

王奕佳, 刘焱序, 宋爽, 等. 水—粮食—能源—生态系统关联研究进展[J]. 地球科学进展, 2021, 36(7): 684-693. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.073. [WANG Yijia, LIU Yanxu, SONG Shuang, et al. Research progress of the Water-Food-Energy-Ecosystem nexus[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(7): 684-693. DOI: 10.11867/j.issn.1001-8166.2021.073.]

水—粮食—能源—生态系统关联研究进展*

王奕佳¹, 刘焱序^{1*}, 宋爽¹, 傅伯杰^{1,2}

(1. 北京师范大学地理科学学部, 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875;
2. 中国科学院生态环境研究中心, 城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085)

摘要:传统的水—粮食—能源关联对生态系统的支持与反馈能力考虑不足, 增加了协同保障区域水—粮食—能源安全的难度。综述了近年来国际上水—粮食—能源—生态系统关联框架的搭建, 发现有必要从生态系统服务的角度统筹水、粮食、能源等资源部门的社会治理过程。基于生态系统类型, 可分为农业、河流、森林、草地和城市生态系统的5种常见关联结构, 但目前针对森林和草原生态系统的研究相对不足。量化评估中子系统边界的确定, 关联预测中多主体对关联的影响, 整合优化中结合资源管理和生态修复是难点所在。未来可以从把握区域特征、扩充指标体系、整合模型需求和优化国土空间4个方向入手优化水—粮食—能源—生态系统关联结构, 为区域可持续发展提供整体决策依据。

关键词: 关联; 水; 粮食; 能源; 生态系统; 可持续发展

中图分类号: P963 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-8166(2021)07-0684-10

1 引言

快速的气候变化和日益增长的人类活动对资源环境造成的巨大压力使2030年全球可持续发展目标实现面临严峻挑战^[1-3]。水、粮食和能源(Water-Food-Energy, WFE)是实现区域可持续发展的核心战略资源, 三者之间的关联(nexus)是全球可持续资源管理的核心所在^[4]。SDG6(清洁饮水和卫生设施)、SDG2(零饥饿)、SDG7(经济适用的清洁能源)和SDG15(陆地生物)等目标的整体实现有赖于水—粮食—能源关联下的协同管理自然资源^[5,6]。

目前, 全球严峻的水安全、粮食安全以及能源安全问题具有明显的区域特色。用水、粮食生产和

能源提取之间的冲突在人口密集和生态脆弱的地区尤其突出。例如, 伊朗属于严重缺水的国家, 其农业扩张严重依赖地下水的抽取, 从而增加了能源的消耗, 地下水位的显著下降又导致了干旱区生态环境恶化, 不安全的水—粮食—能源的关联为当地的社会经济发展带来了更多的不确定性^[7]。审视水—粮食—能源之间的复杂关联有必要从区域资源使用的特定过程出发, 而这些复杂的过程往往以生态系统为载体, 并与生态系统服务息息相关^[8]。因此, 面向整体实现区域可持续发展, 有必要搭建水—粮食—能源—生态系统(Water-Food-Energy-Ecosystem, WFEE)的关联框架。

WFEE关联不仅描述了水、粮食和能源部门之

收稿日期: 2021-02-26; 修回日期: 2021-06-11.

* 基金项目: 国家自然科学基金项目“黄河流域人地系统耦合机理与优化调控”(编号: 42041007); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目“生态安全屏障功能与优化体系”(编号: 2019QZKK0405)资助。

作者简介: 王奕佳(1997-), 女, 广东汕头人, 博士研究生, 主要从事植被和气候相互作用与社会—生态系统研究。

E-mail: yijiaawang27@mail.bnu.edu.cn

* 通信作者: 刘焱序(1988-), 男, 陕西西安人, 讲师, 主要从事人地系统耦合与可持续发展研究. E-mail: yanxuliu@bnu.edu.cn

间的相互依赖和权衡关系^[9],并且考虑到生态系统的反馈效应^[10],寻求实现资源部门间最大协同效应的解决方案。近年来,国际学界借助WFEE框架审视环境管理和经济发展的问题和风险,讨论了不同地区的资源本底限制^[11],资源部门管理战略的失败^[12],社会—生态系统应对外界冲击的恢复力较弱^[13]等资源环境科学领域前沿问题。有观点认为,WFEE关联已经成为缓解区域WFE紧张关系的一种理论、一项工具^[14,15],甚至一门新兴的学科^[16]。然而,目前的研究多从个别区域角度去构建WFEE关联^[17,18],或者只侧重某二元要素之间的关联^[19,20],未能从多种生态系统的视角去整体审视WFEE的关联^[11]。当缺乏对生态系统的全面关注和系统保护时,区域往往难以实现水、粮食和能源的整体安全^[21]。因而有必要从不同的生态系统出发,全面梳理当前国际上WFEE关联的研究进展,以为全球可持续发展目标的实现提供理论基础和方向指引。本研究具体尝试分析以下3点内容:第一,在WFE的基础上明确WFEE的科学意义和内涵;第二,梳理国际上WFEE研究的对象、方法和不足之处;第三,讨论WFEE未来研究的重要方向。

2 水—粮食—能源—生态系统关联的意义和内涵

传统的WFE关联框架强调水、粮食和能源是实

现区域可持续发展的关键自然资源,但仅考虑三者的相互作用与协同/权衡关系并不能充分反映区域自然资源要素和社会经济发展的关系[图1(a)]。生态系统是自然资源的重要组成部分,提供大量的生态系统服务^[22],是WFE的重要来源^[23]。在日益加剧的人类活动下,水—粮食—能源需求的大幅提升加剧了生态系统的脆弱性^[24-26],降低了自然环境的自我调节和修复能力而增加了环境压力^[27,28],由此产生了资源管理的环境外部性^[29],反过来阻碍了水、粮食和能源安全。与传统的WFE关联框架不同,WFEE关联更加关注生态系统通过生态系统服务提供的关键支持功能和调节功能,强调生态系统的自然和社会经济属性^[30]。

