科学通报 2021 年 第 66 卷 第 26 期: 3426 ~ 3440
评 述
《中国科学》杂志社
SCIENCE CHINA PRESS

面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望

张超[1,2], 刘蓓蓓[3,4], 李楠[5,6,7], 汪鹏[5,6], 陈楚珂[5,6,7], 陈伟强[5,6,7*], 张力小[8], 刘俊国[9], 吕永龙[10,11]

1. 同济大学经济与管理学院, 上海 200092;
2. 联合国环境署-同济大学环境与可持续发展学院, 上海 200092;
3. 南京大学环境学院, 污染控制与资源化研究国家重点实验室, 南京 210023;
4. 南京大学-约翰斯·霍普金斯大学中美文化研究中心, 南京 210093;
5. 中国科学院城市环境研究所, 中国科学院城市环境与健康重点实验室, 厦门 361021;
6. 厦门市城市代谢重点实验室, 厦门 361021;
7. 中国科学院大学, 北京 100049;
8. 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;
9. 南方科技大学环境科学与工程学院, 深圳 518055;
10. 厦门大学环境与生态学院, 厦门 361102;
11. 中国科学院生态环境研究中心, 北京 100085

* 联系人, E-mail: wqchen@iue.ac.cn

2020-09-20 收稿, 2020-12-28 修回, 2020-12-29 接受, 2020-12-31 网络版发表
国家重点研发计划(2017YF0505703)、国家自然科学基金委员会-联合国环境规划署合作研究项目(71961147003)和国家自然科学基金(71874078)资助

摘要 中国传统文化认为“金、木、水、火、土”五行相生相克, 这是最早描述物质要素之间相互关联的系统性学说. 在现代科学语境中, 支撑和制约可持续发展的关键自然资源主要包括矿产资源、生物质资源、水资源、能源和土地资源, 大致与“五行”对应. 它们之间存在广泛的依赖、替代、竞争和互补关系. 近10年来, 全球兴起了“资源关联”(resources nexus)的研究热潮. 本文对资源关联研究进行了文献计量分析, 综述了常用研究方法、模型和数据, 分析了资源关联的驱动力、影响因素及其对社会经济可持续发展的作用. 主要发现如下: (1) 日益紧密的资源关联关系对可持续发展的影响不断增强; (2) 全球化驱使资源关联由区域性向全球性开放系统延伸; (3) 资源关联使可持续发展目标之间既存在协同也存在冲突; (4) 资源关联对社会经济可持续发展转型既有促进也有制约作用. 未来可以在四方面深化该领域的研究: (1) 拓展资源关联的研究范畴; (2) 揭示资源关联的内在机制及其影响; (3) 构建通用、开放、共享、可拓展的数据平台; (4) 加强资源关联研究的可持续发展决策支撑能力.

关键词 资源关联, 可持续发展目标, 水资源-能源关联, 水资源-能源-食物关联, 能源-材料关联

1 资源关联的思想渊源与科学内涵

自工业革命以来, 持续的城市化、工业化和全球化加剧了自然资源耗竭和生态环境破坏. 同时, 基于可持续发展理念应对发展过程中的资源环境挑战获得了各国的广泛共识. 2015年联合国可持续发展峰会正式通过17项可持续发展目标(Sustainable Development Goals, SDGs), 替代此前的千年发展目标(Millennium Development Goals, MDGs), 成为世界各国继续推动全球经济、社会、环境协调发展的行动纲领和路线图.

引用格式: 张超, 刘蓓蓓, 李楠, 等. 面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望. 科学通报, 2021, 66: 3426–3440
Zhang C, Liu B B, Li N, et al. Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect (in Chinese). Chin Sci Bull, 2021, 66: 3426–3440, doi: 10.1360/TB-2020-1193

© 2020《中国科学》杂志社

随着资源环境问题日益复杂，理解各类资源要素对全球和地区可持续发展的支撑作用、制约机制，及其关联关系正受到越来越多的关注. 资源要素之间的广泛关联使可持续发展目标的实现存在多样化的协同效益和权衡代价[1]. 如图1所示，能源、水资源、生物质、矿产、土地等各类资源的开发利用过程存在紧密的关联，表现为相互依赖、替代、竞争、互补等关系[2,3]. 依赖关系指某一种资源的利用必须以另一种资源为投入，如能源开采和能源产品生产离不开水资源，水的处理和输送同样也需要能源投入[4]. 替代关系指某一种资源能够替代另一种资源提供相同或相似的产品或服务，如生物质替代化石燃料提供能源[5]. 竞争关系体现为多种资源的开发利用共同竞争另一种资源，如生物质燃料与粮食作物竞争有限的土地资源和水资源[6]. 互补关系体现为多种资源以互补的形式共同支撑另一种资源的开发利用，如农业“绿色革命”依赖土地、化肥、灌溉、农业机械等要素以高度集约和互补的方式共同投入[7]. 4种关联关系中依赖关系是基础，其他3种是依赖关系延伸或叠加之后形成的衍生关系. 进一步，每一类资源要素又都直接影响若干可持续发展目标，例如能源之于经济适用的清洁能源目标(目标7)、水资源之于清洁饮水和卫生设施目标(目标6)、土地之于零饥饿目标(目标2). 相互关联的资源要素由此将各类可持续发展目标耦合在一起. 从资源关联的视角研究可持续发展问题，能够帮助我们更加深入地理解经济-社会-环境复杂系统的影响传导机制，提出资源综合管理途径和措施，从而促进多项可持续发展目标的共同实现[8].

在我国，资源关联的理念在古代哲学思想中具有深厚的渊源. 中国传统文化认为宇宙万物由“金、木、水、火、土”5种要素组成，彼此相“生”相“克”，运行不息. “生”体现了依赖和衍生，“克”体现了约束和限制，蕴含了自然界的秩序. “五行说”具有朴素唯物主义和辩证法的性质[9]，是我国古代解释物质世界运动规律的认识论. 其他文明体系亦发展出了各自类似的世界观，古希腊亚里士多德学说认为世界由“水、火、土、气、以太”5种要素组成，古印度哲学则认为“地、水、火、风”构成了物质世界. 尽管现代科学的长足发展早已极大深化了人们对物质世界的理解，“五行说”或许是人类最早描述资源要素之间相互关联的思想体系.

最近十余年，资源关联受到了国际可持续性科学研究领域的广泛关注. 英文科技文献中与“关联”一词对应的单词主要有“nexus”和“linkage”，以“nexus”使用最为广泛. 2006年，美国耶鲁大学的Tom Graedel教授

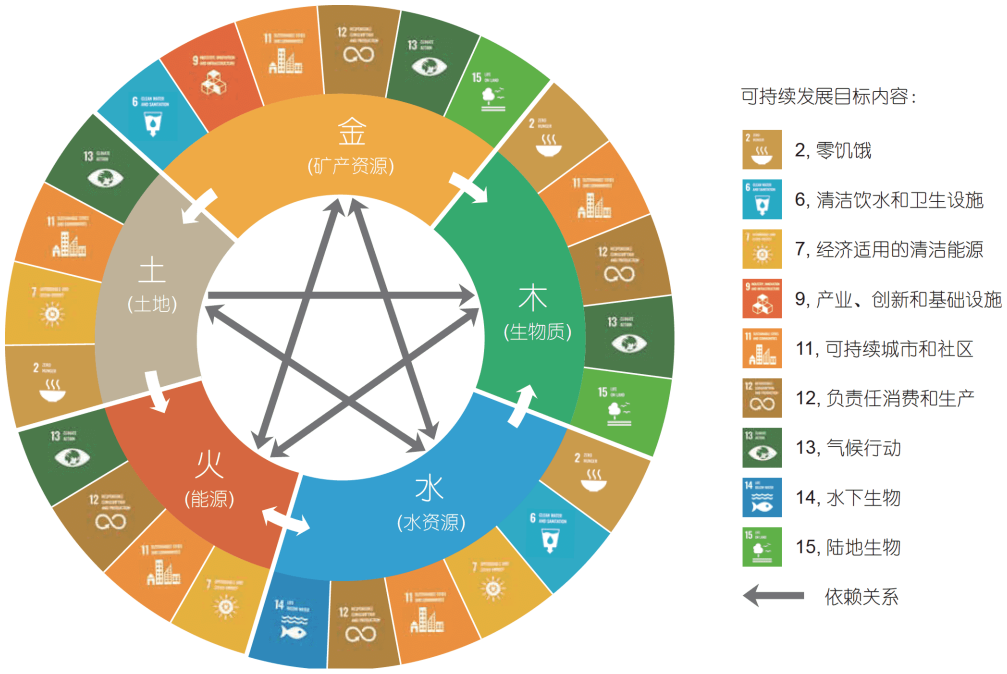


图 1 以资源关联为纽带耦合可持续发展目标
Figure 1 Interconnected resources nexus links sustainable development goals

