

DOI: 10.5846/stxb201809081926

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): - .

Zhang L X, Zhang P P, Hao Y, Tang S J, Liu G Y. Urban food-energy-water (FEW) nexus: conceptual frameworks and prospects. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(4): - .

城市食物-能源-水关联关系:概念框架与研究展望

张力小*,张鹏鹏,郝岩,唐守娟,刘耕源

北京师范大学环境学院,环境模拟与污染控制国家重点联合实验室,北京 100875

摘要:食物、能源和水(Food, Energy and Water, FEW)是人类生存与发展不可或缺的基础性资源,且三者之间存在密切的关联关系(Nexus),即其中任何一项资源的生产与供给均依赖于另外两项资源。FEW 关联关系作为应对全球人口增长、资源短缺和生态环境恶化等问题的系统性管理理念,已引起国际学术界与实践管理领域的广泛关注。然而,目前对 FEW 关联关系仍然缺乏统一和清晰的界定,现有研究大多是基于不同角度理解与量化“关联关系”。城市作为全球资源消费的主阵地,其 FEW 关联关系更为复杂,亟待建立针对城市生态系统的概念框架。对 FEW 关联关系的发展历程、概念表述以及研究方法等方面进行全面回顾和系统分析。在此基础上,从“资源依存”、“资源供给”和“系统集成”等 3 个视角构建了城市 FEW 关联关系的概念框架,并进一步阐述 FEW 关联关系未来研究的重点方向——“系统性表征”、“时空演化”与“协同管理”,为城市优化资源配置,实现集成管理提供一种新思路 and 定量化的参考依据。

关键词:食物-能源-水关联关系;城市生态系统;概念框架;集成管理

Urban food-energy-water (FEW) nexus: conceptual frameworks and prospects

ZHANG Lixiao*, ZHANG Pengpeng, HAO Yan, TANG Shoujuan, LIU Gengyuan

State Key Joint Laboratory of Environmental Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

Abstract: Food, energy, and water (FEW) are three kinds of essential and indispensable resources to human beings. Moreover, they are interlinked with one another, and changing the components of one system may lead to ripple effects (desired or undesired) on the other two systems. Currently, the FEW nexus is increasingly concerned by scholars and policy makers. The FEW nexus is a key concept to address the issues of population boom, resource scarcity, and environmental degradation. However, there still lacks consistent and explicit cognitions of the FEW nexus. Most of existing studies focus on the characterization and quantification of the FEW nexus from multiple perspectives. Little attention is paid to the universal experience in synergy management, especially for urban systems. Cities are critical carriers of the population and economic activities and are also important contributors to the FEW consumption. They are essential for the sustainable development and are thus inextricable parts of the FEW nexus. However, urban FEW nexus has been rarely concerned by existing studies. This study presented a comprehensive review to track the progress of the FEW nexus. We also proposed a three-dimensional conceptual framework of the urban FEW nexus to achieve urban sustainable development goals, including resource interdependency, resource provision, and system integration. Finally, we discussed future directions of urban FEW nexus studies.

Key Words: food-energy-water nexus; city; conceptual framework; integrated management

基金项目:国家自然科学基金国际(地区)合作与交流项目(51661125010);国家重点研发计划项目(2017YFC0505703);环境模拟与污染控制国家重点联合实验室(17L02ESPC)

收稿日期:2018-09-08; 修订日期:2018-12-25

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhanglixiao@bnu.edu.cn

食物、能源和水(Food, Energy and Water, FEW)是支撑人类生存和社会经济发展不可或缺的基础性资源^[1-2]。预计到2030年,全球对FEW的需求将分别增长35%、50%和40%^[3]。与此同时,食品安全、淡水资源短缺和化石能源枯竭等全球性问题日益成为制约现代社会发展的“短板”,严重威胁国家安全与社会稳定。更重要的是,FEW之间存在错综复杂的互动关系——“关联关系”^[4],即其中任何一项资源的生产与供给均依赖于另外两项资源。显然,基于部门分割视角下的资源管理体系与政策,很难有效实现FEW资源的系统集成管理,造成资源的低效使用甚至浪费。

作为消费活动的主阵地,城市承载了超过50%的世界人口,这一比例在2050年将达到66%^[5],也就意味着FEW三条“生命线”的资源环境冲突在城市系统中表现得更为激烈和棘手^[6]。一方面,快速城镇化对FEW资源的需求巨大,正在重塑FEW关联关系,并将资源环境安全置于风险中,这是研究城市FEW关联关系的重要原因之一;另一方面,城市所需的FEW资源,其生产过程大多发生在城市以外其他区域^[7-8],城市活动产生的环境影响也超出了其地理边界。城市系统中任何政策的实施都可能改变FEW之间的相互作用关系。系统的高度开放性、复杂性以及城市与区域之间的空间耦合关系(Tele-coupling),使得城市成为影响资源环境安全的关键枢纽。因此,通过“关联关系”思想将FEW系统与城市及其腹地联结起来,可以有效促进资源协同管理,尽可能减轻或避免区域甚至是全球范围内的权衡(trade-offs)关系。近年来,有关FEW关联关系的研究已经取得了阶段性成果,但针对城市系统,尤其是考虑城市与区域之间联系的研究较少。

本文在系统梳理国内外FEW关联关系发展历程、相关概念和方法研究的基础上,聚焦于当前的研究瓶颈,结合城市高度开放和依赖外部资源输入的特点,尝试从不同视角,构建一个相对广义的城市FEW关联关系概念框架。并基于此概念框架,提出不同的适用方法和研究重点,以期在城市FEW资源协同管理提供一种新的研究视角。

