构建了以水为中心的因果关系图。关系树则以纽带关系的相关要素为节点,以层次结构枚举出一个要素影响其他要素的所有路径。Laspidou等<sup>[24]</sup>利用关系树构建了水—能源—粮食—土地—气候纽带关系之间的联系。以上可以看出,水—能源—粮食系统与经济社会、生态环境以及气候有着很大的联系,图3展示了它们间的关系。

水—能源—粮食纽带关系具有多样性和灵活性,对其概念框架的研究为水—能源—粮食关系的量化提供了基础。根据对系统边界不同的划分,现有概念框架主要有三类:一是探索水—能源—粮食系统中水、能源、粮食两两之间的联系;二是将水、能源、粮食视为水—能源—粮食纽带关系的核心,探讨社会、经济、环境和气候等因素的影响;三是讨论水—能源—粮

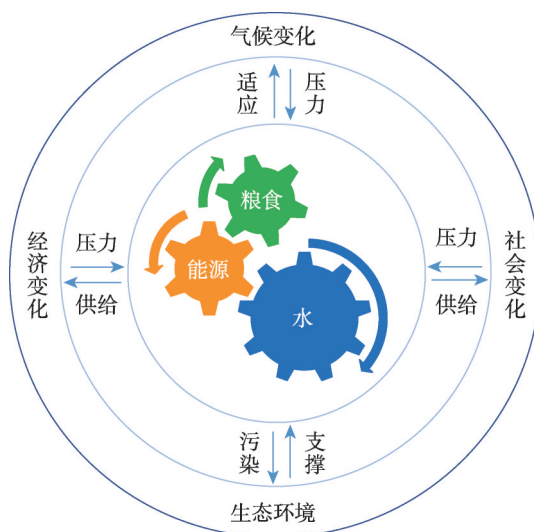


图3 水—能源—粮食系统与气候变化、经济社会、生态环境的关系

Fig. 3 The relationship between water-energy-food system and climate change, economic and social, and ecological environment



食纽带关系给生态环境、公众健康、人员生计等带来的潜在风险。综合以上研究成果,水—能源—粮食纽带关系并不是单一的属于以上哪一类,这是一个复杂的系统,在三种资源间有紧密联系的同时经受着外界变化环境带来的压力,反之也给外界环境带来一定的风险。将水、能源、粮食视为水—能源—粮食纽带关系的核心,影响因素及潜在风险视为纽带关系的外缘,建立了一个综合的水—能源—粮食纽带关系概念框架(图4)。

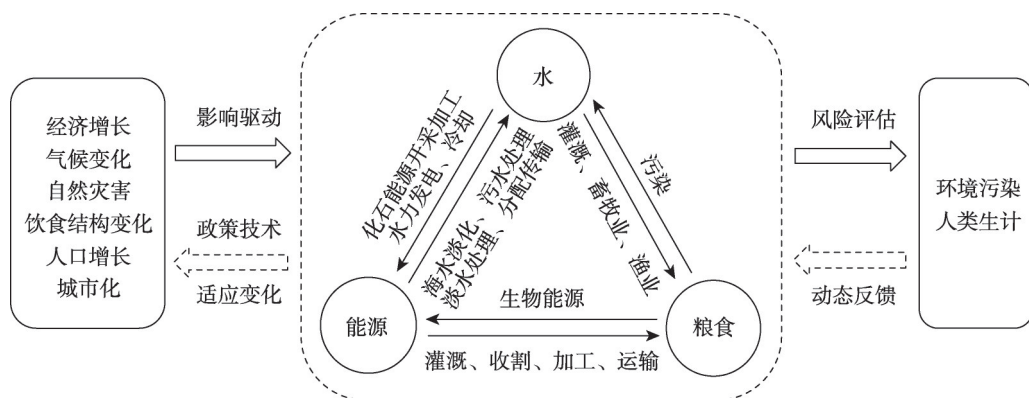


图4 水—能源—粮食纽带关系概念框架

Fig. 4 Conceptual framework of water-energy-food nexus

## 2 水—能源—粮食纽带关系实证研究

### 2.1 水—能源—粮食纽带关系量化评估

水—能源—粮食纽带关系研究的主要目标是通过技术和政策工具保障三种资源的安全<sup>[25]</sup>。在经过对水—能源—粮食纽带关系理论分析,即发展历程、理解辨析及概念框架的研究后,梳理了实证研究工作,主要集中在量化评估、模拟预测与集成工具三个方面。

关于量化评估研究主要有三类:状态评估、物理关联量化与经济关联量化(图5)。其中状态评估是对安全状态及空间分异特征、压力、效率、韧性与可持续性表征水—能源—粮食纽带关系特征的量进行评估,一般通过指标体系法和指数构建开展评估工作。系统边界的模糊性造成了指标体系以及指数构建的不一致,构建指标体系时都包括了水、能源和粮食子系统,有的还涵盖了环境、社会和经济子系统,但鲜见将水—能源、水—粮食和能源—粮食两两关系的指标纳入指标体系来表征水—能源—粮食系统相互作用的协调性,而是直接利用加权平均、几何平均、正交旋转等数学计算方法将各子系统进行耦合,无法体现两两资源之间复杂的相互作用关系。物理关联指水、能源、粮食三种资源间的相互消耗关系。一般有三种方法进行核算,包括自上而下法、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,对数据的依赖程度较高,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是投入产出法,该方法通过各行业部门之间的经济社会联系将整个经济活动中的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特征。扩展环境投入产出生命周期评估模型就是混合法的应用,将前两种方法结合起来,在考虑生产过程的同时也考虑了整个生产供应链的物质能量转移,但计算较为复杂。量化物理关联关系后还可以进一步构建资源流通网络,通过网络分析、物质流和能量流分析、结构路径分析等进一步评