和荷兰莱顿大学的Ester van der Voet教授就认识到这一问题的重要性并在德国Ernst Strüngmann基金会的资助下筹备了名为“可持续性之关联(Linkages of Sustainability)”的学术研讨会. 该研讨会于2008年在德国法兰克福举办, 并于2010年最终出版了*Linkages of Sustainability*一书[10]. 该书使用了“linkage”而非“nexus”作为要素“关联”的英文说法, 讨论了土地资源、矿产资源、水资源以及能源之间的相互依赖和制约关系. 2011年11月, 在德国波恩举行的“水、能源和食物安全关联——绿色经济解决方案(The Water, Energy and Food Security Nexus—Solutions for the Green Ecology)”会议被认为是资源关联研究主流化的标志性事件. 2012年, 王如松和欧阳志云[11]论述了“水、土、气、生、矿”等要素构成的自然资源子系统对可持续发展的支撑. 2018年, 英国伦敦大学学院Bleischwitz等人[12]汇总编辑了*Routledge Handbook of the Resource Nexus* (《Routledge资源关联研究手册》), 这是目前有关可持续发展资源关联研究最为全面的书籍. 该书提出了包含材料(material)、食物(food)、水(water)、能源(energy)、土地(land)的五要素关联框架, 暗合了“五行说”中的金、木、水、火、土.

资源关联的研究视角是对局限于单一资源类型的学科划分框架和部门割裂管理范式的拓展与融合. 为了提升对资源管理的系统性认识, 本文基于文献计量分析梳理了资源关联研究的发展历史; 概述了主要研究方法、数据, 以及已有研究获得的主要科学认识; 最后, 对该领域的未来发展方向提出了若干建议.

2 资源关联研究的文献计量分析

资源关联的相关研究最早出现于1985年, Moulik[13]关注了印度的粮食-能源关联(nexus). Elmusa[14]于1996年从土地-水资源关联视角研究了巴以冲突. 但此后“nexus”这一主题词并未得到持续关注. 进入新千年以后, 人们日益认识到气候变化、粮食安全、能源安全、水安全等可持续发展问题相互交织在一起, 需要一个具有足够包容性和综合性的研究视角应对资源环境挑战, 由此使“资源关联”概念重新焕发了生机. 近10年资源关联研究大量涌现, 特别是水资源-能源关联、水资源-能源-食物关联等. 表1梳理了主要概念在科学文献中出现的时间及其内涵.

本文以“nexus”和各类资源要素(water、food、land、mineral、metal、material等)为关键词, 搜索了收录于Web of Science核心集数据库的文献, 截至2020年11月30日, 共获得6639篇文献, 各类资源关联研究的文献数量变化如图2所示. 与已有的文献计量研究结论类似[25], 水资源-能源关联研究发展最早, 文献数量最多, 食物、土地、材料、矿物、金属、碳等要素不断纳入研究范畴. 该领域的研究呈现如下特征: (1) 在各类资源要素中, 水的出现频率最高, 不仅体现了水对生态系统和经济系统的基础性支撑作用, 也说明水与其他要素之间存在最为广泛的联系; (2) 水资源-能源关联研究自2010年起显著增长, 其他关联类型的研究在2014年以后快速发展; (3) 包含食物要素的三类关联, 即能源-食物关联、水资源-食物关联和水资源-能源-食物关联的文献数量处于第二梯队, 且增长趋势十分相近; (4) 能源与材料、矿物、金属等的关联关系发展最晚, 文献数量相对较少, 随着未来能源转型的深化, 可能成为新兴研究热点.

本文借助文献计量方法, 进一步从文献的标题、关键词和摘要中筛选出了12个主题类别, 图3展示了各主题的关注度、主题间的引用关系变化趋势. 其中, 节点代表在某一年发表的某一主题的文献, 节点的大小表示其引用频次, 连接线表示文献引用关系, 颜色表示引用年份. 可以发现, 早在2002年, 资源关联分析就开始用于研究人口增长(growing population)问题, 并与虚拟水交易(virtual water trade)、水相关因素(water factor)和能源强度(energy intensity)三类主题相结合. 2010年后, 水-能关联(water-energy nexus)与电力生产(electricity generation)主题关注度不断上升并被大量引用. 通过文献计量可以发现, 与水资源、能源和食物相关的主题词在资源关联研究领域出现频率最高, 且相互之间的引用关系十分紧密, 与其文献数量增长高度一致. 虽然最近5年, 各类材料与其他资源要素关联的研究数量开始增加, 但由于材料种类繁多, 导致主题词分散, 尚未形成突出的文献集群.

2015年后, 跨学科方法(transdisciplinary approaches)成为资源关联研究中的新主题词, 时间上与联合国发布后2015可持续发展目标吻合, 基于资源关联的跨学科方法被认为是实现可持续发展目标的重要途径[26]. 以可持续发展(sustainable development或sustainability)为限定条件进行二次检索, 文章数量及主题变化趋势如图4所示. 2001~2014年间, Web of Science收录的资源关联与可持续发展主题的文献数量较少, 主要集中在水资源-能源关联、气候变化等方向. 2015

表 1 资源关联的相关概念出现时间及其内涵

Table 1 Time for the first appearance of resource nexus concepts and their connotations

关联关系	出现时间(年)	概念内涵	代表性机构	代表性研究者
Food-energy nexus (食物-能源关联)	1985	在生产、安全、价格等方面, 粮食与能源相互制约和影响的关系[13,15]	United Nations University; PBL Netherlands Environmental Assessment Agency	David Tilman; Detlef P. van Vuuren; G. Philip Robertson
Water-energy nexus (水资源-能源关联)	2002	水和能源常以紧密的方式关联, 能源的利用、开采和生产过程离不开水, 水的提取、处理、分配和处置过程也消耗能源[16]	The University of Texas at Austin; International Institute for Applied Systems Analysis; Wageningen University	Peter Gleick; Michael E.Webber; Michelle T. H. van Vliet
Water-food nexus (水资源-食物关联)	2003	农林牧副渔业产品生产是最大的用水部门, 主要包括作物灌溉、土壤水蒸发蒸腾、农副产品加工等, 通过水足迹概念将农产品生产端和消费端关联, 探讨虚拟水贸易等手段能否实现节水、提升水安全[17]	University of Twente; University of Chinese Academy of Sciences; ETH Zürich	Arjen Y. Hoekstra; Mesfin M. Mekonnen; Junguo Liu
Water-energy-food nexus (水资源-能源-食物关联)	2007	在两两关联的基础上, 建立水资源、能源和食物系统的三者相互关联关系. 基于耦合系统的相互作用, 最大限度地发挥三类关键资源要素生产和消费过程中的协同效应, 提高资源利用效率, 降低负面环境影响[18~20]	Stockholm Environment Institute; Texas A&M University; Beijing Normal University	Holger Hoff; Rabi H. Mohtar; Bin Chen
Water-energy-land nexus (水资源-能源-土地关联)	2011	水资源、能源和土地维持生命功能和人类基本需求, 土地又支撑着粮食生产, 因此三者的关联也隐含着水资源、能源与食物之间的关联. 此外, 工业化和城市化进程极大改变土地利用格局, 影响水文循环和能源流动[21,22]	Stockholm International Water Institute; International Food Policy Research Institute; KTH Royal Institute of Technology	Claudia Ringler; Sebastian Hermann; Maria Cristina Rulli
Energy-mineral/material/metal nexus (能源-物质/金属关联)	2014	能源基础设施建设离不开矿产资源和金属材料, 特别是清洁能源的生产和储存设施需要稀贵金属作为功能材料; 另一方面, 原材料的开采、提取与加工也依赖能源. 这是能源系统可持续转型中关注的重要领域[23,24]	Yale University; Institute of Urban Environment Chinese Academy of Sciences; Tokyo Institute of Technology	Tom Graedel; Weiqiang Chen; Koji Tokimatsu