WFEE关联框架体现了水、粮食、能源和生态系统四者密切的相互依赖关系[图1(b)],达到要素平衡需要整合生态系统服务的相关知识^[8,31]。生态系统直接对应SDG15(陆地生物)的众多子目标^[32],如SDG15.1(保护、恢复和可持续利用陆地和内陆的淡水生态系统及其服务)、SDG15.4(保护山地生态系统)和SDG15.9(把生态系统和生物多样性价值观纳入国家和地方规划、发展进程、减贫战略和核算)等。作为链接水—粮食—能源交互作用的载体,生态系统调节能力的降低可能导致不安全的水—粮食—能源关联^[33],但在目前的关联研究中属于相对缺失的一环。将生态系统纳入到WFE关联框架中,

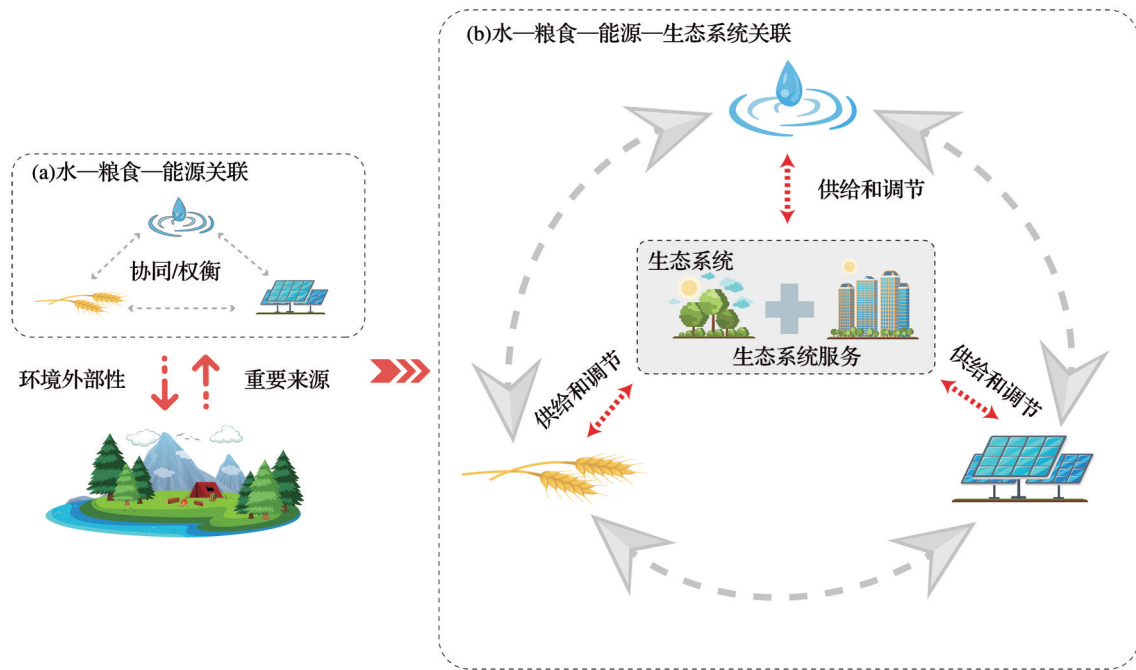


图 1 从水—粮食—能源关联(a)到水—粮食—能源—生态系统关联(b)

Fig. 1 From Water-Food-Energy nexus (a) to Water-Food-Energy-Ecosystem nexus (b)

既是对水、粮食和能源等资源要素间内在关联机制的全面审视^[22],也是从生态系统服务角度统筹资源部门的社会治理过程的客观管理需求^[34,35]。

3 水—粮食—能源—生态系统关联的研究框架差异

基于不同的生态系统类型,目前常见的WFEE研究在农业生态系统、河流生态系统、城市生态系统、森林生态系统和草地生态系统等研究对象上开展(图2)。不同的生态系统往往呈现出各具特色的WFEE关联框架和核心冲突。造成这种关联框架差异的原因在于区域可配置的自然资源本底不同,导致了人们差异化的资源利用方式,并由此产生了具有区域特色的WFEE协同与权衡关系。

水—粮食—能源—农业生态系统是WFEE关联研究中研究最充分的对象[图2(a)]。农业生态系统中WFEE关联最核心的冲突在于灌溉用水和能源生产用水的权衡关系导致了水资源的短缺^[2]。这种粮食和能源部门间的用水竞争在旱区粮食生产大国显得尤为突出^[36-38]。一些旱区发展中国家为了保障粮食生产大量消耗地表水,并以前所未有的速度开采地下水,已经带来了诸如地面沉降、水质退化和土壤侵蚀等一系列环境问题^[39]。此外,在农业生产活动中因农药、化肥和废料等造成的农田面源污染,损害了农业生态系统健康,也是WFEE关联研究重要议题^[27]。

水—粮食—能源—河流生态系统是WFEE关联研究中研究相对充分的对象[图2(b)],多见于大河流域^[40,41]。跨流域甚至跨国的综合水资源管理是此类WFEE关联的典型特征^[1]。在水—粮食—能源—河流生态系统关联中,虽然仍有一部分水资源用以分配灌溉农业所需,但水与能源的联系也很密切,引发的对生态可持续性的思考也很深刻。大多数研究案例都围绕大坝建成后的经济效益与生态、社会效益之间的权衡展开^[42],包括生物多样性的损害^[43]、生态需水量的计算^[44]和上中下游居民的福祉^[26]等。这些研究的热点区域有雅鲁藏布江流域^[45]、湄公河流域^[33]和中亚五国^[34]等。

有别于农业和河流生态系统相对丰富的WFEE关联研究,对于森林资源丰富的地区,例如亚马孙雨林,撒哈拉以南、东南亚、中南美洲等,以传统的WFEE关联模式开展研究并不合适,因为粮食生产在水—粮食—能源—森林生态系统关联中并不突出^[46]。Melo等^[21]提出了水—能源—粮食—森林生态系统关联,强调了森林景观的恢复对于维持水—能源—粮食安全的战略意义。森林生态系统对水、能源、粮食安全的贡献是多维的[图2(c)]。森林生态系统提供了水源涵养服务^[47],对淡水资源枯竭的胁迫起到了缓解作用。树木覆盖减少了当地土壤侵蚀和下游淤积,延长了大坝的使用寿命,相应地增强了当地的能源安全。同时,森林生态系统极大地满足了当地的薪柴需求,然而这种生态系统供给