1 发展历程与概念讨论

1.1 食物-能源-水关联关系的发展历程

如前所述,“关联关系”作为系统集成的资源管理需求,逐渐成为世界性热点议题。在此之前,部门协作理念一直在推广,如水资源集成管理,但成效甚微。直到2011年在德国波恩举办的“FEW关联关系—绿色经济解决方案”会议上,即“波恩会议”^[9-10],把FEW关联关系看作一种关乎人类生存与各国现实利益的政治理念,并强调部门分割管理无法有效解决FEW生产与消费等活动带来的复杂资源环境问题。“波恩会议”也成为FEW关联关系研究的里程碑式事件^[1,11-12]。

但是,FEW关联关系理念的萌芽和研究最早可追溯到20世纪70年代,Meadows等人出版的《增长的极限》,该书对全球人口、经济和FEW等之间的供需与安全问题进行初步探讨^[13]。而后美国、日本、印度等国的学术界和其他组织机构陆续开展“两两关系”的研究,如食物-能源或食物-水关联关系^[14-15]。2011年“波恩会议”后,以FEW关联关系为主题的研讨会、项目以及学术论文如雨后春笋般涌现出来^[16-18]。仅2011—2015年间,大约300个来自学术界、商业和政府的相关组织机构参与到FEW关联关系研究中^[19]。围绕如何理解、界定、测度与剖析FEW关联关系而展开的讨论已成为国际社会辩论的焦点^[20-23]。根据Web of Science检索结果(关键词分别为:能源-农业(EA);能源-食物(EF);食物-水(FW);能源-水(EW);能源-食物-水(EFW);能源-食物-水-土地(EFWL),图1),2011年以前“关联关系”的研究主要集中在两者之间,以能源-水居多,2015—2017年三者之间的研究成果呈现井喷之势,研究尺度也从全球、跨区域、国家逐渐延伸到家庭、产品等方面,但城市尺度的研究相对缺乏。

总而言之,FEW关联关系领域的研究主要集中在3个方面:(1)理解和表述FEW关联关系的概念;(2)开展实证研究,探讨FEW系统的内部特征、系统对外部环境的响应(如经济活动、气候变化和政策等);(3)开发相关模型,用于识别FEW系统中的权衡关系和协同作用,并指导跨部门政策的制定。

1.2 食物-能源-水关联关系的概念讨论

国内外学者从不同领域、不同视角甚至不同尺度,对FEW关联关系的概念提出了各自的见解和表述。起

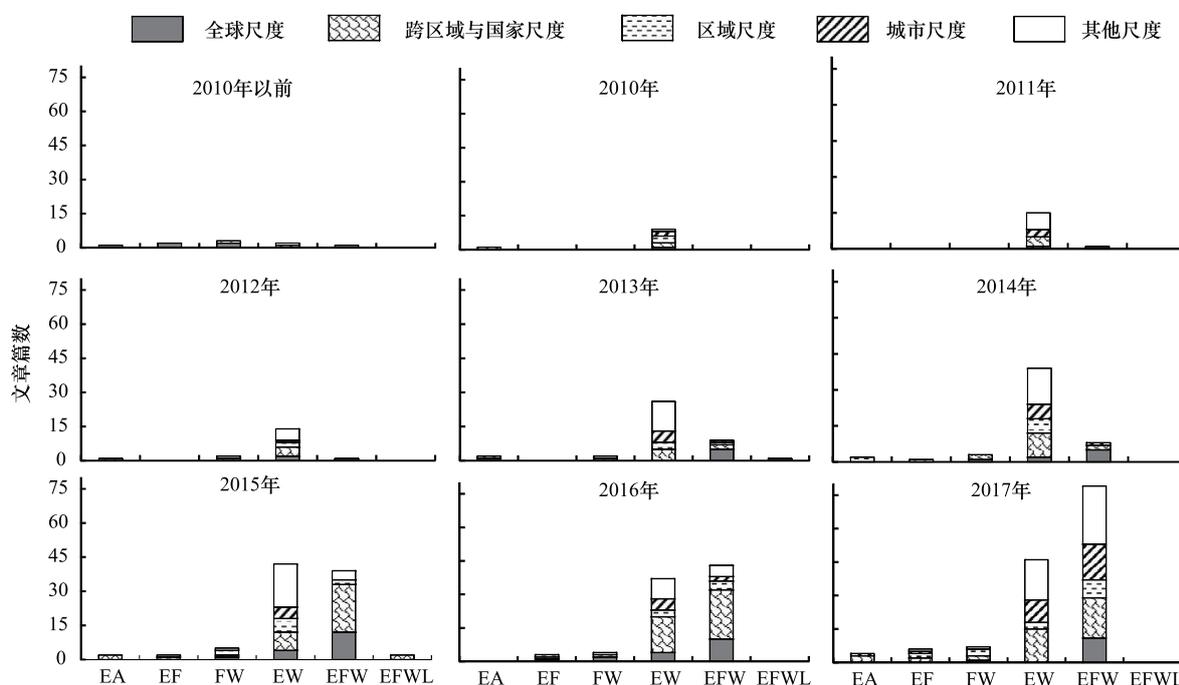


图1 FEW 关联关系研究论文发表变化趋势

Fig.1 The increasing trend of FEW nexus publications (from ISI Web of Knowledge)

EA:能源-农业 energy-agriculture; EF:能源-食物 energy-food; EW:能源-水 energy-water; EFW:能源-食物-水 energy-food-water; EFWL:能源-食物-水-土地 energy-food-water-land