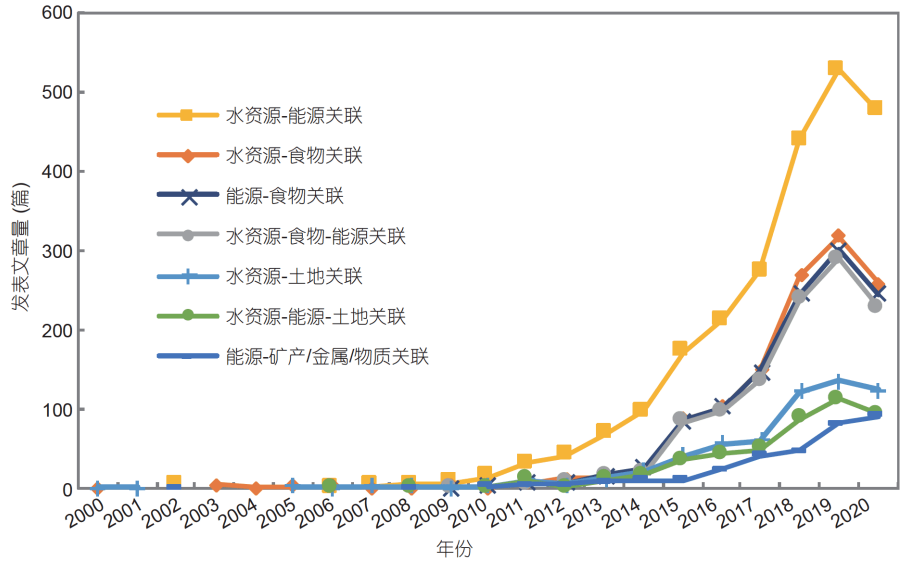


图 2 Web of Science收录的资源关联研究文献数量变化

Figure 2 Publication trend of resources nexus literature in Web of Science

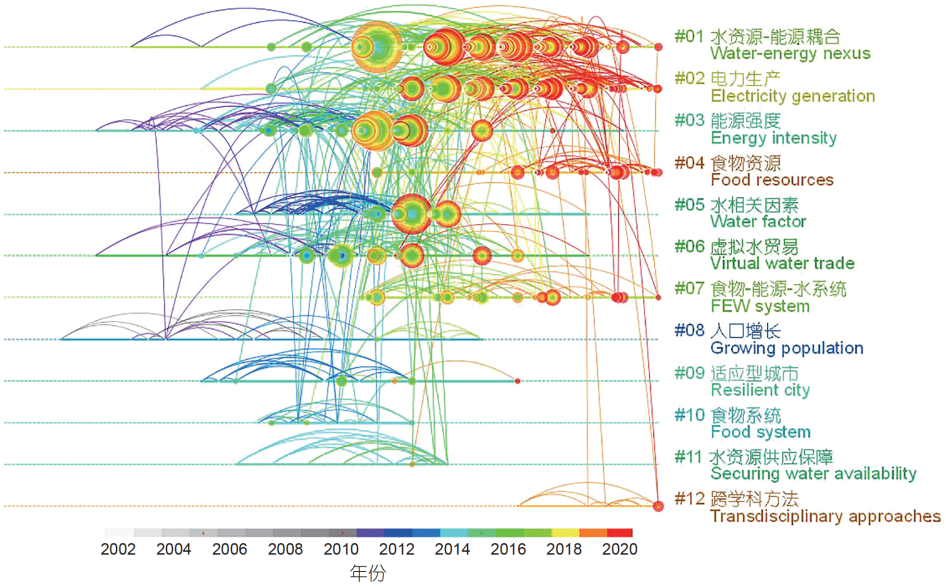


图 3 Web of Science收录的资源关联研究文献引用时间轴网络图
Figure 3 Timeline network of publication co-citations of resources nexus researches in Web of Science

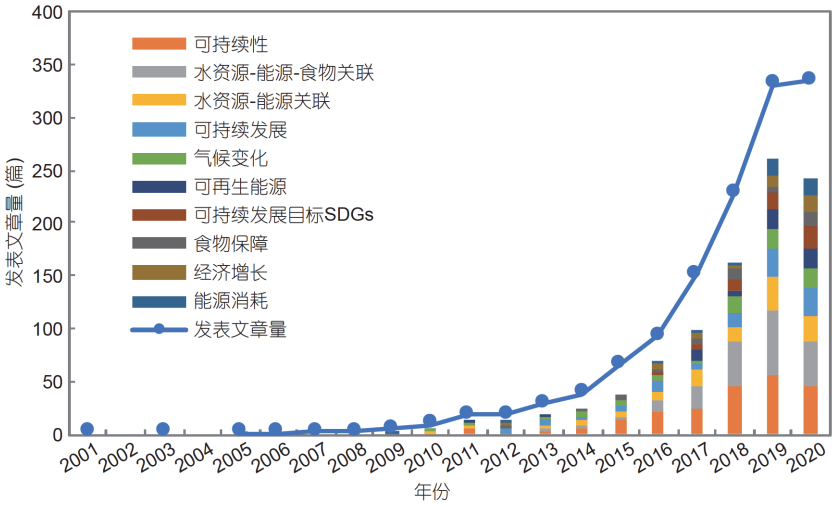


图 4 Web of Science收录的资源关联与可持续发展研究文献数量及主题变化
Figure 4 Publication trend of literature related to resources nexus and sustainable development in Web of Science

年后，文献数量快速增长，其中以水资源-能源-食物三要素关联论文的数量为最多，可再生能源主题的关注度也逐渐升高，可见这是关乎气候变化、涉及多种资源安全的重要联结点[27].

3 资源关联研究的方法、模型和数据

资源环境管理领域的几乎所有系统分析方法和决策支持模型经过适当拓展后都可以用于资源关联问题的研究. 本章概述了核算方法、模拟方法、优化方法和集成决策工具等四类主要方法的特点及其适用性; 并介绍了该领域日益丰富的数据积累和数据库建设进展.

3.1 研究方法与模型

核算、模拟和优化都是资源环境系统分析的基础研究方法，在传统单一要素问题研究中已有广泛应用，拓展研究对象、扩大研究范畴后，便自然延伸到资源关联研究领域. 集成决策工具试图将科学问题分析与

实际决策过程更加紧密地结合，为多要素耦合的资源管理提供支持, 具有重要的实践意义. 各类方法的特点和代表性模型如表2所示.

3.1.1 核算方法

核算资源关联的静态结构特征及其环境、经济、社会影响是理解资源关联的第一步. 根据研究尺度和所依赖的数据不同, 可以进一步分为自下而上(bottom-up)核算和自上而下(top-down)核算两类. 自下而上核算以微观层面基础设施数据为基础，计算某种资源要素的生产和消费对其他资源要素的需求或影响，具有技术细节详实、数据精度高的特点. 高质量的自下而上清单分析对于理解具有空间异质性的资源关联关系尤为重要. 例如, 能源-水资源关联研究建立了全球和国家范围电力基础设施的用水清单[28,29]，供排水系统的能源消耗和碳排放核算也大多采用水系统基础设施的运行数据[30,31].