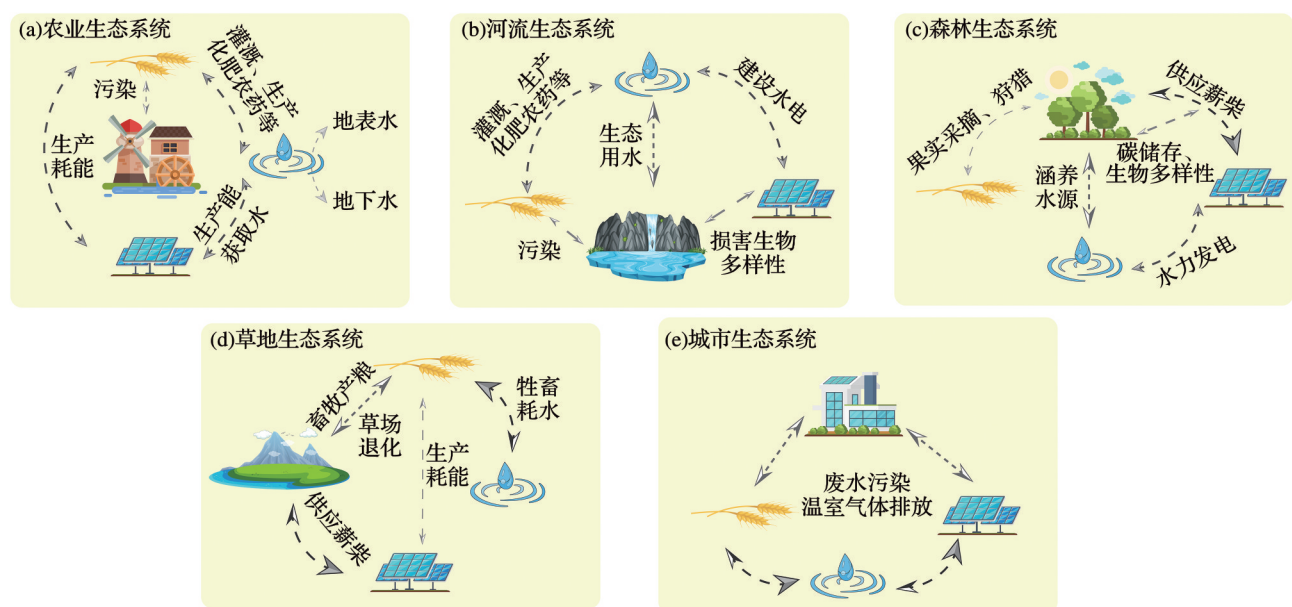


图2 不同生态系统类型的WFEE关联框架

Fig. 2 WFEE nexus framework for different ecosystem types

服务却是森林生态系统不断退化的根本原因,表现为碳储存能力的下降和生物多样性的丧失^[21]。此外,果实采摘、放牧和狩猎也是森林生态系统供应粮食的常见方式^[48]。因此,增强水—能源—粮食—森林生态系统关联的协同效应核心还是在于恢复森林,支持地方社区参与和达成基于自然的解决方案^[21]。

WFEE框架在草地生态系统也进行了一些研究应用,尤其像亚洲^[49]和热带地区^[48]等有大片草原的区域。基于不同的自然资源本底和资源利用方式,“粮食”的范围更加广泛,包括肉类和奶类产品。以牲畜放牧为主的粮食获取方式是水—粮食—能源—草地生态系统关联框架中的关键路径[图2(d)]。然而大规模的食草牲畜生产往往需要消耗牧草和谷物以满足对快速增长的对肉制品和乳制品的需求,耗费了大量的水和能源,损害了土壤,导致草地生态系统出现长期大规模的生态退化^[49]。除放牧以外,热带地区的一部分草地生态系统还能通过薪柴供应为当地提供能源,从而形成WFEE的关联^[48]。

随着全球范围内城市化进程的加速,关于水—粮食—能源—城市生态系统关联的研究日益增加[图2(e)],研究尺度大多为城市和社区尺度^[18]。城市化对环境和人类福祉的影响是综合的^[50]。虽然城市与生态系统服务的直接联系不如上述4类生态系统,然而城市具有人口密度大、对资源和生产的产品需求高,但自我调节能力较弱的特点^[51]。因此水—粮食—能源—城市生态系统关联中存在远程耦合,也就是城市系统利用城市物质边界之外的粮食、能源和水资源,以致产生超出城市边界的综合和复杂环境影响^[52]。同时,城市作为人工化程度相当高的生态系统,拥有实施创新系统以改善可持续性的优势。比如,绿色屋顶与传统的屋顶相比,既能存储雨水、减轻供水系统的压力,又能恢复植被、减少城市的碳足迹^[53];又如,对于人口数量多的越南、斯里兰卡、菲律宾和印度尼西亚等发展中国家的大型城市而言,废水的再利用是解决城市水危机的必要手段^[50]。

总之,基于传统WFE关联视角的研究多围绕关联研究成果的推广^[54]、部门决策的制定^[1]以及部门的治理活动^[55,56]展开,当加入生态系统视角后,WFEE关联研究对于单一生态系统中WFE关联的剖析更加深入,但对复合生态系统WFEE关联的研究仍然不足。同时,不管是对单一还是复合生态系

统的WFEE研究,大多数分析依然停留在非空间的、静态的视角,对WFEE时空动态过程的表达相对薄弱。

4 水—粮食—能源—生态系统关联的研究方法

为了梳理WFEE关联研究的特点,我们检索并筛选了有别于传统WFE关联研究,更关注生态系统的支持和调节功能的案例。检索筛选时注意筛选案例的时间范围是否跨度广、方法类型是否丰富,最后筛选出27例具代表性的案例(图3)。通过整理近年来关于WFEE关联的27处研究案例,可以发现农业生态系统和河流生态系统研究相对多,关于森林生态系统和草地生态系统的研究尚较为薄弱。国内少数案例围绕区域、流域展开,并没有着眼于某一类生态系统^[57-60]。总体上,WFEE研究方法呈现的发展轨迹为:①从注重因果关系映射的定性研究到明确要素间复杂关联的定量研究;②从仅考虑二元要素间关系转向构建多元要素间的关联;③从单一变化过程的统计分析到耦合自然过程与人为调控的建模。为了更好地描述WFEE研究方法的演化逻辑与现状、不足,将WFEE关联的研究方法递进分成“量化评估—关联预测—整合优化”3类进行介绍。