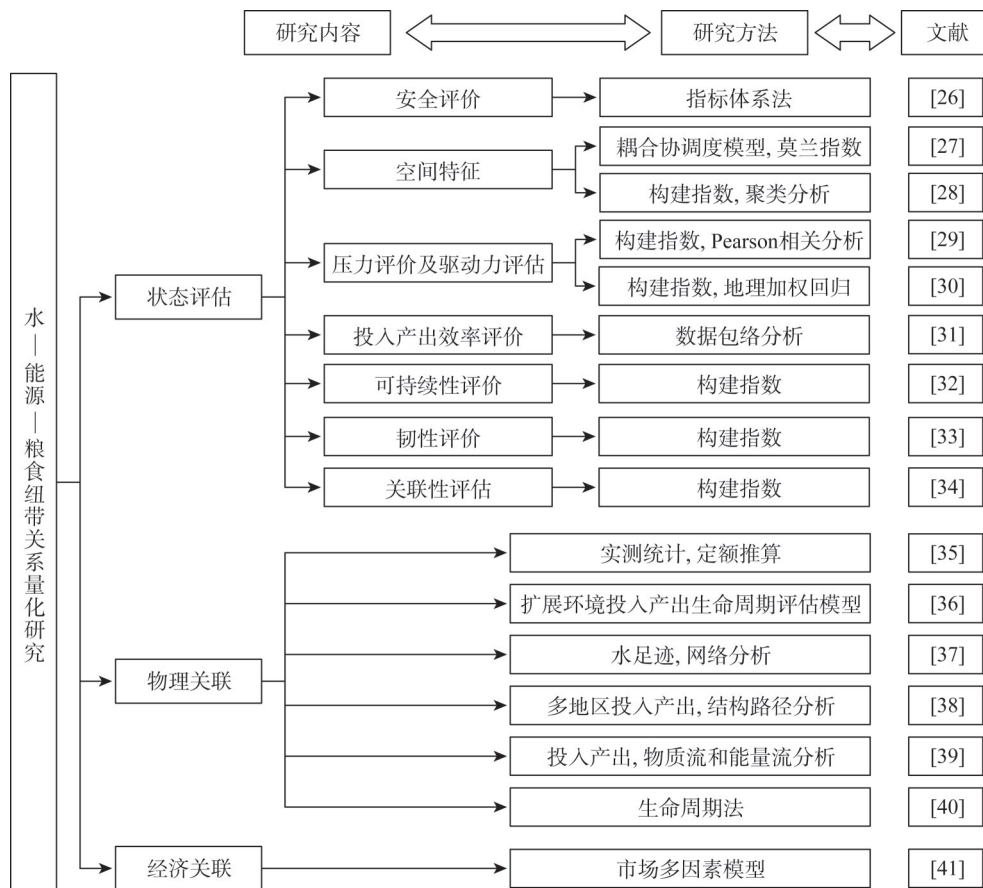


图5 水—能源—粮食纽带关系量化研究方法

Fig. 5 Quantitative research methods of water-energy-food nexus

估网络的效率、聚类特征、关键边和关键路径等<sup>[42,43]</sup>, 寻找资源消耗的重要节点与路径, 同时研究网络风险也是未来关注点之一。经济关联指的是系统内一种或两种资源的价格波动给其余方带来的影响<sup>[41]</sup>。Vandone等<sup>[41]</sup>采用多因素市场模型分析了农业和能源价格变化对水务行业运营公司股价的影响。

## 2.2 水—能源—粮食纽带关系模拟预测和集成工具

随着量化研究的深入, 开展了水—能源—粮食纽带关系模拟预测方面的研究 (表1)。水—能源—粮食纽带关系包含了对人类生活生产和自然系统至关重要的三个要素, 水、能源、粮食单独任一系统都和经济社会、生态环境有着复杂的关系, 三者跨部门的联系使得水—能源—粮食纽带关系更加复杂。水—能源—粮食纽带关系与社会科学和自然科学中的大量问题紧密相关, 由此, 使得水—能源—粮食纽带关系的研究切入点多种多样, 包括了水资源调配、土地利用、化肥生产、粮食种植结构、人口、生活方式改变、经济、气候变化、征收碳税、生态服务、废水排放等方面, 对以上研究切入点进行情景模拟, 是在经济、社会、生态、气候不同程度的影响下, 模拟水、能源、粮食资源的生产、消费需求等, 保障水—能源—粮食纽带关系的安全, 增强韧性, 提高资源效率, 改善人类生计, 适应气候变化, 探索水、能源、粮食资源可持续发展的模式。