自上而下核算往往以统计数据或根据系数估算的数据为基础, 采用投入产出(input-output analysis, IOA)模型、生态网络模型(ecological network analysis, ENA)、物质流分析(material flow analysis, MFA)模型、能量流分析(energy flow analysis, EFA)等方法, 描述产业部门之间或资源代谢各环节的直接或隐含资源流量. 此类分析还可以进一步与生命周期分析(life cycle analysis, LCA)相结合, 根据特征因子计算资源消耗或污染排放的多种环境影响. 投入产出模型是应用最广泛的自上而下核算方法，通过拓展资源消耗和污染排放卫星账户, 衍生出各类环境足迹研究, 例如, 能源生产的水足迹[32]、粮食生产的水足迹和土地足迹[33,34]等. 投入产出模型描述了经济活动所有产业部门之间的相互依赖关系，涵盖了资源开采、加工、产品生产、贸易和消费的全供应链上下游关联，这种经济系统的“透视”功能使之为静态资源关联核算提供了一个很好的通用框架.

3.1.2 模拟方法

模拟模型关注资源关联关系的动态特征，试图理解耦合系统中的影响传导过程和外部冲击下的系统反馈. 核算模型隐含的是控制变量和状态变量之间的线性关系假设，而模拟模型的优势在于可以展现因果之间的非线性关系. 正因如此, 模拟模型的建模过程更加复杂, 需要借助一系列前提假设, 且通常以核算模型提供的静态数据为基准.

常用模拟模型包括系统动力学模型(system dynamics model, SDM)、基于主体的建模(agent-based model, ABM)和可计算一般均衡(computable general equilibrium, CGE)模型等. 系统动力学模型建立多要素和多部门之间的因果反馈回路，模拟边界条件或驱动力变化对整个系统动态演化的影响. 该方法有助于识别资源关联网络中加剧资源稀缺、引发资源压力、产生溢出效应的关键因果关系及其传导过程. 基于主体的建模设定个体行为准则和决策目标，模拟个体根据自身属性和准则在外部环境和社会网络共同作用下的行为选择，继而考察从微观个体聚合到系统层面的涌现现象. 在流域水资源-粮食-能源综合管理中，一些研究通过模拟个体用户的用水行为和作物种植偏好，揭示关联系统的动态特征[35]. 可计算一般均衡模型以社会核算矩阵为基础，模拟经济系统在政策冲击前后均衡状态的变化，常用于评价资源税收政策、资源数量限制、技术进步等的均衡效应.

3.1.3 优化方法

优化模型在一定的约束条件下，计算使目标函数

表 2 资源关联研究的主要方法和模型

Table 2 Methods and models used in resources nexus studies

方法类型	适用研究范围	代表性模型及工具
核算方法	描述资源关联的内部结构和外部影响, 分析资源关联的静态特征	自下而上清单分析、投入产出(IOA)模型、生态网络模型(ENA)、物质流分析(MFA)、能量流分析(EFA)、生命周期分析(LCA)
模拟方法	模拟资源要素之间的相互作用关系和影响传导过程, 分析资源关联的动态特征	系统动力学模型(SDM)、基于主体的建模(ABM)、可计算一般均衡模型(CGE)
优化方法	在特定的目标函数和约束条件下优化资源配置和技术选择, 为跨部门资源管理提供方案	线性优化、非线性优化、混合整数优化、多目标优化、鲁棒优化
集成决策工具	整合资源关联研究的数据、方法和用户界面, 集成多种分析方法, 提供面向实践应用的决策支持工具	CLEW、WEF Nexus Tool、WEAP-LEAP、WEF Nexus Rapid Appraisal Tool

最大化或最小化的最优解, 适用于在多维决策空间中寻找最优管理方案. 资源关联中的依赖、制约、替代和竞争关系能够自然地转化为优化模型中的数学语言, 如依赖关系可以通过反映物料平衡的等式约束体现, 制约关系通过限定可利用资源量的不等式约束体现, 优化结果反映了不同技术选择和资源配置方案所代表的资源替代和竞争, 多目标优化体现了多要素、跨部门的协同效应和权衡关系.

国际上许多研究机构长期致力于开发各种能源系统优化模型、水资源配置优化模型等, 对这类单一要素优化模型进行拓展或组合即可分析资源关联问题, 例如, 在电力规划模型中添加用水模块, 或与水文模型整合, 研究水资源约束对电力技术选择和空间布局的影响[36,37]. 更多研究则根据具体的资源关联问题, 选择适用的优化算法, 建立面向现实决策需求的优化模型, 涉及从宏观发展战略到微观设施运行等多个层面, 如中长期社会经济发展的多重资源制约、城市或地区尺度耦合资源系统优化、基础设施投资和运行决策等[38].

3.1.4 集成决策工具

资源关联研究源于现实中决策者面临日益紧迫的资源稀缺性和越来越复杂的要素协同、权衡和竞争关系. 因此, 开发决策支持工具是实践层面的重要发展方向. 目前已经有不少研究机构和学者建立了相关开源工具, 为问题识别、情景分析和政策设计提供支持. 集成决策工具由底层数据库、模型算法、用户界面等模块组成, 整合多种研究方法和模型, 采用数据可视化技术, 为用户提供便捷、灵活的现状评价、规划设计和政策模拟平台. 例如, Howells等人[39]构建了CLEWs分析框架(climate, land-use, energy-water strategies), 聚焦气候变化、土地利用等因素与资源关联之间各类反馈关系. 该框架已经在水资源获取、水电生产、农业管理等方面获得了应用. Daher和Mohtar[40]开发了WEF Nexus Tool 2.0工具, 用于分析国家层面不同食品供给方案的资源需求和影响, 该工具可以输出用户定义情景下的水资源、土地、能源消耗、碳足迹、经济成本等计算结果. 斯德哥尔摩环境研究所将水资源规划工具WEAP(water evaluation and planning system)和能源规划工具LEAP(long range alternatives planning system)结合, 建立了WEAP-LEAP工具, 通过数据交互实现水和能源系统的综合规划决策[41]. 联合国粮食及农业组织开发了WEF Nexus Rapid Appraisal Tool, 整合了30项关联关系评估指标, 用户可自定义指标权重, 分析特定技术和政策措施的效果和影响[42].

3.2 数据来源与数据库

资源关联研究涉及对象广泛、研究尺度跨度大, 其数据来源和数据类型非常多样化. 从数据涵盖的资源要素对象来看, 能源、水资源、农业、矿产资源等领域的各类研究机构、国际组织和跨国企业均长期开展数据采集和积累工作, 以网络数据库、定期报告、交互式应用平台等多种形式进行数据交流、展示和传播. 例如, 英国石油公司每年发布全球能源展望, 报告各国能源生产、消费、温室气体排放等数据; 美国能源信息署亦发布年度能源展望, 提供详尽的美国能源统计数据; 世界资源研究所开发了Aqueduct^{TM}全球水风险地图(https://www.wri.org/aqueduct), 包含汇水区尺度的10余项水资源指标, 提供基于网络平台的交互式水资源压力分析工具; 水足迹网络(Water Footprint Network)采用全球水足迹分析标准构建了最为全面的水足迹数据库, 主要包含产品水足迹、国家水足迹和虚拟水贸易三类数据(https://waterfootprint.org/en/); 联合国粮食及农业组织提供最为全面的全球农产品生产、消费和贸易数据(http://www.fao.org/statistics/databases/en/); 联合国环境署国际资源委员会(UN Environment International Resource Panel)基于标准化的经济系统物质流分析框架开发了全球物质流数据库(https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database)等.