在27个研究案例中,有11个案例属于量化评估,借助WFEE关联框架搭建不同自然资源的量化桥梁。常见的量化评估模式有资源—环境足迹量化^[37,61,62]和投入产出模型^[38,52]等,其中生命周期分析方法应用最为广泛,用于量化给定产品或过程在其整个生命周期的环境影响^[16],生态系统服务是描述可持续性的重要指标^[63]。这一系列量化评估工作虽然往往不是基于过程的,但却是WFEE关联描述的基础工作,为后续的情景分析与决策治理提供了现状依据。然而,上述评价方法常常无法捕捉到水、粮食和能源之间的相互作用,子系统边界的确定仍然是难点所在。

关联预测工作是在量化评估的基础上,模拟预测在特定情景下,水、粮食和能源等关键资源的消耗情况,以及对生态环境乃至社会环境的影响是否可持续,也是图3中列举的7个关联预测研究案例的共同特点。此类研究能够考虑到生态系统的系统属性,用过程视角去评估区域在获取和利用水、粮食、能源资源以满足自身需求时对生态系统可能造成的影响,使用的模型有鱼类迁移生态模型^[43]、

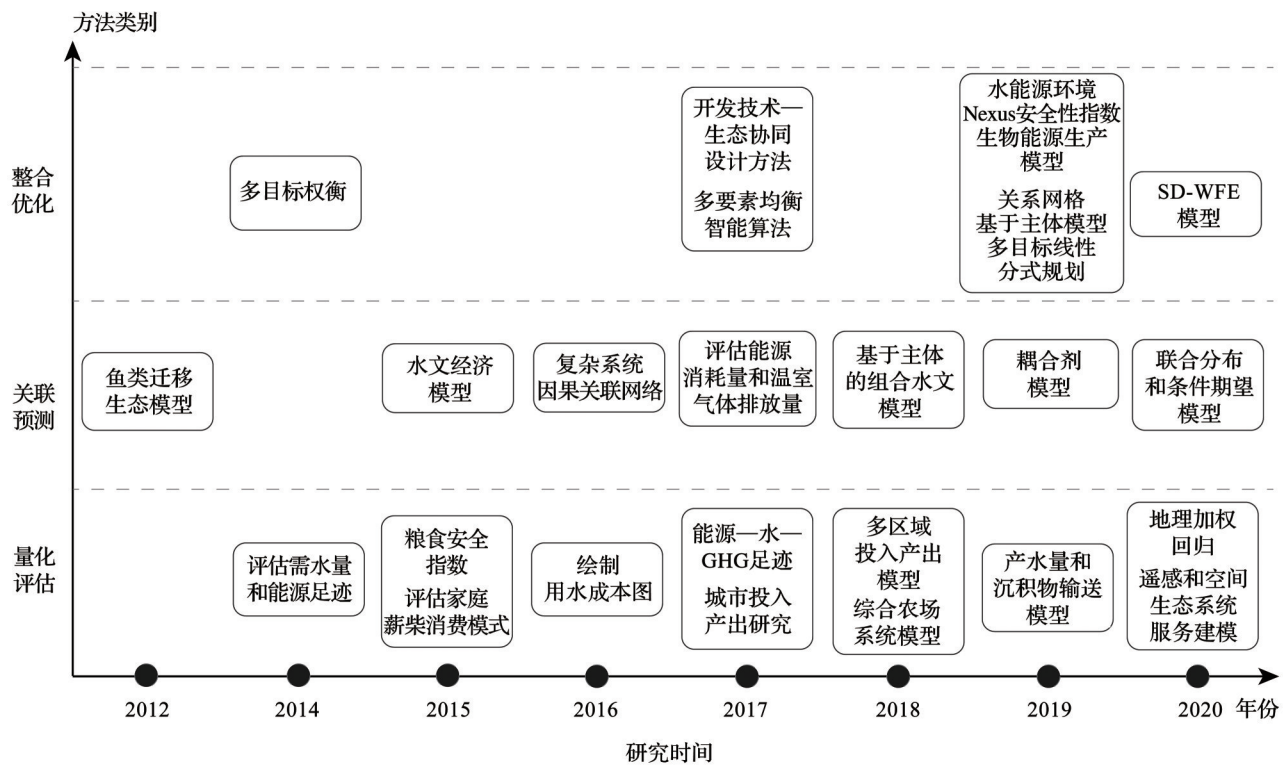


图3 依据27个WFEE案例整理的研究方法比较

Fig. 3 Comparison of research methods based on 27 WFEE cases

水文经济模型^[64]、基于主体的组合水文模型^[65]、耦合剂模型^[26]、联合分布与条件期望模型^[66]等。此外,人类行为即利益相关者的个体行为也受到关注,逐渐被纳入模型中^[26,65]。然而这类模型对社会数据有更高的要求,个体行为的多样性也为资源需求和人类行为的量化描述带来了定义和计算的挑战。

WFEE关联的整合优化研究尝试回答的是“给出一个最佳的管理方案”的问题。“整合”的是WFEE关联中子要素的相互作用与区域发展的需求,“优化”的是核心关键资源的使用方式和利用效率,以求达到水、粮食、能源和生态系统的协同关系最大化。与量化评估和关联预测相比,整合优化研究更多地考虑社会、经济和生态等多方面的治理绩效。图3整合优化研究案例的研究年份分布集中于2019年之后,研究途径有多目标权衡^[67,68]、综合环境指数、自然过程与人类活动耦合模型等。多目标权衡明确了政策和投资的收益(包括经济利润和生态系统服务价值)和损失(包括对生态系统服务的损害)^[67,68]。综合指数法通过整合多个指标来呈现关联系统的整体属性,有利于综合描述社会—生态系统的各种特征。例如建立水能源环境关联安全性指数(Water-Energy-Environment Nexus Security Index,

WEENSI),通过提高资源安全指数来提高水和能源组合的安全性^[39]。自然过程与人为活动耦合模型既有自下而上的基于主体建模(Agent-Based, Model, ABM),也有自上而下的系统动力学模型(System Dynamics Model, SDM)。ABM框架将个体(如农户)、调节剂(如监管机构)和环境分成3类主体,在理解主体行为和相互作用的基础上提出修复生态系统的最佳资源利用模式^[69]。基于因果反馈机制的SDM框架则有助于识别限制系统可持续性的关键因素,并理解系统的反馈路径,从而提供特定情景下最优的系统结构^[70]。虽然WFEE的整合优化能够在计量层面给出WFEE协同关系最大化的方案,但是在落实中还是要回归到生态系统的实地修复和治理措施,这往往是模型输出结果“落地”的难点。