水—能源—粮食纽带关系模拟预测的研究方法多种多样, 主要是跨学科的方法。水

表1 水—能源—粮食纽带关系模拟预测研究

Table 1 Simulation and prediction research on water-energy-food nexus

研究方法	文献	研究切入点	研究区
多主体模型（ABM）	[44]	主体偏好对粮食生产、水力发电和生态系统健康的影响	湄公河流域和尼日尔河流域
系统动力学（SD）	[45]	调整粮食种植结构、发展生物质能	山东省
	[46]	人口规模、经济发展水平	中国
	[47]	生活方式改变、家庭收入、家庭规模、电器功率和季节变化	伊拉克杜霍克市419个家庭
水文和作物生长模拟模型耦合经济优化模型	[48]	不同气候情景下在水力发电、农作物生产和减少洪灾损失方面的收益	水库和水电站
印度河流域模型（IBMR）耦合水利农业经济模型	[49]	气候变化、水资源分配机制、水利基础设施发展	印度河流域
水资源规划与评估模型（WEPA）	[50]	未来气候情景、社会经济变化	苏特莱杰河流域和比斯河流域
多部门系统分析（MSA）	[51]	城市代谢角度的资源通量估算	伦敦
协同优化模型	[52]	水资源调配、能源开发和粮食生产	黄河流域
水资源管理模拟器，多目标规划模型	[53]	供水和灌溉、能源生产和维护生态系统服务的管理优化	肯尼亚塔纳河流域
一般均衡模型，国际农产品贸易政策分析模型（IMPACT）	[54]	气候政策（征收碳税、扩大生物燃料生产）影响下的能源价格变化对水和粮食的影响	全球

文和作物生长模拟模型耦合经济优化模型、印度河流域模型耦合水利农业经济模型都是生物物理模型与经济模型的耦合，能够输出不同情景下的经济效益；水资源规划与评估模型是水资源系统分析的通用仿真模型，用于解决多部门的水资源配置问题，此模型以水资源为中心开展水—能源—粮食的研究；多部门系统分析是一种用于研究政策制定和投资决策的工具，可以模拟分析城市新陈代谢；系统动力学模型在简化真实系统时主观因素的影响较高，对数据量的要求较大，适合进行长期的模拟；多主体模型在非经济行为的相关计算上存在一定的难度，且对数据要求较高，用此方法解决水—能源—粮食问题的研究不多见，但前景广阔<sup>[44]</sup>；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，一般均衡模型也可以通过求解方程组得到使供给、需求和市场都达到均衡的方案。在当前的应用研究中大多只考虑单个或几个属性要素的影响，对纽带关系的刻画还不能体现出水—能源—粮食系统的复杂特性，因而，破解水—能源—粮食纽带关系的复杂性需要多模型的集成研究。

集成工具利用系统思维模式，考虑未来不同情况的资源需求，打破了单系统建模方法的固有限制，更好地体现出水—能源—粮食纽带关系的复杂性，旨在帮助决策者制定适当的资源管理策略。表2中介绍了几种常见的集成工具及其优缺点。

表2中的集成工具是对模拟预测模型进行集成而得，是在人类行为、自然系统的模型和社会经济模型间搭建起联系。人类行为指的是政策实施、技术应用、经济决策等人类决策活动。表征自然系统的模型主要是生物物理模型，能够对自然环境的情况进行模拟，例如作物生长模型、土地利用模型、水质模型、水文模型、能源系统模型、气候模型等，对于水—能源—粮食纽带系统来说，上述生物物理模型间的联系衔接也是重点。社会经济模型用来表征因人类行为而改变的环境服务的使用和价值<sup>[63]</sup>。模拟工具集成的过程需要一种模型的输出作为另一种模型的输入，但以上模型对于数据的精度要求并不

表2 水—能源—粮食纽带关系集成工具

Table 2 Integrated tool of water-energy-food nexus

文献	研究方法	工具介绍	应用尺度	优势与不足
[55]	CLEWs	CLEWs使用模块化结构集成现有的仿真工具，将LEAP（SEI的远程能源替代计划工具），WEAP（SEI的水评估和规划工具）和AEZ（IIASA和FAO的农业生态区划模型）与气候变化情景相结合	全球尺度模型	在碳税政策与不同气候情景的模拟下，能够输出耗水量、能耗量、CO <sub>2</sub> 排放量与能源材料的总投资，但未输出粮食或土地的相关响应
[56]	WEF Nexus Tool 2.0	用于评估不同方案并确定可持续的资源分配模式，能够量化不同场景下的水、能源、土地的需求，财务成本以及碳排放情况	全球尺度模型	不能模拟各要素之间的反馈分析
[57]	WEFSiM	WEFSiM针对给定未来自然变化（例如气候变化）和社会变化（例如人口波动）的情景，模拟未来的资源供应与需求	全球尺度模型	能够执行反馈（双向）分析，以识别可用资源和需求的实际数量，并进一步识别影响资源可用性的关键因素。但当降尺度应用时，需要开发相应区域的数据库
[58]	Q-Nexus	Q-Nexus可用来量化水、能源、粮食直接和间接关系	全球尺度模型	未考虑经济与生态系统对WEF Nexus的影响
[59]	MuSIASEM	MuSIASEM工具通过分析水、能源和粮食的代谢模式特征以及社会经济和生态变量模拟了毛里求斯共和国的生物燃料生产方案，印度旁遮普邦的未来谷物生产勘探以及南非共和国的电力生产替代方案评估	大区域规模模型	量化了人口，土地利用和发电能力与粮食、能源和水之间的关系，同时考虑了资金收益和环境影响，但未考虑气候变化等因素
[60]	NexSym	NexSym集成了三个主要组成部分（即生态、技术和消费组成部分）以计算本地水—能源—粮食的消耗和供应	英国本地模型	模拟集中在资源消耗和环境影响上
[61]	PRIMA	PRIMA耦合了区域气候，水文学，农业和土地利用，社会经济学和能源系统模型	美国东部区域模型	尚未包括某些重要组成部分，如能源系统的运输与电力分配，生态系统的生物多样性与入侵物种或人类的行为决策。受数据限制，其中详细的行业模型难以扩展，很难应用到其他地区
[62]	WEFO	WEFO为多时段社会经济模型，用于预测如何根据生产成本、社会经济需求和环境控制等模型输入来预测水资源、能源和粮食的需求	微观模型（热电厂）	仅考虑了能源供应、供水、食品生产、发电、减少CO <sub>2</sub> 排放，未考虑对生态系统的影响