从数据尺度来看, 可以分为宏观层面统计数据和微观层面基础设施数据, 分别对应自上而下研究和自下而上研究. 除了上一节提到的统计数据外, 多区域投入产出表是支撑投入产出分析的重要宏观数据, 目前全球已有多个开源数据库可用, 如欧盟委员会资助下开发的WIOD(World Input-Output Database)数据库(http://wiod.org/project)、澳大利亚研究委员会资助下开发的Eora数据库[43]、普渡大学全球贸易分析项目开发的GTAP (Global Trade Analysis Program)数据库(https://www.gtap.agecon.purdue.edu)等. 联合国COMTRADE商品贸易数据库(https://comtrade.un.org/)依据海关代码详尽记录了各类产品的双边贸易量和贸易额, 为多种全球多区域投入产出表提供了编制依据. 投入产出数据与资源环境卫星账户结合后, 广泛应用于研究多种资源要素在全球产业链中的耦合关系, 核算多部门的资源足迹[44].

微观数据通常包含详细的空间和技术信息，反映了具体的能源基础设施、取用水和水处理设施、农业种植设施、原材料开采和生产设施的建设运行情况，在研究具有空间异质性和技术差异性的资源关联问题时显得尤为重要. 以能源设施的用水数据为例, 美国能源部(DOE)和能源信息署依据《联邦能源管理法案》负责采集全美发电机组年度运行数据. 自1985年起纳入了发电机组用水数据，包括取水量、耗水量、夏季最高取水和排水温度等. 这些信息同时也被美国地质调查局(USGS)用于编制全美用水统计分析[45]，是目前由国家政府部门建立的连续性和覆盖面最好的微观发电设施用水数据库. 此外, 一些商业分析和咨询企业提供商业化数据服务, 例如, 标准普尔全球普氏公司(S&P Global Platts)建立了世界发电厂数据库(World Electric Power Plants Database), 研究者需购买方可使用.

支撑资源关联研究的数据库总体上较为分散. 由于许多数据库的行业特征突出，对各行业传统上关注的指标, 其数据更加完善, 一致性更好; 但一些跨部门的、体现资源要素间相互作用和相互依赖关系的指标, 则存在诸多缺失，或由于统计体系本身没有包含此类指标，或由于不同部门和地区采集的数据存在指标定义差异、口径差异等问题, 通用性和可比性较弱.

4 资源关联的特征及其对社会经济可持续发展的作用

资源关联及其对可持续发展的作用具有4个特征: 首先, 随着资源需求增长和稀缺性加剧, 关联关系对可持续发展的影响不断增强; 其次, 随着生产和消费全球化程度的加深，这些影响的空间范围正从地区性向全球性演变; 再次, 多时空尺度耦合的资源关联使各类可持续发展目标之间既存在协同也存在冲突; 最后, 多样化的作用机制既能够促进也可能制约社会经济系统的可持续发展转型.

4.1 日益紧密的资源关联关系对可持续发展的影响不断增强

每一类资源要素从自然环境进入社会经济系统之后，经历开采、加工、转化、制造、提供服务、废弃等一系列生产-消费过程，资源关联的普遍性体现在任何一种资源的社会经济循环链条都离不开其他资源的支撑. 表3列举了五大类资源要素之间若干典型关联环节, 并指出了与之相关的可持续发展目标.

随着人类活动规模扩大，自然资源的稀缺性日益凸显, 一些原本较为宽松的依赖关系, 成为供应链上的限制因素. 与此同时, 气候变化、自然灾害等风险因素使局部地区资源供给的波动性和不确定性大幅上升, 加剧了资源依赖关系的脆弱性. 例如, 水资源短缺, 特别是气候变化引起的水资源时空波动、水温升高、海平面上升等, 增加了电力基础设施的水风险, 碳披露项目(Carbon Disclosure Project)对全球数十家大型电力企业的调研显示，3/4的企业表示未来水资源可得性的不确定性是重大经营风险[46]. 反之, 水资源稀缺和水循环失衡也使提供清洁供水服务的能源消耗不断增加，例如, 2001~2009年间澳大利亚东南部经历了一场有史以来最为严重的“世纪大旱”，悉尼等主要城市不得不通过跨流域调水缓解缺水危机，使供水总能耗增加了3倍[47].

可以预见，随着资源关联的类型越来越丰富、关联紧密程度不断加深, 其对经济-社会-环境系统可持续发展的影响也将日益增强. 这些影响不仅通过每类资源自身的供应链作用于直接相关的可持续发展目标, 更值得关注的是通过资源关联的纽带关系，传导至更广泛的可持续发展目标. 资源关联引发的传递效应对协调粮食、能源、水资源等多种资源要素的管理带来了挑战, 同时也孕育着机遇[48].

4.2 全球化驱使资源关联由区域性向全球性开放系统延伸

全球化的深化使商品国际贸易网络日益复杂，导致生产和消费活动的空间分离. 数十年来，能源、粮食、原材料等大宗产品的国际贸易份额占全球生产和消费总量的比重不断攀升，凸显了从空间维度研究资源要素远程耦合关系的重要性[49]. 国际贸易可以在全球范围内优化要素配置，有助于在开放环境下借助全球资源推动本国可持续发展目标的实现. 以“水-食物-土地”关联为例，在土地资源和粮食生产力的制约下，一些国家无法实现粮食自给. 粮食贸易缓解了局部地区粮食赤字，被誉为农业“贸易革命”[50]. 与此同时，粮食贸易也意味着农产品生产过程消耗的水资源和土地资源以隐含的方式间接“出口”了. 研究表明，从20世纪80年代中期到21世纪10年代初期，全球农产品贸易隐含的虚拟水转移量从每年0.7万亿立方米增长到2.2万亿立方米, 增幅超过200%, 而同期全球作物种植的水足迹总量仅增长75%[33]. 总体上，农产品从水资源生产力

表 3 资源关联的重要环节及其相关的可持续发展目标[a)]

Table 3 Key linkages in resources nexus and related SDGs

资源关联类型	资源关联环节	涉及的主要资源类型					相关可持续发展目标								
		水资源	能源	食物	土地	材料	2	6	7	9	11	12	13	14	15
水资源-能源关联	化石燃料开采的水资源影响	●	●						▲	▲			▲		
	火力发电用水	●	●					▲	▲	▲			▲	▲	
	水力发电耗水和水环境影响	●	●						▲				▲		
	海水淡化的能源消耗与碳排放	●	●					▲			▲		▲		
	城市供水系统能耗与碳排放	●	●					▲		▲	▲		▲		
水资源-食物关联	农作物灌溉	●		●			▲	▲						▲	
	畜禽养殖的水足迹和水污染	●		●			▲	▲						▲	▲
	水产养殖和水产品生产	●		●			▲	▲				▲		▲	
食物-能源关联	粮食生产的能源消耗		●	●			▲		▲				▲		
	能源价格对粮食价格的影响		●	●			▲		▲				▲		
能源-材料关联	可再生能源开发的金属需求		●			●			▲	▲			▲		
	基本金属生产的能源消耗与碳排放		●			●				▲			▲		
	固体废弃物资源化利用的能耗与碳排放		●			●				▲	▲		▲		
水资源-能源-食物关联	水库综合管理与调度	●	●	●			▲	▲	▲					▲	
	地下水开发利用	●	●	●			▲	▲	▲					▲	
	废水资源化与能源回收	●	●	●				▲	▲	▲	▲				
	居民食物消费的水资源、能源影响	●	●	●			▲	▲			▲	▲	▲		
水资源-食物-土地关联	农产品贸易的虚拟水和虚拟土地转移	●		●	●		▲					▲		▲	▲
	植物基因工程改造	●		●	●		▲			▲		▲			▲
	人造肉生产	●		●	●		▲			▲		▲			
能源-土地-材料关联	交通基础设施规划建设		●		●	●		▲		▲	▲		▲		
水资源-土地-材料关联	植物纤维纺织品生产加工	●	●			●		▲		▲		▲			
水资源-能源-食物-土地关联	生物质能源开发利用	●	●	●	●		▲		▲				▲		▲

a) 可持续发展目标序号代表的内容与图1相同. 圆和三角分别代表相应关联环节涉及的资源类型或可持续发展目标

更高的国家流向了水资源生产力相对较低的国家[51], 通过贸易节约的水资源量从1986年的500亿立方米上升到2007年的2500亿立方米[52]. 然而, 国际贸易也可能由于产能向技术水平更低、环境规制更薄弱的发展中国家转移而不利于可持续发展. 针对“碳泄漏”的研究显示, 1990~2008年期间, 发达国家(京都议定书附件1国家)向发展中国家(非附件1国家)的碳排放净转移量从每年4亿吨增长至16亿吨, 超过了同期发达国家自身的碳减排量[53].