5 水—粮食—能源—生态系统关联的未来可能研究方向

基于上述对全球WFEE关联研究的梳理,目前的研究不足表现为:在区域尺度上对WFEE关联时空动态的计量精度相对有限;没有充分挖掘生态系统服务等指标在识别关联关系和阈值方面的潜力;

研发的模型对特定区域主导类型生态系统 WFE 关联的适配性较弱;从关联研究成果转变为资源部门治理成果依然存在差距明显的治理缺口。基于此,本研究从“类”、“时”、“空”、“量”和“效”5个环节,讨论在未来研究中如何增强 WFEE 关联协同作用。“类”指的是对不同的 WFEE 关联进行分类识别,明确特定的生态系统对应怎样的 WFE 关联,做到把握结构特征、识别关键指标、发展适配模型和分类优化管理。“时”则是针对 WFEE 的动态变化,在获得长时间序列数据的基础上,勾勒结构动态、刻画演化模式、预判发展方向以及实时反馈治理。“空”代表 WFEE 关联研究的空间尺度,要求研究者在后续的 WFEE 研究中尽量实现摸清区域本底、明确空间格局、考虑缓冲邻域以及献策空间治理。“量”强调对 WFEE 关联的定量研究的重要性,是预测模拟和整合优化的基础,未来还需往明确区域限制、测定指标阈值、耦合多重路径和评估资源承载方向努力。“效”力求 WFEE 关联研究能够落地,能够增强区域可持续性、评估关联效果、输出优化情景并助力提升福祉。以上 5 个环节如何具体应用,还需要从把握区域特征、扩充指标体系、整合模型需求和优化国土空间 4 个方面进行讨论(图 4)。

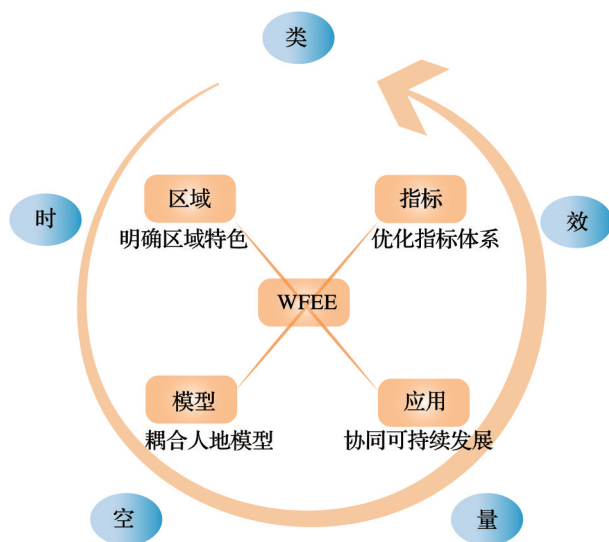


图 4 增强 WFEE 关联协同作用的研究展望
Fig. 4 Research perspectives for enhancing WFEE nexus synergy

在区域方面,应分类识别区域主导生态系统类型的 WFE 关联结构,找到可能损害水、粮食和能源安全的核心冲突,明确阻碍区域水、粮食、能源资源供应、使用与消费稳定性的核心障碍。扩展研究的时间尺度,揭示区域生态系统变化下 WFE 的动态响

应。空间上融入生态系统服务流动视角认识关联的源和汇,例如生态系统服务流动方向的识别、生态系统服务投入产出的空间绘制^[44,71]。明确生态系统约束下的 WFE 开发限制量,保障资源利用上限和生态环境底线下的可持续性。治理的成效着眼于区域 WFEE 关联对于可持续发展目标达成的贡献。

在指标方面,对不同生态系统类型的 WFE 关联应分类明确生态系统服务评价指标,在考虑资源子系统相互关系的基础上,需要重视生态系统调节服务评估的价值化能力,基于生态系统服务需求进行生态资产核算。选取的指标应能够较为敏感地捕捉到子要素相互关系的动态变化强度和方向,以刻画 WFEE 系统的演化状态。同时明确区域主导生态系统类型的 WFE 关联空间布局,在认识关联子系统的空间边界时需要统一数据指标的空间统计口径。制定 WFEE 关联优化目标时,必须考虑特定区域的资源环境承载力,加强对阈值性指标的评估。选取此类指标时要考虑到时间和空间尺度。比如计算大坝开发中保障生态安全的用水量时,既要考虑按月和年时间尺度设定的用水量对发电或灌溉用水量的影响差异,又要考虑对下游生态系统和河流流量产生的长短期影响。最后,设定能够反映优化效果的评估指标,例如增加自然对人类贡献(Nature's Contributions to People, NCP)的表达,理解自然界要素和过程(包括生物多样性、生态系统及其相关的生态和进化过程等)对人类生活质量积极和消极的贡献^[72],通过计算优化后 NCP 的变化来评估 WFEE 调整的整体效果。

在模型方面,应针对不同生态类型 WFE 关联途径的差异,选择发展适用于特定生态系统的 WFEE 关联模型,具体包括偏重自然、经济还是耦合模型,分析角度是自上而下还是自下而上,耦合方向是单向还是双向。模型的研发是否能够实现时间上的自组织迭代,把握预测 WFEE 关联系统的发展动向。同时,模型模拟的分析尺度不应局限于研究区的本底范围,还需考虑缓冲邻域,甚至远程耦合区域的相互作用。在确保数据时空尺度同步的基础上,输入模型的指标既要指向资源的物理代谢路径,又要指向机构和社会经济路径^[73]。依据执行目标的优先级别和制定调控的治理措施,输出可供优化的情景^[74]。