完全统一，因此解决数据统计口径多、时空尺度不统一等问题是模型集成的重点。

关于水—能源—粮食纽带关系研究的空间尺度涵盖广泛，既有全球、区域、国家、流域、城市，也有多水库水电系统、家庭甚至发电厂等微观尺度。目前主要聚焦于大、中尺度研究，关注点为资源管理中的政策制定与治理分析。跨界流域的研究还需要权衡不同国家或区域间共享资源的情况。城市是资源流通的主要枢纽，是水、能源、粮食资源的主要消费阵地，2014年首次提出城市关联体的概念，将水—能源—粮食纽带关系与城市可持续发展联系起来。我国当前大力推进城市群发展，这就使得城市之间的联系更加紧密，贸易往来、资源流通更加频繁，也使得城市水—能源—粮食纽带关系更加复杂。

3 水—能源—粮食纽带关系研究的发展趋势

3.1 注重模拟工具的集成与数据的整合

水—能源—粮食纽带关系具有多学科的属性，识别量化并模拟水、能源、粮食资源



要素部门之间的生物物理、社会经济和政策联系,能够为相关政策制订和管理决策提供综合性解决方案<sup>[64]</sup>。虽然当前对水—能源—粮食纽带关系开展了一定的模拟预测,但集成工具中大多只包括了作物模型、水质模型、能源模型、气候模型、经济模型等模型的一个或几个,单一模拟预测工具无法有效地进行全面评估,对真实环境模拟的精度有待提高。工具集成需要对不同的模型建立起联系,其中一个难点是要求各模型具有一致性,即一个模型的输出能够作为下一个模型的输入,模型不同、研究尺度不同对数据精度的要求也不尽相同,这就提高了对数据的要求。水、能源、粮食还关联着经济社会数据、生态环境数据和气候数据等,但通常负责收集相关基础数据机构涉及众多,不同时间的数据统计标准也会有所变化,导致数据的处理整合难度增加。另外,目前由于统计数据不够详尽,大多研究只能揭示区域及部门层面的水—能源—粮食纽带关系,无法描述特定产品的水—能源—粮食纽带关系。所以,探索标准化模型结构建立起不同模型间的联系,从监测采集源头上降低数据整合难度,探索包括插值、外推、按比例放大缩小等在内的方法对数据集进行优化等均是发展的重要方向。

### 3.2 注重系统风险评估与动态反馈

水—能源—粮食系统具有不确定性、模糊性等特征,其风险主要包括两部分,一部分是系统内部的风险,即在资源贸易流通及消耗过程中对系统自身的风险,如一种资源的过度消耗造成短缺,影响了另外两种资源的使用,危害系统的稳定性;另一部分是系统对外部环境的风险,即资源在消耗过程中产生的废水、废气等废弃物或资源短缺对生态环境和人类生计带来的风险,如资源短缺对人类生存造成威胁,能源消耗产生的废水、废气污染水环境与空气,促使疾病发生,影响公共健康,饮食结构失衡导致的营养不良或营养过剩等问题。对于水—能源—粮食系统风险研究,当前尚未构建完整的概念框架,风险评估相关研究也多从单一指标开展,无法体现对系统内部的影响以及系统外部多维度的影响。

在未来研究中,对于内部风险,可以利用资源的流通性,构建资源流通网络,对网络中的节点风险进行分析。由于节点与节点之间具有相互依赖关系,一个节点的风险变化影响与其相关联的节点,所以除了节点风险之外,路径风险同样对资源流通网络产生影响。对于外部风险,将TP、TN、COD等水质指标,CO、NO<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>、NH<sub>3</sub>等废气,固体废弃物以及影响人体健康的相关指标纳入风险评估当中,量化对生态环境和人类生计的影响。此外,风险评估结果需要结合动态反馈机制,才能对系统具有良好的调节作用,根据发展规划中的相关目标对系统加以约束,通过政策及技术的支撑,使得水—能源—粮食系统适应外部环境变化,满足规划目标,实现资源的绿色可持续发展。