初,学术界对“关联关系”理解基于该词的直译,将其界定为 FEW 之间的相互依存关系^[24-26],即 FEW 三种资源中任意一方的生产活动和供给过程对其他两方的需求。至今,部分学者仍然沿用这一解释,并在此基础上做出了一些改变,从三者之间的相互影响和相互制约方面进行了界定^[22,27]。

在概念探索过程中,由于研究重点不同,学者们对 FEW 关联关系概念的理解角度也呈现多样化。以 FEW 三者中任意一方作为切入点,讨论“关联关系”的研究居多,我们称之为“中心论”。如斯德哥尔摩环境研究院(Stockholm Environmental Institute, SEI)和亚洲开发银行(Asian Development Bank, ADB)是以水资源为核心,认为“可用水量”关系到 FEW 关联关系的安全^[28];而联合国粮食及农业组织(Food and Agriculture Organization of the United Nations, FAO)则从粮食安全角度出发,挖掘影响 FEW 关联关系的关键因素^[1];同样,国际可再生能源机构(the International Renewable Energy Agency, IRENA)建议以能源为中心,运用可再生能源技术处理 FEW 系统之间的权衡关系^[29]。除此之外,部分学者从资源供给安全的角度解析“关联关系”,侧重于 FEW 资源与外部系统之间的关系^[30-31]。如 White 等人(2018)强调“关联关系”不仅包括 FEW 之间的资源环境足迹,还需考虑 FEW 与区域生态系统之间的相互依存关系^[32];而 Owen 等人基于消费视角,衡量社会经济需求驱动下的 FEW 资源环境足迹变化及其与经济、政策之间的密切联系^[33]。

由此可见,FEW 关联关系的内涵较为丰富,其概念的界定从三者之间的相互依存,扩展到 FEW 系统内部及其作为一个整体与外部环境之间的关系。尤其是 FEW 三者之间客观存在的“关联或耦合关系”,已被相关研究者和政策制定者广泛接受。但整体而言,国际社会对 FEW 关联关系概念的解读仍然不够清晰,相关表述也较为宽泛和模糊,缺乏可操作的框架与步骤。这也说明,“关联关系”与“可持续发展”等概念一样,具有较大的开放性,需要在基本共识的前提下根据不同的研究方向或者管理目标重新做出界定。

2 现有的研究方法体系

目前 FEW 关联关系的研究方法,主要集中在 FEW 资源环境足迹核算、系统模拟与优化管理等方面(表 1)。

表 1 FEW 关联关系方法与研究现状

Table 1 Methods and research status of FEW nexus

类型 Types	目的 Purpose	方法 Methods	要素 Elements	尺度 Scales
足迹核算 Footprint accounting	理解与量化	清单法 ^[34] LCA ^[38-39] IOA ^[42-48]	食物、能源、土地 食物、能源、水 食物、能源、水、污染物	国家 行业、国家 城市、区域、国家
系统模拟 System simulation	评估与预测	指标体系构建 ^[31,49-51] 系统动力学分析 ^[52-53]	食物、能源、水 食物、能源、水	城市、国家、跨区域 城市、国家
优化管理 Optimal management	集成与优化	一般均衡模型 ^[56-57] WEAP-LEAP ^[58] Modified SWAT ^[2] CLEWs ^[59,60] WEFO ^[23] LIPSON ^[63] WEF Nexus Tool 2.0 ^[61]	能源、水 能源、水 食物、能源、水 土地、能源、水、气候 食物、能源、水 食物、能源、水 食物、能源、水	国家 国家 区域、国家 国家 行业 城市 国家、区域

LCA: 生命周期评价 life cycle assessment; IOA: 投入产出分析 input-output analysis; WEAP: 水资源评价与规划模型 water evaluation and planning model; LWAP: 长期能源规划模型 long-range energy alternatives planning; SWAT: 土壤-水资源评估工具 soil and water assessment tool; CLEWs: 气候、土地利用、能源和水战略 climate, land-use, energy and water strategies; WEFO: 水、能源和食品安全关联关系优化模型 water, energy and food security nexus optimization model; LIPSON: 本地化集成生产系统洋葱模型 locally integrated production system onion model; WEF: 水-能源-食物 water-energy-food.

2.1 食物-能源-水资源环境足迹核算

FEW 关联关系的足迹核算, 主要包括 FEW 子系统(资源要素)之间的足迹影响以及 FEW 生产或消费引起的其他资源环境足迹(如碳排放、土地利用和典型污染物等)。其研究尺度涵盖了工艺生产(如食物生产)、典型行业(如农业、火力和风力发电等)、城市以及其他系统(如流域、国家和全球等), 主要采用清单法、生命周期评价(Life Cycle Assessment, LCA)和投入产出分析(Input-Output Analysis, IOA)等方法^[34-37]进行量化。相比较而言, 清单法仅针对 FEW 生产、消费等某一过程或环节, 而 LCA 则是全生命周期过程研究。如 Li 等运用 LCA 研究风力发电系统的能源-水关联关系(包括设备制造、建设施工和运行维护等环节), 预测我国 2020 年风力发电将减少 23% 的碳排放, 节约水资源 800 亿 m^3 ^[38]。Salmoral 等认为 LCA 是综合评估 FEW 关联关系的重要工具, 以英格兰西南部塔马河流域(Tamar catchment)为例, 量化其食物消费(包括播种、灌溉和施肥等环节)对本地和其他区域的能源与水资源需求, 提取影响 FEW 关联关系的关键过程, 为应对 FEW 关联关系的潜在风险提供依据^[39]。