在应用方面,从加速区域可持续发展、提升人类福祉的目标出发,整合优化 WFEE 关联可以服务自然资源的统一管理、国土空间的优化治理,以及

国民经济发展计划的制定等。在基于 WFEE 分类识别的成果上,需要进一步明确生态系统的退化驱动机制,以缓和水、粮食和能资源利用与生态保护之间的具体矛盾为导向,创建农、林、牧、水利、能源和生态保护的协作途径。依据多目标优化的情景模拟模型结果,针对未来气候变化和灾害风险制定动态适应的治理策略。探索耦合 WFEE 关联的国土空间治理相关规划,提升国土空间资源管理、生态修复的协同性和系统性^[75]。将基于 WFEE 关联计算的区域资源开发阈值结果应用于明确区域资源环境承载力的评估,助力国民经济发展规划目标的制定。总之,以 WFEE 关联为抓手,贯通要素—格局—过程—服务—福祉级联链条^[76],找到自然资源全要素管理下的可持续发展目标协同实现之路,拓展研究成果服务国家经济社会发展的重要应用价值,是未来 WFEE 关联研究从科学走向决策的关键路径。

参考文献(References) :

- [1] RASUL G, SHARMA B. The nexus approach to water-energy-food security: an option for adaptation to climate change [J]. *Climate Policy*, 2016, 16(6): 682-702.
- [2] TIAN H, LU C, PAN S, et al. Optimizing resource use efficiencies in the food-energy-water nexus for sustainable agriculture: from conceptual model to decision support system [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2018, 33: 104-113.
- [3] PRITCHARD H D. Asia's shrinking glaciers protect large populations from drought stress [J]. *Nature*, 2019, 569 (7 758) : 649-654.
- [4] LIU J, HULL V, GODFRAY H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development [J]. *Nature Sustainability*, 2018, 1(9): 466-476.
- [5] FU B. Promoting geography for sustainability [J]. *Geography and Sustainability*, 2020, 1(1): 1-7.
- [6] PENG J, HU Y, DONG J, et al. Linking spatial differentiation with sustainability management: academic contributions and research directions of physical geography in China [J]. *Progress in Physical Geography: Earth and Environment*, 2020, 44 (1): 14-30.
- [7] MIRZAEI A, SAGHAFIAN B, MIRCHI A, et al. The ground-water-energy-food nexus in Iran's agricultural sector: implications for water security [J]. *Water, Multidisciplinary Digital Publishing Institute*, 2019, 11(9): 1 835.
- [8] HANES R J, GOPALAKRISHNAN V, BAKSHI B R. Including nature in the food-energy-water nexus can improve sustainability across multiple ecosystem services [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 137: 214-228.
- [9] KURIAN M. The water-energy-food nexus: trade-offs, thresholds and transdisciplinary approaches to sustainable development [J]. *Environmental Science & Policy*, 2017, 68: 97-106.
- [10] RINGLER C, BHADURI A, LAWFORD R. The nexus across Water, Energy, Land and Food (WELF): potential for improved resource use efficiency? [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2013, 5(6): 617-624.
- [11] ISHIMASTU T, DOUFENE A, ALAWAD A, et al. Desalination network model driven decision support system: a case study of Saudi Arabia [J]. *Desalination*, 2017, 423: 65-78.
- [12] HOWELLS M, HERMANN S, WELSCH M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies [J]. *Nature Climate Change*, 2013, 3(7): 621-626.
- [13] SCHLÖR H, VENGHAUS S, HAKE J-F. The FEW-Nexus City index—measuring urban resilience [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 382-392.
- [14] BAZILIAN M, ROGNER H, HOWELLS M, et al. Considering the energy, water and food nexus: towards an integrated modelling approach [J]. *Energy Policy*, 2011, 39(12): 7 896-7 906.
- [15] BLEISCHWITZ R, SPATARU C, VANDEVEER S D, et al. Resource nexus perspectives towards the United Nations Sustainable Development Goals [J]. *Nature Sustainability, Nature Publishing Group*, 2018, 1(12): 737-743.
- [16] ZHANG C, CHEN X, LI Y, et al. Water-energy-food nexus: concepts, questions and methodologies [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2018, 195: 625-639.
- [17] ENDO A, TSURITA I, BURNETT K, et al. A review of the current state of research on the water, energy, and food nexus [J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2017, 11: 20-30.
- [18] ZHANG P, ZHANG L, CHANG Y, et al. Food-Energy-Water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 215-224.
- [19] D'ODORICO P, DAVIS K F, ROAS L, et al. The global food-energy-water nexus [J]. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(3): 456-531.
- [20] ZHANG Zongyong, LIU Junguo, WANG Kai, et al. A review and discussion on the water-food-energy nexus: bibliometric analysis [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(16): 1 569-1 580. [张宗勇, 刘俊国, 王凯, 等. 水—粮食—能源关系统述评: 文献计量及解析 [J]. *科学通报*, 2020, 65(16): 1 569-1 580.]
- [21] MELO F P L, PARRY L, BRANCALION P H S, et al. Adding forests to the water-energy-food nexus [J]. *Nature Sustainability*, 2020, 4(2): 85-92.
- [22] BELL A, MATTHEWS N, ZHANG W. Opportunities for improved promotion of ecosystem services in agriculture under the water-energy-food nexus [J]. *Journal of Environmental Studies and Sciences*, 2016, 6(1): 183-191.
- [23] VANHAM D. Does the water footprint concept provide relevant information to address the water-food-energy-ecosystem nexus? [J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 298-307.
- [24] LU Y, JENKINS A, FERRIER R C, et al. Addressing China's