### 3.3 注重水—能源—粮食系统的韧性研究

保障水、能源、粮食资源的安全需要风险与韧性研究双管齐下。水—能源—粮食系统风险研究是具有“前瞻性”的,即对可能发生的风险事件进行分析。而水—能源—粮食系统韧性研究关注点从外部环境到了系统自身,水—能源—粮食系统的韧性可看作是系统受到干扰依然能通过不断恢复和适应来保障水、能源、粮食安全的能力。它是系统抵制风险、维持长期可持续发展的手段,也是抵抗力、恢复力和适应力的组合力。抵抗力是水—能源—粮食系统抵抗风险干扰、维持安全的能力;恢复力是水—能源—粮食系统受到干扰到恢复的能力;适应力是水—能源—粮食系统抵制系统风险保障安全而不断适应的能力。当前国内国际发展环境发生着复杂的变化,不稳定性、不确定性显著增



加,增强水—能源—粮食系统韧性有利于保障资源安全。所以亟需在风险分析的基础上,深入开展水—能源—粮食系统韧性量化评估与调控策略研究。

### 3.4 注重城市地区水—能源—粮食纽带关系的研究

现有对水—能源—粮食纽带关系研究的空间尺度较为广泛,不仅包含了从全球到国家再到流域、城市的宏观尺度,还包括了家庭和发电厂等微观尺度。随着城市化进程的加快,城市地区对水、能源、粮食系统的需求持续增加,造成水—能源—粮食系统的压力在不断提升<sup>[29]</sup>。城市是国家经济发展的核心区域,也是资源消耗的主要阵地,但资源生产过程大多发生在城市以外,导致城市消费活动给超出其边界的其他地区也造成了环境影响<sup>[65]</sup>,这就使得资源环境的问题变得更加复杂。所以注重研究城市尺度水—能源—粮食纽带关系,厘清城市消费活动及给其他地区带来的生态环境影响,对水—能源—粮食系统安全来说是有力保障。此外,生态环境作为经济社会发展的支撑,保障着水、能源、粮食的生产、消费等环节,但三者之间的供需矛盾的不断加大,给生态环境也带来了挑战。因此,水—能源—粮食—生态环境系统的协同关系关乎着经济社会的绿色可持续发展。

### 3.5 人工智能赋予实现水—能源—粮食智慧管理重大机遇

水—能源—粮食可持续发展是人类面临的亟待解决的共同挑战,亟需一个系统的解决方案。然而,变化环境背景下的水—能源—粮食纽带关系错综复杂且极具不确定性,已有的水—能源—粮食纽带关系模拟预测和优化管理研究成果离实现智慧管理尚有不小的差距。因此,未来将注重新技术的研发和应用以应对这一巨大挑战。随着物联网时代的到来和人工智能(AI)的发展,解决水—能源—粮食复杂问题的思路、方式和途径更加广阔,更具科技创新。物联网可以对数据进行实时采集、传递、监测系统甚至智能处理,其已经广泛运用于水资源系统、能源系统和粮食系统,例如梯级水电站群的联动和协同管理、作物水分养分监测、基于物联网技术的水资源监测等。“超算”和“云计算”使得复杂系统的模拟和分析性能飞速提升,5G技术的兴起为大数据信息传输提供便捷。人工智能(AI)是人类智慧的“容器”,其被认为可以开启继计算机和信息技术革命之后的新工业革命。它的发展为解决水—能源—粮食可持续发展提供系统方案、实现智慧管理带来重大的机遇。近年来,人工智能在水、能源和粮食问题方面已有初步应用,例如,智慧水利通过实时监测、采集江河湖泊、水利设施、供排水管网等数据,促进了水资源的科学规划和合理利用;在能源方面,智能电网提升了电网韧性,增强了供电效率和稳定性,人工智能也可以进行极端环境能源开发;人工智能种植通过分析气候、土壤等环境数据和商品价格等市场因素,协助合理规划种植生产,提升产量与资源利用率,实现精准农业<sup>[66]</sup>。因此,人工智能是实现水—能源—粮食可持续发展的“利剑”,利用人工智能实现水—能源—粮食智慧管理是未来研究的重点。

## 4 结论

自波恩会议以来,水—能源—粮食纽带关系的关注度持续增加,已成为当前研究的热点问题。就当前关于水—能源—粮食纽带关系的理论分析和实证研究进行了梳理并提出未来的发展趋势,总结归纳如下:

(1) 水—能源—粮食纽带关系的边界具有模糊性,对其的理解尚未统一,被广泛采用的有“联系论”和“方法论”。水、能源、粮食三者之间相互消耗、关系复杂,学者们多以框架图、因果关系图和关系树对水—能源—粮食纽带关系的概念框架进行描述。水

—能源—粮食纽带关系一方面受到环境变化的影响, 另一方面也给外界环境和人类生计带来了风险。

(2) 水—能源—粮食纽带关系的实证研究包含了量化评估、模拟预测和集成工具。主要内容为对表征水—能源—粮食纽带关系特征的安全、压力、效率、可持续性等状态进行评估, 对水、能源、粮食三者的相互消耗关系进行量化; 利用模型与集成工具模拟经济、社会、气候等不同情景下, 水、能源、粮食资源的生产和消耗情况。

(3) 数据的监测、采集与整合统一, 探索标准化模型、搭建模型间的联系、建立要素更全面的集成工具, 评估系统内、外部风险并建立动态反馈机制进行系统调节, 评估并提高系统韧性, 城市地区水—能源—粮食纽带关系安全保障, 利用人工智能赋能水—能源—粮食智慧管理都是未来值得深入探讨的领域。