IOA 主要是运用经济结构矩阵和 FEW 环境卫星矩阵, 定量解析 FEW 资源在经济系统中的投入与产出过程, 追踪 FEW 在产业链传递过程中形成的复杂“关联关系”^[40-41], 并对相关足迹进行结构性分解和路径解析^[42-44]。如钱明霞等以及蔡国英等人均基于假设抽取法和 IOA 剖析能源和水资源在单一区域产业部门中, 随着产品或服务流转所呈现的变化^[45-46]。同时, 学者们通过构建多区域 IO 模型, 刻画 FEW 资源效率的区域差异, 更加精确地追踪由多方贸易供应链引发的“关联关系”及其反馈效应^[47-48]。

2.2 食物-能源-水关联关系的系统模拟与优化管理

FEW 关联关系的系统模拟与优化管理涵盖了 FEW 关联关系的状态评估、FEW 在社会经济系统演化过程中的复杂变化, 以及运用系统集成的方法将 FEW 关联关系理论研究转化为实践管理的工具等内容。

FEW 关联关系的状态评估主要是建立评价指标体系, 通过指标权重衡量 FEW 在社会经济系统中的可持续发展能力和适应性^[49]。如 Willis 等人开发了“Pardee RAND Food-Energy-Water Security Index”, 即 FEW 安全指数, 用于测度国家 FEW 资源的安全性^[50]。随后, Abbott 等也采用该指数度量 166 个国家的 FEW 安全性与政治稳定性之间的关系^[51]; Schlör 等则是在联合国人居署城市繁荣指数的基础上, 构建城市“关联关系”指

数,评估全球 69 个城市和地区 FEW 关联关系发展的可持续性^[31]。而探究 FEW 资源在社会经济系统演化过程中的复杂变化,部分是借助系统动力学方法完成的。通过系统动力学模型预测社会经济系统对 FEW 资源的中长期需求,为 FEW 资源安全和生态系统可持续发展提供量化依据^[52-53]。

为进一步填补 FEW 关联关系理论研究与实践管理之间的缺口,学者们试图通过系统集成的方法,深入探究 FEW 关联关系,提出优化管理方案^[54-55]。目前主要是利用已有的工具,包括长期能源规划模型(Long-range Energy Alternatives Planning, LEAP)、水资源评价与规划模型(Water Evaluation and Planning Model, WEAP)、一般均衡模型^[56-57]以及改进的土壤-水资源评估工具(Modified Soil and Water Assessment Tool, Modified SWAT)^[2]等,对 FEW 系统演化进行模拟与分析。如 Karlberg 等使用 WEAP-LEAP 综合模型对 FEW 需求进行预测,并模拟相关政策对水资源、土地、能源与环境的影响^[58]。与此同时,一些学者和机构也针对 FEW 关联关系研究开发了一些新工具,如斯德哥尔摩皇家理工学院开发了 CLEWs 的集成模型框架,其中集成了 LEAP、WEAP 和 AEZ(Agro-Ecological Zoning—土地利用模型)等工具包^[59],用于评估 FEW 资源安全和当前政策影响^[4,60];Daher 等人开发的 WEF Nexus Tool 2.0,主要用于在线核算 FEW 及其与外部环境之间的关系,为学者们和决策者评估与确定资源分配方案提供公共平台^[61-62]。Zhang 等人基于生产系统构建的 WEFO 模型(Water, Energy and Food security nexus Optimization model)以及牛津大学开发的优化模型(Locally Integrated Production System Onion Model, LIPSOM)分别在生产成本、社会经济需求和环境约束等条件下,对 FEW 需求进行优化模拟,以期实现资源高效利用和低成本管理^[23,63]。

总之,随着 FEW 关联关系概念的发展,其研究方法也在不断增多。然而,目前的研究大多借鉴传统学科的方法量化 FEW 关联关系。虽然,一些学者初步构建了针对 FEW 生产系统、以“中心论”为基础的 FEW 资源可持续发展以及流域尺度 FEW 协同管理等方面的优化模型,但是这些理论研究与实践管理之间仍有差距,亟需开发能够将 FEW 系统与社会经济、生态环境等结合起来的模型与工具。尤其是在城市 FEW 关联关系的有效管理上,尚未有普适的模型。

3 城市食物-能源-水关联关系概念框架与研究展望

3.1 城市食物-能源-水关联关系的研究进展

国内外学者已经意识到城市 FEW 关联关系研究的重要性,并尝试开展部分研究。但当前研究成果还无法为政府管理和政策制定提供有效支持,相关成果转化仍属于“观望”阶段^[64-66]。

在核算和模拟方面,李桂君等人通过构建系统动力学模型,预测北京市未来对 FEW 需求变化,发现 2020 年 FEW 需求总量将分别超过 730 万吨、6865 万吨标煤和 38 亿吨^[67];Ramaswami 等人构建了 FEW 与城市系统的分析框架,核算 FEW 供给对城市环境的影响,并将这些影响带来的 FEW 资源供应链风险可视化^[68];Sherwood 等基于环境投入产出 LCA 模型量化美国不同城市不同行业的 FEW 强度,并将该模型应用于政府相关部门,明晰 FEW 供给关系,确保经济平稳运行^[69]。在集成管理模型方面,Leung Pah Hang 等对英国生态系统进行多目标优化设计,用于满足当地典型生态镇对 FEW 的需求^[63]。Martinez-Hernandez 等构建“关联关系”仿真系统,阐述 FEW 之间的相互关系,并建议通过调节资源供需平衡和 FEW 协同管理,保障城市生态系统安全^[70]。