上述两方面例证说明, 全球化既为可持续发展带来了新的机遇, 也制造了新的挑战[54], 一个国家或地区的可持续发展既需要关注本地区的资源关联关系, 也需要关注全球范围内的资源配置效率. 对水资源枯竭、土地退化等区域性问题, 研究重点在于分析资源性产品全球贸易对进口国和出口国的溢出效应; 而对气候变化等全球性问题, 还需要进一步分析资源要素

远程耦合的全球尺度净效益.

4.3 资源关联使可持续发展目标之间既存在协同也存在冲突

联合国可持续发展目标的实现离不开各类资源要素的支撑. 其中消除饥饿(目标2)、清洁饮水与卫生设施(目标6)、廉价和清洁能源(目标7)3项目标与食物、水资源和能源3种资源直接相关. 资源关联使相关可持续发展目标的实现存在广泛的协同关系. 研究显示, 水安全目标(目标6)与其他目标之间拥有多达124对协同关系[2]. 又如, 基于能源-水资源耦合系统建模的研究表明, 在2050年之前建立与1.5°C温升控制目标相适应的可再生能源电力系统, 可使全球电力生产的取水和耗水均下降95%以上[29], 体现了应对气候变化(目标13)、能源安全(目标7)、水安全(目标6)、水生态系统(目标14)等目标之间的协同. 印度地下水灌溉就是一个多目标协同的典型例子. 印度的粮食灌溉高度依赖地下水, 农业电价补贴政策和农村地区经常性的供电中断使农民倾向于长时间开启抽水泵, 由此加剧了水资源浪费和地下水超采, 进而影响其他需水产业的发展和以地下水为生活水源的居民生计[55]. 因此, 改革电价补贴政策、改善农村地区电力供应, 在实现能源安全目标的同时, 也可以为水资源保护、减贫等可持续发展目标作出贡献.

另一些情况下, 资源关联也可能导致可持续发展目标之间产生冲突. 例如, 我国第4次全国经济普查显示, 受化解煤炭产能过剩和应对气候变化的煤炭总量控制政策等因素影响, 煤炭开采行业从业人员从2013年末的611万人下降到2018年末的347万人, 减少43%. 由于低技能劳动力是煤炭开采等传统行业的就业主体, 其失业风险的增加会扩大贫富差距[56], 这体现了减少不平等(目标10)与气候行动(目标13)在地区层面可能产生冲突. 发挥资源关联的协同效益, 避免或降低可持续发展目标之间的权衡代价是资源关联研究试图解决的重要管理实践问题.

4.4 资源关联对社会经济可持续发展转型既有促进也有制约作用

加快社会经济系统的可持续发展转型, 是应对水资源、能源、粮食、气候等多重资源环境挑战的关键途径. 资源要素之间的依赖、竞争、替代、互补等关联关系既可能加速既有的转型进程, 并触发新的解决方案, 也可能阻碍预期的生产和消费模式变化. 以能源转型为例, 低碳化和清洁化是能源转型的主要目标, 太阳能、风电等可再生能源发电技术的大规模发展将使稀贵金属材料需求大幅增长. 光伏发电设备的制造依赖镓、铟、锗和碲等稀有金属[57~60], 稀土永磁电机是风电设备[61~64]和电动汽车[65]的关键部件. 新能源技术对材料的依赖, 使稀贵金属供应潜力和技术进步速度决定了未来能源转型能否顺利推进. 已有研究显示, 主要稀有金属品种的资源储量可以满足21世纪中期的太阳能光伏和风电发展需求, 而锂电池材料则可能面临供应压力, 为了避免材料供应对能源转型的阻碍, 需要加快储能技术创新和替代材料研发[66]. 采用生物质燃料替代化石燃料是能源转型的另一条路径. 由于生物质燃料在土地、水资源、营养元素需求方面与粮食和饲料作物存在广泛竞争, 生物质能源的转型路径将引发多种权衡关系, 如土地利用变化造成增量温室气体排放、推高农产品价格影响粮食安全、增加水资源消耗、削弱生态系统服务质量等[67,68], 因此这一转型路径面临更多的制约因素, 需要从资源关联的角度出发, 综合评价政策方案的可持续性.

5 资源关联研究未来方向与发展思路

基于上述分析我们提出深化资源关联领域研究的四方面建议: 拓展研究范畴、揭示内在机制、构建数据平台、加强决策支撑.

5.1 拓展资源关联的研究范畴

资源关联的分析框架具有很强的包容性和拓展性. 随着资源安全问题的复杂性不断增加, 资源关联研究还有很大的发展空间. 已有研究最为关注水资源-能源-食物三者的关系, 未来随着新兴资源环境问题的涌现和研究视野的不断延伸, 更多资源类型和环境要素将被纳入研究范畴, 包括稀贵金属材料、生态系统、生物多样性资源等.

在研究范畴拓展方面, 未来可在3个方向继续深入: 一是更充分地融合已有的两两关联关系研究, 构建更加完整和全面的资源关联网络; 二是关注促进可持续发展的新兴技术引发的资源关联关系, 如植物基因改造、人造肉、新能源后备技术等潜在的全生命周期影响; 三是将资源关联的刻画和评价纳入全球变化分析和可持续发展目标评价中, 识别依赖、竞争、替代、互补关系引申出的可持续发展赋能因素和掣肘环节,

为采取应对措施提供科学依据.

5.2 揭示资源关联的内在机制及其影响

现有大部分研究停留在描述资源关联“是什么”的阶段[69~71], 未来需要加强对关联机制和影响机理的研究, 进一步回答“为什么”的问题. 在微观层面上, 关注影响生产和消费活动中个体行为、决策的机制与动机, 尤其是直觉以外的潜在关联或效应[72]. 在此基础上, 通过调节价格、改变观念、提供信息、创造学习机会等途径, 调节微观行为决策, 提高资源的利用效率和韧性, 降低跨部门风险. 在宏观层面上, 要理解各类社会经济和自然环境因素对资源关联网络动态变化的驱动机制, 以及关联网络内部的正负反馈关系. 例如, 理解水资源约束、土地约束、关键材料约束等对能源转型和能源技术选择的制约与促进作用[73,74]. 此类机理性和动态性研究, 可以帮助决策部门在制定可持续发展的宏观战略和部门规划时, 理解关联关系在外部约束条件变化和内部技术变化双重影响下的响应特征, 判断关联网络的变化方向和发展趋势, 寻找多目标、跨部门的系统性解决方案.

5.3 构建通用、开放、共享、可拓展的数据平台

高质量的科学研究和决策支持依赖高质量的数据, 特定区域和微观尺度的数据稀缺是制约资源关联研究深入开展的主要原因之一. 在加强数据基础建设方面, 未来需要在3个层次开展工作: 一是持续积累单一资源要素统计数据库, 提升数据库的通用性和开放性, 特别是完善发展中国家资源管理的统计体系, 提高数据覆盖面、透明度, 加强数据质量控制, 推动数据开放和共享[75]; 二是针对专门的研究主题建立专业化程度更高的专题数据库, 例如, 能源基础设施用水数据监测与采集、水处理设施能源数据监测与采集、金属资源全生命周期物质循环核算与管理等, 尤其要重视高分辨率时空分布数据的积累和采集, 加强要素关联的时空分异特征研究; 三是广泛采用卫星遥感、自动监测、传感器等信息化数据采集技术, 丰富数据获取途径、扩充数据类型、提升数据精度, 弥补传统统计数据收集体系的不足[76].