- grand challenge of achieving food security while ensuring environmental sustainability[J]. *Science Advances, American Association for the Advancement of Science*, 2015, 1(1): e1400039.
- [25] FASEL M, BRÉTHAUT C, ROUHOLAHNEJAD E, *et al.* Blue water scarcity in the Black Sea catchment: identifying key actors in the water-ecosystem-energy-food nexus[J]. *Environmental Science & Policy*, 2016, 66: 140-150.
- [26] YANG J, YANG Y C E, CHANG J, *et al.* Impact of dam development and climate change on hydroecological conditions and natural hazard risk in the Mekong River Basin[J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 579: 124177.
- [27] GARCIA D J. Considering agricultural wastes and ecosystem services in food-energy-water-waste nexus system design[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 228: 941-955.
- [28] CAI Yunlong. Socio-economic perspectives on ecological problems[J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(7): 742-749. [蔡运龙. 生态问题的社会经济检视[J]. 地球科学进展, 2020, 35(7): 742-749.]
- [29] KATTELUS M, RAHAMAN M M, VARIS O. Myanmar under reform: emerging pressures on water, energy and food security[J]. *Natural Resources Forum*, 2014, 38(2): 85-98.
- [30] AL-SAIDI M, ELAGIB N A. Towards understanding the integrative approach of the water, energy and food nexus[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 574: 1 131-1 139.
- [31] HÜLSMANN S, SUŠNIK J, RINKE K, *et al.* Integrated modelling and management of water resources: the ecosystem perspective on the nexus approach[J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2019, 40: 14-20.
- [32] REYERS B, SELIG E R. Global targets that reveal the social-ecological interdependencies of sustainable development [J]. *Nature Ecology & Evolution*, 2020, 4(8): 1 011-1 019.
- [33] SMAJGL A, WARD J, PLUSCHKEI L. The water-food-energy nexus-realising a new paradigm[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 533: 533-540.
- [34] DE GRENADE R, HOUSE-PETERS L, SCOTT C, *et al.* The nexus: reconsidering environmental security and adaptive capacity [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2016, 21: 15-21.
- [35] EVERARD M. Managing socio-ecological systems: who, what and how much? The case of the Banas river, Rajasthan, India [J]. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 2020, 44: 16-25.
- [36] AL-BAKRI J T, SALAHAT M, SULEIMAN A, *et al.* Impact of climate and land use changes on water and food security in Jordan: implications for transcending "the tragedy of the commons"[J]. *Sustainability (Switzerland)*, 2013, 5(2): 724-748.
- [37] DACCACHE A, CIURANA J S, DIAZ J A R, *et al.* Water and energy footprint of irrigated agriculture in the Mediterranean region[J]. *Environmental Research Letters*, 2014, 9(12): 124014.
- [38] CHEN B, HAN M Y, PENG K, *et al.* Global land-water nexus: agricultural land and freshwater use embodied in worldwide supply chains[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 613/614: 931-943.
- [39] YAZDANDOOST F, YAZDANI S A. A new integrated portfolio based water-energy-environment nexus in wetland catchments[J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(9): 2 991-3 009.
- [40] GAIN A K, GIUPPONI C, WADA Y. Measuring global water security towards sustainable development goals [J]. *Environmental Research Letters*, 2016, 11(12): 124015.
- [41] ZENG R, CAI X, RINGLER C, *et al.* Hydropower versus irrigation—an analysis of global patterns [J]. *Environmental Research Letters*, 2017, 12(3): 034006.
- [42] JALILOV S-M, AMER S A, WARD F A. Water, food, and energy security: an elusive search for balance in Central Asia [J]. *Water Resources Management*, 2013, 27(11): 3 959-3 979.
- [43] ZIV G, BARAN E, NAM S, *et al.* Trading-off fish biodiversity, food security, and hydropower in the Mekong River Basin [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2012, 109(15): 5 609-5 614.
- [44] KARABULUT A, EGOH B N, LANZANOVA D, *et al.* Mapping water provisioning services to support the ecosystem-water-food-energy nexus in the Danube river basin[J]. *Ecosystem Services*, 2016, 17: 278-292.
- [45] YANG Y C E, WI S, RAYA P A, *et al.* The future nexus of the Brahmaputra River Basin: climate, water, energy and food trajectories[J]. *Global Environmental Change*, 2016, 37: 16-30.
- [46] SPECHT M J, PINTO S R R, ALBUQUERQUEI U P, *et al.* Burning biodiversity: fuelwood harvesting causes forest degradation in human-dominated tropical landscapes [J]. *Global Ecology and Conservation*, 2015, 3: 200-209.
- [47] MULLIGAN M, VAN SOESBERGEN A, HOLE D G, *et al.* Mapping nature's contribution to SDG 6 and implications for other SDGs at policy relevant scales[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2020, 239: 111671.
- [48] MWAMPAMBA T H, VAN SCHAİK N L M B, CASTILLO Hernandez L A. Incorporating ecohydrological processes into an analysis of charcoal-livestock production systems in the tropics: an alternative interpretation of the water-energy-food nexus [J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2018, 6: 99.
- [49] QI J, XIN X, JOHN R, *et al.* Understanding livestock production and sustainability of grassland ecosystems in the Asian Dryland Belt[J]. *Ecological Processes*, 2017, 6(1): 22.
- [50] KOOKANA R S, DRECHSEL P, JAMWAL P, *et al.* Urbanisation and emerging economies: issues and potential solutions for water and food security[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 732: 139057.
- [51] ARTHUR M, LIU G, HAO Y, *et al.* Urban food-energy-water nexus indicators: a review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 151: 104481.
- [52] HEARD B R, MILLER S A, LIANG S, *et al.* Emerging challenges and opportunities for the food-energy-water nexus in urban systems [J]. *Current Opinion in Chemical Engineering*, 2017, 17: 48-53.
- [53] CRISTIANO E, DEIDDA R, VIOLA F. The role of green