3.2 城市食物-能源-水关联关系的概念框架

如前所述,FEW 关联关系是一个开放的概念。在这一基本共识的前提下,需要基于不同研究对象、不同研究目的以及不同研究尺度提出“关联关系”的概念框架。城市系统主要是从其他区域获取资源,并将其产生的资源环境影响延伸至城市边界以外的地区^[8]。城市系统对资源的高强度消耗以及自身的开放性使得 FEW 关联关系更为复杂,这就需要构建一个综合的概念框架,在保障城市发展的同时,尽可能避免城市活动引发的生态问题转嫁到其他地区。本文在国内外相关研究的基础上,从“资源依存”、“资源供给”和“系统集成”三个视角,建立城市 FEW 关联关系概念框架,试图为城市 FEW 关联关系系统解析扫清概念混乱的障碍

(图 2)。

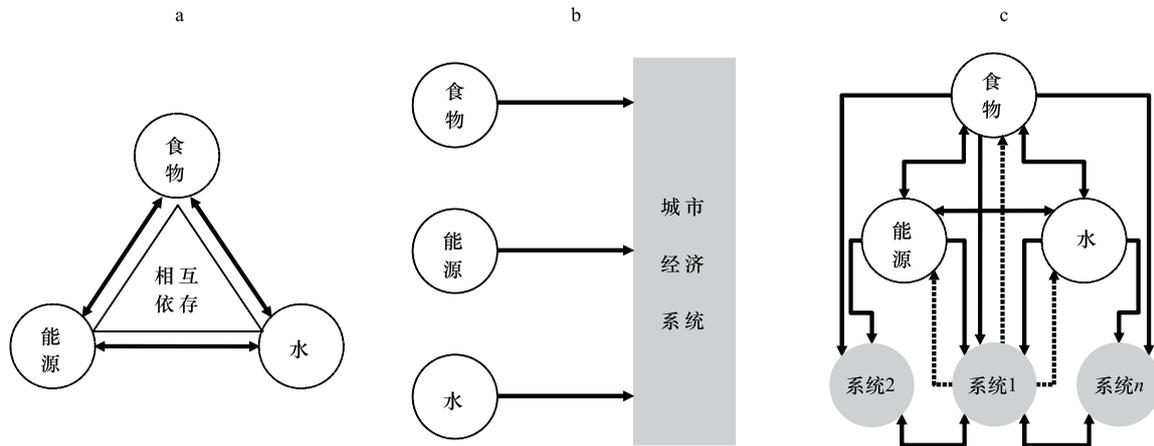


图 2 城市 FEW 关联关系概念框架示意图

Fig.2 The conceptual framework of urban FEW nexus

3.2.1 资源依存视角

资源依存视角下的城市 FEW 关联关系主要强调三者之间的相互依赖关系,即 FEW 任意一方的提取、生产、加工、运输和消费等过程中对其他两方的需求,如粮食的生产需要能源和水;能源的洗选、发电需要水的支持;同样,秸秆和食物可作为生物质能源;水资源的提取、处理和分配等过程也离不开能源。在这种视角下,城市 FEW 关联关系很大程度上反映了相关部门的技术水平和资源使用效率。FEW 资源的关联关系,可通过生命周期评价等分析方法进行定量表征(图 2a,表 2)。因此,基于资源依存视角的分析,主要目的是量化不同地区、不同时期技术经济过程对城市 FEW 关联关系的影响,提高资源使用效率,并识别 FEW 生产供应过程中形成的权衡回路。

3.2.2 资源供给视角

资源供给视角主要强调 FEW 与外部环境之间的关系,即 FEW 资源的组合方式(或比例关系)和供应稳定性对城市生态、社会和经济系统的影响(图 2b)。如城市系统中的住宿餐饮业需要食物、能源和水资源的同时投入,才能正常运行。基于资源供给视角衡量城市 FEW 关联关系,一方面可以捕捉不同生产技术和不同供给途径下,FEW 资源在支撑各行业部门发展过程中所呈现的比例关系变化;另一方面,可以揭示不同时期 FEW 资源在城市与其他区域贸易往来过程中的变化规律,为建立城市与区域资源共同体、确保城市 FEW 资源供给安全提供科学依据,从而有助于提高城市系统在面对不确定性因素干扰和未知风险时的抵御、适应和恢复能力,一般可借助于多区域投入产出模型完成(表 2)。

表 2 不同视角城市 FEW 关联关系的对比

Table 2 Comparison of urban FEW nexus in different perspectives

视角 Perspective	可采用的方法 Available methods	目的 Aim
I “资源依存”的关联关系 Resource independency	过程生命周期评价等	提高资源使用效率
II “资源供给”的关联关系 Resource provision	投入产出分析等	确保资源供给安全
III “系统集成”的关联关系 System integration	多目标优化分析等	实现资源协同管理

3.2.3 系统集成视角

如果对 FEW 资源进行系统管理,需要结合上述两种视角,从多要素、多系统和多区域集成的视角才能实现。基于系统集成视角的城市 FEW 关联关系,其目的是优化城市 FEW 关联关系,增加城市系统的弹性,促进城市生态系统可持续发展。值得注意的是,在设计城市系统集成管理方案时,既要考虑到 FEW 之间的客观联

系,又要保证任意一种资源满足可获得性、经济可行性、社会公平性以及生态系统承载力等方面的约束,尤其是污水处理、单位国内生产总值的碳排放、生活垃圾处理等环境约束条件。此外,还要兼顾 FEW 与城市、区域生态、经济系统之间的关系,以期促使城市以外更大范围的 FEW 可持续发展(图 2c,表 2)。