### 参考文献(References):

- [1] DUBOIS O, FAURÈS J, FELIX E, et al. 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: 1-3.
- [2] National Intelligence Council. Global Trends 2030: Alternative Worlds. United States: Washington DC, 2013: 30.
- [3] 贾绍凤, 陈贵锋, 姜文来, 等. 对话贾绍凤研究员: 寻求水、能源、粮食安全共赢解决方案: 以内蒙古自治区鄂尔多斯市为例. 中国水利, 2017, (11): 59-62. [JIA S F, CHEN G F, JIANG W L, et al. Dialogue with Jia Shaofeng: Seeking win-win solutions for water, energy and food security: A case study of Ordos city, Inner Mongolia Autonomous Region. China Water Resources, 2017, (11): 59-62.]
- [4] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy, water and food nexus: Towards an integrated modelling approach. Energy Policy, 2011, 39(12): 7896-7906.
- [5] SIEBERT S, BURKE J, FAURES J M, et al. Groundwater use for irrigation: A global inventory. Hydrology and Earth System Sciences, 2010, 14(10): 1863-1880.
- [6] International Energy Agency. World Energy Outlook 2012. Paris: International Energy Agency, 2012: 2.
- [7] MAJEWSKI W. World water day 2014: Water & energy. Acta Energetica, 2014, 19(2): 91-97.
- [8] 贾绍凤. 中国水治理的现状、问题和建议. 中国经济报告, 2018, (10): 54-57. [JIA S F. Current situation, problems and suggestions of water treatment in China. China Policy Review, 2018, (10): 54-57.]
- [9] 姜珊, 赵勇, 尚毅梓, 等. 中国煤炭基地水与能源协同发展评估. 水电能源科学, 2016, 34(11): 40-43, 67. [JIANG S, ZHAO Y, SHANG Y Z, et al. Balancing development of thermal power with available water resources in major coal bases of China. Water Resources and Power, 2016, 34(11): 40-43, 67.]
- [10] 洪思扬, 王红瑞, 来文立, 等. 我国能源耗水空间特征及其协调发展脱钩分析. 自然资源学报, 2017, 32(5): 800-813. [HONG S Y, WANG H R, LAI W L, et al. Spatial analysis and coordinated development decoupling analysis of energy-consumption water in China. Journal of Natural Resources, 2017, 32(5): 800-813.]
- [11] SHARMA B R, VILLHOLTH K G, SHARMA K D. Groundwater Research and Management: Integrating Science into Management Decisions. India: Malhotra Publishing House, 2006: 62-87.
- [12] SCOTT C A, KURIAN M, WESCOAT J L. Governing the Nexus: Water Soil and Waste Resources Considering Global Change. America: Springer International Publishing, 2015: 15-38.
- [13] SIEGFRIED T U, FISHMAN R, MODI V, et al. An entitlement approach to address the water-energy-food nexus in rural India. In: San Francisco. American Geophysical Union Fall Meeting, 2008.
- [14] 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 Institute, 2011: 7-18.
- [15] WAUGHRA Y D. Water Security the Water-food-energy-climate Nexus: The World Economic Forum Water Initiative. Saint Louis: Island Press, 2011: 1-17.
- [16] FERROUKHI R, NAGPAL D, LOPEZ-PEN˜A A, et al. Renewable energy in the water, energy & food nexus. Abu Dhabi: IRENA, 2015: 51-84.
- [17] United Nations. Transforming our world: The 2030 agenda for sustainable development. Journal of the South African In-