- roofs in urban water-energy-food-ecosystem nexus: a review [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 756: 143876.
- [54] BIGGS E M, BRUCE E, BORUFF B, *et al.* Sustainable development and the water-energy-food nexus: a perspective on livelihoods [J]. *Environmental Science & Policy*, 2015, 54: 389-397.
- [55] WEITZ N, STRAMBO C, KEMP-BENEDICT E, *et al.* Closing the governance gaps in the water-energy-food nexus: insights from integrative governance [J]. *Global Environmental Change*, 2017, 45: 165-173.
- [56] ZHANG P, ZHANG L, CHANG Y, *et al.* Food-Energy-Water (FEW) nexus for urban sustainability: a comprehensive review [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 142: 215-224.
- [57] LI Guijun, LI Yulong, JIA Xiaoqing, *et al.* Establishment and simulation study of system dynamic model on sustainable development of water-energy-food nexus in Beijing [J]. *Management Review*, 2016, 28(10): 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[J]. 管理评论, 2016, 28(10): 11-26.]
- [58] PENG Shaoming, ZHENG Xiaokang, WANG Yu, *et al.* Study on water-energy-food collaborative optimization for Yellow River Basin [J]. *Advances in Water Science*, 2017, 28(5): 681-690. [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[J]. 水科学进展, 2017, 28(5): 681-690.]
- [59] BAI Jingfeng, ZHANG Haijun. Spatio-temporal variation and driving force of Water-Energy-Food pressure in China [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2018, 38(10): 1 653-1 660. [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[J]. 地理科学, 2018, 38(10): 1 653-1 660.]
- [60] SUN Jie, XIE Xiaoshuang. Estimation of Water-Energy-Food (WEF) servicing values based on a case study on Guizhou Province [J]. *Resources & Industries*, 2020, 22(5): 37-47. [孙杰, 解小爽. “水—能源—粮食”服务价值核算研究——以贵州省为例[J]. 资源与产业, 2020, 22(5): 37-47.]
- [61] SAIDMAMATOV O, RUDENKO I, PFISTER S, *et al.* Water-energy-food nexus framework for promoting regional integration in Central Asia [J]. *Water*, 2020, 12(7): 1896.
- [62] ROJAS-DOWNING M M, NEJASHEMI A P, ELAHI B, *et al.* Food footprint as a measure of sustainability for grazing dairy farms [J]. *Environmental Management*, 2018, 62(6): 1 073-1 088.
- [63] YUAN M H, LO S L. Ecosystem services and sustainable development: perspectives from the food-energy-water nexus [J]. *Ecosystem Services*, 2020, 46: 101217.
- [64] ZARFL C, LUMSDON A E, BERLEKAMP J, *et al.* A global boom in hydropower dam construction [J]. *Aquatic Sciences*, 2015, 77(1): 161-170.
- [65] YANG J, YANG Y C E, KHAN H F, *et al.* Quantifying the sustainability of water availability for the water-food-energy-ecosystem nexus in the Niger River Basin [J]. *Earth's Future*, 2018, 6(9): 1 292-1 310.
- [66] CHEN L, HUANG K, ZHOU J, *et al.* Multiple-risk assessment of water supply, hydropower and environment nexus in the water resources system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 268: 122057.
- [67] 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 [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2014, 18(8): 3 259-3 277.
- [68] NIU G, ZHENG Y, HAN F, *et al.* The nexus of water, ecosystems and agriculture in arid areas: a multiobjective optimization study on system efficiencies [J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 223: 105697.
- [69] NOURI A, SAGHAFIAN B, DELAVAR M, *et al.* Agent-based modeling for evaluation of crop pattern and water management policies [J]. *Water Resources Management*, 2019, 33(11): 3 707-3 720.
- [70] RAVAR Z, ZAHRAIE B, SHARIFINEJAD A, *et al.* System dynamics modeling for assessment of water-food-energy resources security and nexus in Gavkhuni Basin in Iran [J]. *Ecological Indicators*, 2020, 108: 105682.
- [71] FU Bojie, LIU Yanxu. The theories and methods for systematically understanding land resource [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2021(4): 1-8. [傅伯杰, 刘焱序. 系统认知土地资源的理论与方法[J]. 科学通报, 2019, 64(21): 2 172-2 179.]
- [72] DÍAZ S, PASCUAL U, STENSEKE M, *et al.* Assessing nature's contributions to people [J]. *Science*, 2018, 359(6 373): 270-272.
- [73] TAHERZADEH O, BITHELL M, RICHARDS K. When defining boundaries for nexus analysis, let the data speak [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2018, 137: 314-315.
- [74] ZHENG Minggui, Li Qi. Scenario prediction of China's oil resource demand in 2020-2030 [J]. *Advances in Earth Science*, 2020, 35(3): 286-296. [郑明贵, 李期. 中国2020—2030年石油资源需求情景预测[J]. 地球科学进展, 2020, 35(3): 286-296.]
- [75] PENG Jian, LÜ Danna, DONG Jianquan, *et al.* Processes coupling and spatial integration: characterizing ecological restoration of territorial space in view of landscape ecology [J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(1): 3-13. [彭建, 吕丹娜, 董建权, 等. 过程耦合与空间集成: 国土空间生态修复的景观生态学认知[J]. 自然资源学报, 2020, 35(1): 3-13.]
- [76] PENG Jian, LI Bing, DONG Jianquan, *et al.* Basic logic of territorial ecological restoration [J]. *Chinese Land Sciences*, 2020, 34(5): 18-26. [彭建, 李冰, 董建权, 等. 论国土空间生态修复基本逻辑[J]. 中国土地科学, 2020, 34(5): 18-26.]

Research Progress of the Water-Food-Energy-Ecosystem Nexus*

WANG Yijia¹, LIU Yanxu^{1*}, SONG Shuang¹, FU Bojie^{1,2}

(1. *State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China*; 2. *State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*)

Abstract: Traditional Water-Food-Energy (WFE) nexus lacks consideration of the support and feedback capacity of ecosystems, which makes it difficult to guarantee a coordinated regional water-food-energy security. Based on a review of recent international frameworks for Water-Food-Energy-Ecosystem (WFEE) nexus construction, we found that there was a need to integrate the social governance processes of water, food and energy resource sectors from the perspective of ecosystem services. On the basis of different ecosystem types, the common WFEE nexus can be classified into five ecosystems: agriculture, river, forest, grassland, and urban. There is a relative lack of research on forest and grassland ecosystems. In terms of research methods, the research difficulties are the determination of subsystem boundaries in quantitative assessment, the influence of multiple subjects on the nexus in prediction, and the combination of resource management and ecological restoration in integration and optimization. With the goal of optimizing the WFEE nexus structure and providing an overall decision basis for regional sustainable development, future research can focus on four aspects: grasping the regional characteristics, expanding the index system, integrating the model requirements, and optimizing the national space.

Key words: Nexus; Water; Food; Energy; Ecosystem; Sustainable development.

* **Foundation item:** Project supported by the National Natural Science Foundation of China "Mechanisms of human-natural system coupling and optimization of the Yellow River Basin" (Grant No. 42041007); The Second Tibetan Plateau Scientific Expedition and Research Program "Ecological security barrier function and optimization system" (Grant No. 2019QZKK0405).

First author: WANG Yijia (1997-), female, Shantou City, Guangdong Province, Ph.D student. Research areas include vegetation and climate interactions and social-ecological systems. **E-mail:** yijiawang27@mail.bnu.edu.cn

Corresponding author: LIU Yanxu (1988-), male, Xi'an City, Shaanxi Province, Lecturer. Research areas include integrated physical geography and landscape ecology. **E-mail:** yanxuli@bnu.edu.cn