3.3 城市食物-能源-水关联关系的研究重点

3.3.1 城市食物-能源-水关联关系的系统性表征

随着经济发展,发达国家和越来越多新兴经济体(如中国)的城市以消费为中心。虽然学者们从不同角度对城市 FEW 关联关系进行研究,但 FEW 三者支撑城市发展过程中,其资源效率和安全的趋势、特征以及可能面临的风险尚不清楚,需要对其进行动态监测和系统性表征。如建立城市 FEW 关联关系指标体系,衡量与评估 FEW 关联关系的状态,帮助决策者及时监测城市发展状况,锁定阻碍城市可持续发展的热点问题,在不削减城市 FEW 系统复杂性的前提下,提供更为有效的政策建议^[31]。

3.3.2 城市食物-能源-水关联关系的时空演化

面对快速城镇化带来的资源消耗、废弃物排放与环境退化等问题,城市亟需转变当前的发展方式^[71]。这就需要探索 FEW 资源在城市系统中的时空演化规律,追溯 FEW 随着经济系统的变化轨迹与特点,重点关注由于城市发展引起的城市与区域之间的空间冲突(如资源需求和资源消耗高、附加值低的产业转移冲突等),为改善城市与区域的 FEW 资源管理提供依据。具体而言,可以通过长时间序列的多区域 IO 模型,一方面量化城市与区域贸易来往过程中,FEW 随产品或服务流转所体现的 FEW 资源消费变化;另一方面将这些变化呈现在空间维度上,测度 FEW 资源的时空关联关系,进而解构其时空关联特征及其影响因素。同时,还可借助于结构路径分析,识别影响 FEW 关联关系的关键部门和关键路径,为优化资源管理指明方向。另外,也可运用系统动力学模型预测未来的 FEW 需求,评估城市转型相关政策对 FEW 供给安全带来的潜在影响。

3.3.3 城市食物-能源-水关联关系的协同管理

尽管已有学者开始关注“关联关系”的优化管理,然而 FEW 关联关系理论研究与实际管理需求之间的差距较为明显^[72-73]。今后的研究不仅要关注 FEW 中任意一方的优化,更要综合考虑一方变化对其他两方的影响,试图建立集成管理的框架。在城市 FEW 关联关系优化模型中应综合考虑自身及其腹地的资源禀赋、社会经济发展阶段、产业优势、环境容量以及相关政策法规等内容,促进城市与区域一体化发展,确保整体效益的最大化^[54]。目前学者们提出的优化模型集中在提高 FEW 资源效率,而资源供给安全、城市与区域空间关联以及应对突发事件等问题在优化模型中尚未得到有效解决。

4 结论与讨论

本文梳理了 FEW 关联关系的发展历程、相关概念以及研究方法等内容,相关结论与讨论如下:

1) FEW 关联关系作为资源环境管理的新视角和新手段,依然是一个较新的理念,对其概念的界定仍然较为宽泛与模糊。总体而言,“关联关系”概念的界定涉及多尺度、多要素、多边界,才能有针对性的制定解决方案。因此,本文基于“资源依存”、“资源供给”和“系统集成”三个视角提出城市 FEW 关联关系的概念框架,充分考虑了城市系统开放性、复杂性和高度依赖外部资源输入等方面的特征,为城市 FEW 关联关系研究扫清概念混乱的障碍。

2) 城市 FEW 关联关系是一个综合、集成的概念,不仅要考虑 FEW 系统内部相互依存关系,还需考虑城市与区域之间的空间和产业关联。在城市 FEW 关联关系框架下,应进一步探讨 FEW 资源的效率与安全在城市不同发展阶段和不同供给链中所呈现的变化与特征,并在此基础上,构建 FEW 关联关系优化模型,促进城市与区域协同发展。因此,“系统性表征”、“时空演化”和“协同管理”应该成为城市 FEW 关联关系未来研究的重点领域。

3) 然而,由于城市系统较为复杂,城市 FEW 关联关系需要解决的问题仍然很多。如 FEW 资源环境影响的区域分摊问题,以及在城市管理模式和基础设施较为成熟的情况下,如何打破“路径依赖”,实现资源协同

管理。虽然城市 FEW 资源协同管理很难在短时间内实现,但至少可以在目前研究的基础上,尝试从多过程、跨系统和多区域的综合视角,构建符合城市特点的优化模型,服务于城市规划与决策实际。

参考文献 (References):