- stitution of Civil Engineering, 2016, 24(1): 26-30.
- [18] DE ANDRADE GUERRA J B S O, BERCHIN I I, GARCIA J, et al. A literature-based study on the water-energy-food nexus for sustainable development. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2021, 35(1): 95-116.
- [19] United Nations Economic Commission for Europe (UNECE). *Reconciling Resource Uses in Transboundary Basins: Assessment of the Water-Food-Energy-Ecosystems Nexus*. Geneva: United Nations Economic Commission for Europe (UNECE), 2015: 21-23.
- [20] CONWAY D, VAN GARDEREN E A, DERYNG D, et al. Climate and southern Africa's water-energy-food nexus. *Nature Climate Change*, 2015, 5(9): 837-846.
- [21] BIGGS E M, BRUCE E, BORUFF B, et al. Sustainable development and the water-energy-food nexus: A perspective on livelihoods. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54(12): 389-397.
- [22] HALBE J, PAHL-WOSTL C, LANGE M A, et al. Governance of transitions towards sustainable development the water-energy-food nexus in Cyprus. *Water International*, 2015, 40(5-6): 877-894.
- [23] ENDO A, BURNETT K, ORENCIO P M, et al. Methods of the water-energy-food nexus. *Water*, 2015, 7(10): 5806-5830.
- [24] LASPIDOU C S, MELLIOS N, KOFINAS D. Towards ranking the water-energy-food-land use-climate nexus interlinkages for building a nexus conceptual model with a heuristic algorithm. *Water*, 2019, 11(2): 306.
- [25] ZHANG X, VESSELINOV V V. Energy-water nexus: Balancing the tradeoffs between two-level decision makers. *Applied Energy*, 2016, 183(23): 77-87.
- [26] MAYOR B, LÓPEZ-GUNN E, VILLARROYA F I, et al. Application of a water-energy-food nexus framework for the Duero River Basin in Spain. *Water International*, 2015, 40(5-6): 791-808.
- [27] 孙才志, 阎晓东. 中国水资源—能源—粮食耦合系统安全评价及空间关联分析. *水资源保护*, 2018, 34(5): 1-8. [SUN C Z, YAN X D. Security evaluation and spatial correlation pattern analysis of water resources-energy-food nexus coupling system in China. *Water Resources Protection*, 2018, 34(5): 1-8.]
- [28] 赖玉珮. 中国水—能源—粮食协同需求的区域特征研究. *北京规划建设*, 2019, (1): 74-77. [LAI Y P. Study on regional characteristics of water-energy-food collaborative demand in China. *Beijing Planning Review*, 2019, (1): 74-77.]
- [29] DENG C Y, WANG H R, GONG S X, et al. Effects of urbanization on food-energy-water systems in mega-urban regions: A case study of the Bohai MUR, China. *Environmental Research Letters*, 2020, Doi: 10.1088/1748-9326/ab6fbb.
- [30] 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. [BAI J F, ZHANG H J. Spatio-temporal variation and driving force of water-energy-food pressure in China. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1653-1660.]
- [31] 李桂君, 黄道涵, 李玉龙. 中国不同地区水—能源—粮食投入产出效率评价研究. *经济社会体制比较*, 2017, (3): 138-148. [LI G J, HUANG D H, LI Y L. Evaluation on the efficiency of the input and output of water-energy-food in different regions of China. *Comparative Economic & Social Systems*, 2017, (3): 138-148.]
- [32] YI J, GUO J, OU M, et al. Sustainability assessment of the water-energy-food nexus in Jiangsu province, China. *Habitat International*, 2020, 95(1): 102094, Doi: 10.1016/j.habitatint.2019.102094.
- [33] KESKINEN M, SOMETH P, SALMIVAARA A, et al. Water-energy-food nexus in a transboundary river basin: The case of Tonle Sap Lake, Mekong River Basin. *Water*, 2015, 7(10): 5416-5436.
- [34] EL-GAFY I. Water-food-energy nexus index: Analysis of water-energy-food nexus of crop's production system applying the indicators approach. *Applied Water Science*, 2017, 7(6): 2857-2868.
- [35] 张杰, 郝春洋, 刘海滢, 等. 基于用水总量的水—能源—粮食关系解析. *南水北调与水利科技*, 2020, 18(1): 194-201. [ZHANG J, HAO C F, LIU H Y, et al. Analysis of the relationship between water, energy and food based on total water consumption. *South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology*, 2020, 18(1): 194-201.]
- [36] SHERWOOD J, CLABEAUX R, CARBAJALES-DALE M. An extended environmental input-output lifecycle assessment model to study the urban food-energy-water nexus. *Environmental Research Letters*, 2017, Doi: 10.1088/1748-9326/aa83f0.
- [37] MAHJABIN T, MEJIA A, BLUMSACK S, et al. Integrating embedded resources and network analysis to understand food-energy-water nexus in the US. *Science of the Total Environment*, 2020, 709(12), Doi: 10.1016/j.scitotenv.2019.136153.
- [38] OWEN A, SCOTT K, BARRETT J. Identifying critical supply chains and final products: An input-output approach to exploring the energy-water-food nexus. *Applied Energy*, 2018, 210(2): 632-642.
- [39] LIANG S, QU S, ZHAO Q T, et al. Quantifying the urban food-energy-water nexus: The case of the Detroit Metropolitan Area. *Environmental Science & Technology*, 2018, 53(2): 779-788.