5.4 加强资源关联研究的可持续发展决策支撑能力

面向可持续发展的资源关联研究具有明确的现实意义, 如何将科学认知转化为管理实践, 回答“怎么做”的问题, 是资源关联研究的最终落脚点. 从目前该领域的进展来看, 在现实决策和管理中真正采用资源关联的范式, 还存在很大障碍. 甚至有学者指出, “资源关联”是一个似是而非的学术“时髦语”(buzzword), 反而容易引起来自不同领域的专业人士的误解[77].

为加强资源关联研究对可持续发展的支撑能力, 以下几个方面值得深入探索: 其一, 开发数据-方法-决策一体化的多要素资源综合管理应用平台, 为多要素关联的复杂系统决策提供具有可操作性的工具[78], 例如, 面向城市可持续发展开发能源-水资源-营养元素耦合系统的规划与管理工具[79,80]; 其二, 除应用自然科学和工程技术领域的建模方法之外, 引入面向利益相关者的社会科学研究方法, 如半结构化访谈、研讨会、参与者观察、游戏实验、参与式情景设计等[81], 兼顾可持续发展“三重底线”的社会维度; 其三, 现行资源管理模式具有典型的条块分割特点, 不利于协调部门之间的目标冲突, 需要将传统哲学智慧和现代科学管理理念结合, 加强多部门、多主体之间的沟通与对话, 打破信息壁垒、促进目标融合, 使决策过程更加多元化, 更具包容性[82].

参考文献

1 Nilsson M, Griggs D, Visbeck M. Map the interactions between Sustainable Development Goals. Nature, 2016, 534: 320–322
2 Fader M, Cranmer C, Lawford R, et al. Toward an understanding of synergies and trade-offs between water, energy, and food SDG targets. Front Environ Sci, 2018, 6: 112
3 Pradhan P, Costa L, Rybski D, et al. A systematic study of sustainable development goal (SDG) interactions. Earth Future, 2017, 5: 1169–1179
4 Jägerskog A, Clausen T J, Holmgren T, et al. Energy and Water: The Vital Link for a Sustainable Future. Stockholm International Water Institute (SIWI). Stockholm (Report Nr. 33), 2014
5 Long H, Li X, Wang H, et al. Biomass resources and their bioenergy potential estimation: A review. Renew Sustain Energy Rev, 2013, 26: 344–352
6 Rulli M C, Bellomi D, Cazzoli A, et al. The water-land-food nexus of first-generation biofuels. Sci Rep, 2016, 6: 1–10
7 Pellegrini P, Fernández R J. Crop intensification, land use, and on-farm energy-use efficiency during the worldwide spread of the green revolution. Proc Natl Acad Sci USA, 2018, 115: 2335–2340

8 Hoff H. Understanding the Nexus: Background Paper for the Bonn2011 Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. In: Nexus Conference: The Water, Energy and Food Security Nexus. Stockholm Environment Institute, Bonn, 2011
9 Capra F. The Tao of Physics: An Exploration of the Parallels between Modern Physics and Eastern Mysticism. Boulder: Shambhala Publications, 2010
10 Graedel T E, van der Voet E. Linkages of Sustainability. Massachusetts: Mit Press Cambridge, 2010
11 Wang R S, Ouyang Z Y. Social-economic-natural complex ecosystem and sustainability (in Chinese). Bull Chin Acad Sci, 2012, 27: 337–345 [王如松, 欧阳志云. 社会-经济-自然复合生态系统与可持续发展. 中国科学院院刊, 2012, 27: 337–345]
12 Bleischwitz R, Hoff H, Spataru C, et al. Routledge Handbook of the Resource Nexus. London, New York: Routledge, 2017. 3–14
13 Moulik T K. Integrated Energy System: Some Case Studies on Food-Energy Nexus in India. IIMA Working Papers. Indian Institute of Management Ahmedabad, Research and Publication Department, 1984
14 Elmusa S S. The land-water nexus in the Israeli-Palestinian conflict. J Palest Stud, 1996, 25: 69–78
15 Abdelradi F, Serra T. Food-energy nexus in Europe: Price volatility approach. Energy Econ, 2015, 48: 157–167
16 Malik R P S. Water-energy nexus in resource-poor economies: The Indian experience. Int J Water Resour Dev, 2002, 18: 47–58
17 Allan J A. Virtual water—The water, food, and trade nexus. Useful concept or misleading metaphor? Water Int, 2003, 28: 106–113
18 Zhu T, Ringler C, Cai X. Energy price and groundwater extraction for agriculture: Exploring the energy-water-food nexus at the global and basin levels. In: International Conference of Linkages Between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries, Hyderabad, India, 2007
19 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
20 Albrecht T R, Crootof A, Scott C A. The Water-Energy-Food Nexus: A systematic review of methods for nexus assessment. Environ Res Lett, 2018, 13: 043002
21 Minne E A, Crittenden J C, Pandit A, et al. Water, energy, land use, transportation and socioeconomic nexus: A blue print for more sustainable urban systems. In: Proceedings of the 2011 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology, 2011. 1–4
22 Brandi C A, Richerzhagen C, Stepping K M. Post 2015: Why is the water-energy-land nexus important for the future development agenda? SSRN Electron J, 2014, 297–310
23 Giurco D, McLellan B, Franks D M, et al. Responsible mineral and energy futures: Views at the nexus. J Clean Prod, 2014, 84: 322–338
24 Mclellan B C. The Minerals-energy Nexus: Past, Present and Future. Sustainability through Innovation in Product Life Cycle Design. Berlin: Springer, 2017. 619–631
25 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 [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]
26 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
27 Saint Akadiri S, Alola A A, Akadiri A C, et al. Renewable energy consumption in EU-28 countries: Policy toward pollution mitigation and economic sustainability. Energy Policy, 2019, 132: 803–810
28 Zhang C, Zhong L, Wang J. Decoupling between water use and thermoelectric power generation growth in China. Nat Energy, 2018, 3: 792–799
29 Lohrmann A, Farfan J, Caldera U, et al. Global scenarios for significant water use reduction in thermal power plants based on cooling water demand estimation using satellite imagery. Nat Energy, 2019, 4: 1040–1048
30 Lee M, Keller A A, Chiang P C, et al. Water-energy nexus for urban water systems: A comparative review on energy intensity and environmental impacts in relation to global water risks. Appl Energy, 2017, 205: 589–601
31 Nair S, George B, Malano H M, et al. Water-energy-greenhouse gas nexus of urban water systems: Review of concepts, state-of-art and methods. Resour Conserv Recycl, 2014, 89: 1–10
32 Zhang C, Anadon L D. Life cycle water use of energy production and its environmental impacts in China. Environ Sci Technol, 2013, 47: 14459–14467
33 D'odorico P, Carr J, Dalin C, et al. Global virtual water trade and the hydrological cycle: Patterns, drivers, and socio-environmental impacts. Environ Res Lett, 2019, 14: 053001
34 Schaffartzik A, Haberl H, Kastner T, et al. Trading land: A review of approaches to accounting for upstream land requirements of traded products. J Ind Ecol, 2015, 19: 703–714
35 Khan H F, Yang Y C E, Xie H, et al. A coupled modeling framework for sustainable watershed management in transboundary river basins. Hydrol Earth Syst Sci, 2017, 21: 6275–6288
36 Miara A, Cohen S M, Macknick J, et al. Climate-water adaptation for future US electricity infrastructure. Environ Sci Technol, 2019, 53: 14029–14040

37 Murrant D, Quinn A, Chapman L, et al. Water use of the UK thermal electricity generation fleet by 2050: Part 1 identifying the problem. Energy Policy, 2017, 108: 844–858