- [1] 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: FAO, 2014.
- [2] Karabulut A, Egoh B N, Lanzanova D, Grizzetti B, Bidoglio G, Pagliero L, Bouraoui F, Aloe A, Reynaud A, Maes J, Vandecasteele I, Mubareka S. Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278-292.
- [3] United States National Intelligence Council. Global Trends 2030: Alternative Worlds. US: USNIC, 2012.
- [4] 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.
- [5] United Nations. World Urbanization Prospects: The 2014 Revision Highlights. New York: UN, 2014.
- [6] Hake J F, Schlör H, Schürmann K, Venghaus S. Ethics, sustainability and the water, energy, food nexus approach—a new integrated assessment of urban systems. *Energy Procedia*, 2016, 88: 236-242.
- [7] Walker R V, Beck M B, Hall J W, Dawson R J, Heidrich O. The energy-water-food nexus: strategic analysis of technologies for transforming the urban metabolism. *Journal of Environmental Management*, 2014, 141: 104-115.
- [8] Heard BR, Miller SA, Liang S, Xu M. Emerging challenges and opportunities for the food-energy-water nexus in urban systems. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2017, 17: 48-53.
- [9] Martin-Nagle R, Howard E, Wiltse A, Duncan D. Bonn 2011 Conference The Water, Energy and Food Security Nexus——Solutions for the Green Economy. Bonn, 2011. (2018-12-1) [2018-6-15]. https://www.water-energy-food.org/fileadmin/user_upload/files/documents/bonn2011_nexussynopsis.pdf.
- [10] Hoff H. Understanding the Nexus. Background paper for the Bonn 2011 Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Bonn: SEI, 2011.
- [11] World Economic Forum. Water Security: The Water-Food-Energy-Climate Nexus. Davos: Washington, DC, 2011.
- [12] United Nations Economic Commission for Europe. Reconciling Resource Uses in Transboundary Basins: Assessment of the Water-Food-Energy-Ecosystems Nexus. Genva: UNECE, 2017.
- [13] Meadows D H, Meadows D L, Randers J, Behrens III W W. The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind. 5th ed. New York: Universe Books, 1972.
- [14] Levinson A, Rosenberg C, Yansane A. The political economy of energy and agriculture in the third world//Lockeretz W, ed. *Agriculture and Energy*. New York: Academic Press, 1977: 639-655.
- [15] Allan J A. Virtual water—the water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? *Water International*, 2003, 28(1): 106-113.
- [16] United States Department of Energy. Climate and Energy-Water-Land System Interactions. Washington: United States Department of Energy, 2012.
- [17] United Nations Economic and Social Commission for Asia and the Pacific. Water, Food and Energy Nexus in Asia and the Pacific. Bangkok: UNESCAP, 2013.
- [18] Taniguchi M, Allen D, Gurdak J J. Optimizing the water-energy-food nexus in the Asia-Pacific ring of fire. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 2013, 94(47): 435-435.
- [19] Endo A, Tsurita I, Burnett K, Orenco 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.
- [20] Mayor B, López-Gunn E, Villarroya F I, Montero E. Application of a water-energy-food nexus framework for the Duero river basin in Spain. *Water International*, 2015, 40(5/6): 791-808.
- [21] Yumkella K K, Yillia P T. Framing the water-energy nexus for the post-2015 development agenda. *Aquatic Procedia*, 2015, 5: 8-12.
- [22] Howarth C, Monasterolo I. Understanding barriers to decision making in the UK energy-food-water nexus: the added value of interdisciplinary approaches. *Environmental Science & Policy*, 2016, 61: 53-60.
- [23] 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.
- [24] Hellegers P J G J, Zilberman D, Steduto P, McCormick P G. Interactions between water, energy, food and environment: evolving perspectives and policy issues. *Water Policy*, 2008, 10(S1): 1-10.

- [25] Siddiqi A, Anadon L D. The water-energy nexus in Middle East and North Africa. *Energy Policy*, 2011, 39(8): 4529-4540.
- [26] Hamiche A M, Stambouli A B, Flazi S. A review of the water-energy nexus. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 319-331.
- [27] Al-Saidi M, Elagib N A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1131-1139.
- [28] Asian Development Bank. *Asian Water Development Outlook 2013*. Manila: Asian Development Bank, 2013.
- [29] International Renewable Energy Agency. *Renewable Energy in the Water, Energy & Food Nexus*. Abu Dhabi: IRENA, 2015.
- [30] Fang D L, Chen B. Linkage analysis for the water-energy nexus of city. *Applied Energy*, 2017, 189: 770-779.
- [31] Schlör H, Venghaus S, Hake J F. The FEW-Nexus city index-measuring urban resilience. *Applied Energy*, 2018, 210: 382-392.
- [32] White D J, Hubacek K, Feng K S, Sun L X, Meng B. The water-energy-food nexus in East Asia: a tele-connected value chain analysis using inter-regional input-output analysis. *Applied Energy*, 2018, 210: 550-567.
- [33] 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: 632-642.
- [34] 陈冬冬, 高旺盛. 近 30 年来中国农村居民食物消费的生态足迹分析. *中国农业科学*, 2010, 43(8): 1738-1747.
- [35] Roy P, Nei D, Orikasa T, Xu Q Y, Okadome H, Nakamura N, Shiina T. A review of life cycle assessment (LCA) on some food products. *Journal of Food Engineering*, 2009, 90(1): 1-10.
- [36] Ma A J, Zhao H Z, Ren F Z. Study on food life cycle carbon emissions assessment. *Procedia Environmental Sciences*, 2010, 2: 1983-1987.
- [37] Pacetti T, Lombardi L, Federici G. Water-energy nexus: a case of biogas production from energy crops evaluated by water footprint and life cycle assessment (LCA) methods. *Journal of Cleaner Production*, 2015, 101: 278-291.
- [38] Li X, Feng K S, Siu Y L, Hubacek K. Energy-water nexus of wind power in China: the balancing act between CO₂ emissions and water consumption. *Energy Policy*, 2012, 45: 440-448.
- [39] Salmoral G, Yan X Y. Food-energy-water nexus: a life cycle analysis on virtual water and embodied energy in food consumption in the Tamar catchment, UK. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 133: 320-330.
- [40] Leontief W W. Quantitative input and output relations in the economic systems of the United States. *The Review of Economics and Statistics*, 1936, 18(3): 105-125.
- [41] Zhang L X, Hu Q H, Zhang F. Input-output modeling for urban energy consumption in Beijing: dynamics and comparison. *PLoS One*, 2014, 9(3): e89850.
- [42] Chen W M, Wu S M, Lei Y L, Li S T. China's water footprint by province, and inter-provincial transfer of virtual water. *Ecological Indicators*, 2017, 74: 321-333.
- [43] Zhang B, Qu X, Meng J, Sun X D. Identifying primary energy requirements in structural path analysis: a case study of China 2012. *Applied Energy*, 2017, 191: 425-435.
- [44] Zhang P P, Zhang L X, Tian X, Hao Y, Wang C B. Urban energy transition in China: insights from trends, socioeconomic drivers, and environmental impacts of Beijing. *Energy Policy*, 2018, 117: 173-183.
- [45] 钱明霞, 路正南, 王健. 基于假设抽取法的产业部门碳排放关联分析. *中国人口·资源与环境*, 2013, 23(9): 34-41.
- [46] 蔡国英, 赵继荣. 基于假设抽取法的黑河流域中游行业用水关联分析. *生态学报*, 2015, 35(12): 4215-4223.
- [47] Liang Q M, Fan Y, Wei Y M. Multi-regional input-output model for regional energy requirements and CO₂ emissions in China. *Energy Policy*, 2007, 35(3): 1685-1700.
- [48] Huysman S, Schaubroeck T, Goralczyk M, Schmidt J, Dewulf J. Quantifying the environmental impacts of a European citizen through a macro-economic approach, a focus on climate change and resource consumption. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 124: 217-225.
- [49] Ozturk I. Sustainability in the food-energy-water nexus: evidence from BRICS (Brazil, the Russian Federation, India, China, and South Africa) countries. *Energy*, 2015, 93: 999-1010.
- [50] Willis H H, Groves D G, Ringel J S, Mao Z M, Efron S, Abbott M. *Developing the Pardee RAND Food - Energy - Water Security Index: Toward A Global Standardized, Quantitative, and Transparent Resource Assessment*. Santa Monica, CA: RAND Corporation, 2016.
- [51] Abbott M, Bazilian M, Egel D, Willis H H. Examining the food-energy-water and conflict nexus. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2017, 18: 55-60.
- [52] 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.
- [53] Halbe J, Pahl-Wostl C, Lange M A, Velonis C. Governance of transitions towards sustainable development-the water-energy-food nexus in Cyprus. *Water International*, 2015, 40(5/6): 877-894.
- [54] Veldhuis A J, Yang A D. Integrated approaches to the optimisation of regional and local food-energy-water systems. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2017, 18: 38-44.