- [40] 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 Sustainable Chemistry & Engineering*, 2017, 5(3): 2119-2128.
- [41] VANDONE D, PERI M, BALDI L, et al. The impact of energy and agriculture prices on the stock performance of the water industry. *Water Resources and Economics*, 2018, 23(3): 14-27.
- [42] HONG S Y, YANG H, WANG H R, et al. Water and energy circulation characteristics and their impacts on water stress at the provincial level in China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2019, 33(10): 1-18.
- [43] HONG S Y, WANG H R, CHENG T. Circulation characteristic analysis of implied water flow based on a complex network: A case study for Beijing, China. *Water*, 2018, 10(7): 834.
- [44] KHAN H F, YANG Y C, XIE H, et al. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, 2017, 21(12): 6275-6288.
- [45] 王慧敏, 洪俊, 刘钢. “水—能源—粮食”纽带关系下区域绿色发展政策仿真研究. *中国人口·资源与环境*, 2019, 29(6): 74-84. [WANG H M, HONG J, LIU G. Simulation research on different policies of regional green development under the nexus of water-energy-food. *China Population, Resources and Environment*, 2019, 29(6): 74-84.]
- [46] 米红, 周伟. 未来30年我国粮食、淡水、能源需求的系统仿真. *人口与经济*, 2010, (1): 1-7. [MI H, ZHOU W. The system simulation of China's grain, fresh water and energy demand in the next 30 years. *Population & Economics*, 2010, (1): 1-7.]
- [47] 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(7): 366-380.
- [48] AMJATH-BABU T S, SHARMA B, BROUWER R, et al. Integrated modelling of the impacts of hydropower projects on the water-food-energy nexus in a transboundary Himalayan River Basin. *Applied Energy*, 2019, 239(6): 494-503.
- [49] YANG Y, RINGLER C, BROWN C, et al. Modeling the agricultural water-energy-food nexus in the Indus River Basin, Pakistan. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2016, 142(12): 4016062, Doi: 10.1061/(ASCE)WR.1943-5452.0000710.
- [50] MOMBLANCH A, PAPADIMITRIOU L, JAIN S K, et al. Untangling the water-food-energy-environment nexus for global change adaptation in a complex Himalayan water resource system. *Science of the Total Environment*, 2019, 655(10): 35-47.
- [51] WALKER R V, BECK M B, HALL J W, et al. The energy-water-food nexus: Strategic analysis of technologies for transforming the urban metabolism. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141(10): 104-115.
- [52] 彭少明, 郑小康, 王煜, 等. 黄河流域水资源—能源—粮食的协同优化. *水科学进展*, 2017, 28(5): 681-690. [PENG S M, ZHENG X K, WANG Y, et al. Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 681-690.]
- [53] HURFORD A P, HAROU J J. Balancing ecosystem services with energy and food security-assessing trade-offs for reservoir operation and irrigation investment in Kenya's Tana Basin. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 11(1): 1343-1388.
- [54] RINGLER C, WILLENBOCKEL D, PEREZ N, et al. Global linkages among energy, food and water: An economic assessment. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2016, 6(1): 161-171.
- [55] HOWELLS M, HERMANN S, WELSCH M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7): 621-626.
- [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] 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(1): 70-87.
- [58] 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.
- [59] GIAMPIETRO M, ASPINALL R, BUKKENS S, et al. An innovative accounting framework for the food-energy-water nexus: Application of the MuSIASEM approach to three case studies. Roma: FAO, 2013: 3-21.
- [60] MARTINEZ-HERNANDEZ E, LEACH M, YANG A. Understanding water-energy-food and ecosystem interactions using the nexus simulation tool NexSym. *Applied Energy*, 2017, 206(22): 1009-1021.
- [61] KRAUCUNAS I, CLARKE L, DIRKS J, et al. 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(3-4): 573-588.
- [62] ZHANG X, VESSELINOV V V. Integrated modeling approach for optimal management of water, energy and food secu-



- rity nexus. *Advances in Water Resources*, 2017, 101(3): 1-10.
- [63] KLING C L, ARRITT R W, CALHOUN G, et al. Integrated assessment models of the food, energy, and water nexus: A Review and an outline of research needs. *Social Science Electronic Publishing*, 2017, 9(8): 143-163.
- [64] 沈镭, 钟帅, 胡舒寒. 新时代中国自然资源研究的机遇与挑战. *自然资源学报*, 2020, 35(8): 1773-1788. [SHEN L, ZHONG S, HU S H. Opportunities and challenges of natural resources research of China in the New Era. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(8): 1773-1788.]
- [65] 张力小, 张鹏鹏, 郝岩, 等. 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. [ZHANG L X, ZHANG P P, HAO Y, et al. Urban food-energy-water (FEW) nexus: Conceptual frameworks and prospects. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(4): 1144-1153.]
- [66] 网大为. 重构地球: AI FOR FEW. 北京: 人民出版社, 2021: 40-53. [DAVID W. *Reconstructing the Earth: AI FOR FEW*. Beijing: Chinese People's Publishing House, 2021: 40-53.]

## Analysis on issues of water-energy-food nexus

WANG Hong-rui<sup>1,2</sup>, ZHAO Wei-jing<sup>1,2</sup>, DENG Cai-yun<sup>1,2</sup>, YAN Jia-wei<sup>1,2</sup>

(1. College of Water Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Water, energy and food are indispensable resources in production and life. They are closely linked and mutually restricted, but their spatial distribution is not harmonious. Affected by climate change, economic and social change, the production and life are restricted. By sorting out the research contents, methods, scales of the WEF Nexus, the comprehensive conceptual framework of WEF Nexus and the transmission and expression of its risk relationship under the influence of changing environment are clarified. In the comprehensive conceptual framework, water, energy and food are regarded as the core of the WEF Nexus, and the influencing factors and potential risks of the water-energy-food system are regarded as the extension of the nexus. This paper points out that the definition of WEF Nexus has not been unified, and "connectionism" and "methodology" are two common explanations. The existing studies have assessed the status of the WEF Nexus, quantified the consumption relationship between resources and simulated it under different economic, social and climate scenarios. Status assessment includes safety, pressure, efficiency, resilience, and sustainability. There are some problems in the current research of WEF Nexus. Data missing and inconsistency hinder the calculation. Only one or several factors are considered in the application of the model, which can not fully describe the complexity of the system. Dynamic feedback research is limited by data and quantitative methods. Existing research is difficult to really apply to policy control. Therefore, monitoring, collection and integration of data, exploration of standardization model and establishment of multi-factor integration tool, system risk assessment and dynamic adjustment, resilience improvement, urban scale research and smart management are all the focus of attention in the development of the WEF Nexus.

**Keywords:** water-energy-food; nexus; conceptual framework; quantitative evaluation; simulation and prediction