- [55] Dai J Y, Wu S Q, Han G Y, Weinberg J, Xie X H, Wu X F, Song X Q, Jia B Y, Xue W Y, Yang Q Q. Water-energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment. *Applied Energy*, 2018, 210: 393-408.
- [56] Zhou Y C, Li H P, Wang K, Bi J. China's energy-water nexus: spillover effects of energy and water policy. *Global Environmental Change*, 2016, 40: 92-100.
- [57] Ge J P, Lei Y L. Policy options for non-grain bioethanol in China: insights from an economy-energy-environment CGE model. *Energy Policy*, 2017, 105: 502-511.
- [58] Karlberg L, Hoff H, Amsalu T, Andersson K, Binnington T, Flores-López F, de Bruin A, Gebreyohannis Gebrehiwot S, Gedif B, Johnson O, zur Heide F, Osbeck M, Young C. Tackling complexity: understanding the food-energy-environment nexus in Ethiopia's lake Tana sub-basin. *Water Alternatives*, 2015, 8(1): 710-734.
- [59] Hermann S, Rogner H H, Howells M, Young C, Fischer G, Welsch M. In the CLEW model-developing an integrated tool for modelling the interrelated effects of climate, land use, energy, and water (CLEW)//Proceedings of the 6th Dubrovnik Conference on Sustainable Development of Energy, Water and Environment Systems. Dubrovnik, Croatia: UNESCO, 2011.
- [60] Howells M, Hermann S, Welsch M, Bazilian M, Segerström R, Alfstad T, Gielen D, Rogner H, Fischer G, van Velthuisen 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(7): 621-626.
- [61] 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.
- [62] Flammini A, Puri M, Pluschke L, Dubois O. Walking the Nexus Talk: Assessing the Water-Energy-Food Nexus in the Context of the Sustainable Energy for All Initiative. Rome: FAO, 2014.
- [63] Leung Pah Hang M Y, Martinez-Hernandez E, Leach M, Yang A D. Designing integrated local production systems: a study on the food-energy-water nexus. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 135: 1065-1084.
- [64] Rasul G, Sharma B. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change. *Climate Policy*, 2016, 16(6): 682-702.
- [65] Romero-Lankao P, Gnatz D M. Conceptualizing urban water security in an urbanizing world. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 21: 45-51.
- [66] Artioli F, Acuto M, McArthur J. The water-energy-food nexus: an integration agenda and implications for urban governance. *Political Geography*, 2017, 61: 215-223.
- [67] 李桂君, 李玉龙, 贾晓菁, 杜磊, 黄道涵. 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(10): 11-26.
- [68] Ramaswami A, Boyer D, Nagpure A S, Fang A, Bogra S, Bakshi B, Cohen E, Rao-Ghorpade A. An urban systems framework to assess the trans-boundary food-energy-water nexus: implementation in Delhi, India. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(2): 025008.
- [69] 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, 12(10): 105003.
- [70] 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.
- [71] Li Y, Beeton R J S, Sigler T, Halog A. Modelling the transition toward urban sustainability: a case study of the industrial city of Jinchang, China. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 134: 22-30.
- [72] Romero-Lankao P, McPhearson T, Davidson D J. The food-energy-water nexus and urban complexity. *Nature Climate Change*, 2017, 7(4): 233-235.
- [73] Weitz N, Strambo C, Kemp-Benedict E, Nilsson M. Closing the governance gaps in the water-energy-food nexus: insights from integrative governance. *Global Environmental Change*, 2017, 45: 165-173.