38 Namany S, Al-Ansari T, Govindan R. Sustainable energy, water and food nexus systems: A focused review of decision-making tools for efficient resource management and governance. J Clean Prod, 2019, 225: 610–626

39 Howells M, Hermann S, Welsch M, et al. Integrated analysis of climate change, land-use, energy and water strategies. Nat Clim Chang, 2013, 3: 621–626

40 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

41 Heaps C, Sieber J, Purkey D, et al. Integrating the WEAP and LEAP Systems to Support Planning and Analysis at the Water-energy Nexus. SEI Factsheet, 2012

42 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. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 2014

43 Lenzen M, Moran D, Kanemoto K, et al. Building Eora: A global multi-region input-output database at high country and sector resolution. Econ Syst Res, 2013, 25: 20–49

44 Holland R A, Scott K A, Flörke M, et al. Global impacts of energy demand on the freshwater resources of nations. Proc Natl Acad Sci USA, 2015, 112: E6707–E6716

45 Averyt K, Macknick J, Rogers J, et al. Water use for electricity in the United States: An analysis of reported and calculated water use information for 2008. Environ Res Lett, 2013, 8: 015001

46 CDP (Carbon Disclosure Project). Thirsty Business: Why Water Is Vital to Climate Action. 2016 Annual Report of Corporate Water Disclosure. Carbon Disclosure Project, London, 2016

47 Kenway S, Priestley A, Cook S, et al. Energy Use in the Provision and Consumption of Urban Water in Australia and New Zealand. Water Services Association of Australia (WSAA): Sydney, Australia, Citeseer, 2008

48 Roidt M, Avellán T. Learning from integrated management approaches to implement the Nexus. J Environ Manage, 2019, 237: 609–616

49 Liu J G, Vanessa H, Mateus B, et al. Framing sustainability in a telecoupled world (in Chinese). Acta Ecol Sin, 2016, 36: 7870−7885 [刘建国, Vanessa H, Mateus B, 等. 远程耦合世界的可持续性框架. 生态学报, 2016, 36: 7870−7885]

50 D'odorico P, Rulli M C. The fourth food revolution. Nat Geosci, 2013, 6: 417−418

51 Lambin E F, Meyfroidt P. Global land use change, economic globalization, and the looming land scarcity. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 3465–3472

52 Dalin C, Konar M, Hanasaki N, et al. Evolution of the global virtual water trade network. Proc Natl Acad Sci USA, 2012, 109: 5989–5994

53 Peters G P, Minx J C, Weber C L, et al. Growth in emission transfers via international trade from 1990 to 2008. Proc Natl Acad Sci USA, 2011, 108: 8903−8908

54 Xu G H, Ge Q S, Gong P, et al. Societal response to challenges of global change and human sustainable development (in Chinese). Chin Sci Bull, 2013, 58: 2100−2106 [徐冠华, 葛全胜, 宫鹏, 等. 全球变化和人类可持续发展: 挑战与对策. 科学通报, 2013, 58: 2100−2106]

55 Sidhu B S, Kandlikar M, Ramankutty N. Power tariffs for groundwater irrigation in India: A comparative analysis of the environmental, equity, and economic tradeoffs. World Dev, 2020, 128: 104836

56 Huang H, Roland-Holst D, Wang C, et al. China's income gap and inequality under clean energy transformation: A CGE model assessment. J Clean Prod, 2020, 251: 119626

57 Nassar N T, Wilburn D R, Goonan T G. Byproduct metal requirements for US wind and solar photovoltaic electricity generation up to the year 2040 under various Clean Power Plan scenarios. Appl Energ, 2016, 183: 1209−1226

58 Kavlak G, McNerney J, Jaffe R L, et al. Metal production requirements for rapid photovoltaics deployment. Energy Environ Sci, 2015, 8: 1651–1659

59 Davidsson S, Höök M. Material requirements and availability for multi-terawatt deployment of photovoltaics. Energy Policy, 2017, 108: 574–582

60 Zuser A, Rechberger H. Considerations of resource availability in technology development strategies: The case study of photovoltaics. Resour Conserv Recycl, 2011, 56: 56–65

61 Habib K, Wenzel H. Exploring rare earths supply constraints for the emerging clean energy technologies and the role of recycling. J Clean Prod, 2014, 84: 348–359

62 Elshkaki A, Graedel T E. Dynamic analysis of the global metals flows and stocks in electricity generation technologies. J Clean Prod, 2013, 59: 260–273

63 Bauer D, Diamond D, Li J, et al. Critical Materials Strategy. Technical Report. US Department of Energy, 2010

64 Viebahn P, Soukup O, Samadi S, et al. Assessing the need for critical minerals to shift the German energy system towards a high proportion of renewables. Renew Sustain Energy Rev, 2015, 49: 655–671

65 Wang C, Sun J, Zuo L S, et al. Evaluation of global supply risk of critical minerals for new energy vehicles (in Chinese). Forum Sci Technol China, 2018, (4): 83–93 [王昶, 孙晶, 左绿水, 等. 新能源汽车关键原材料全球供应风险评估. 中国科技论坛, 2018, (4): 83–93]

66 Månberger A, Stenqvist B. Global metal flows in the renewable energy transition: Exploring the effects of substitutes, technological mix and development. Energy Policy, 2018, 119: 226–241

67 Haberl H, Erb K H, Krausmann F, et al. Bioenergy: How much can we expect for 2050? Environ Res Lett, 2013, 8: 031004

68 Muscat A, de Olde E M, de Boer I J M, et al. The battle for biomass: A systematic review of food-feed-fuel competition. Glob Food Secur, 2020, 25: 100330

69 Mannan M, Al-Ansari T, Mackey H R, et al. Quantifying the energy, water and food nexus: A review of the latest developments based on life-cycle assessment. J Clean Prod, 2018, 193: 300–314

70 Dargin J, Daher B, Mohtar R H. Complexity versus simplicity in water energy food nexus (WEF) assessment tools. Sci Total Environ, 2019, 650: 1566–1575

71 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

72 Liu J, Hull V, Godfray H C J, et al. Nexus approaches to global sustainable development. Nat Sustain, 2018, 1: 466–476

73 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

74 Fuso Nerini F, Tomei J, To L S, et al. Mapping synergies and trade-offs between energy and the Sustainable Development Goals. Nat Energy, 2018, 3: 10–15

75 Mccarl B A, Yang Y, Srinivasan R, et al. Data for WEF Nexus Analysis: A Review of Issues. Current Sustainable/renewable Energy Reports, 2017

76 Scanlon B R, Ruddell B L, Reed P M, et al. The food-energy-water nexus: Transforming science for society. Water Resour Res, 2017, 53: 3550–3556

77 Cairns R, Krzywoszynska A. Anatomy of a buzzword: The emergence of 'the water-energy-food nexus' in UK natural resource debates. Environ Sci Policy, 2016, 64: 164–170

78 Miralles-Wilhelm F. Development and application of integrative modeling tools in support of food-energy-water nexus planning—A research agenda. J Environ Stud Sci, 2016, 6: 3–10

79 Newell J P, Goldstein B, Foster A. A 40-year review of food-energy-water nexus literature and its application to the urban scale. Environ Res Lett, 2019, 14: 073003

80 Romero-Lankao P, McPhearson T, Davidson D J. The food-energy-water nexus and urban complexity. Nat Clim Chang, 2017, 7: 233–235

81 Ghodsvali M, Krishnamurthy S, de Vries B. Review of transdisciplinary approaches to food-water-energy nexus: A guide towards sustainable development. Environ Sci Policy, 2019, 101: 266–278

82 Howells M, Rogner H H. Assessing integrated systems. Nat Clim Chang, 2014, 4: 246–247

Summary for “面向可持续发展的资源关联研究: 现状与展望”

Resource nexus for sustainable development: Status quo and prospect

Chao Zhang[1,2], Beibei Liu[3,4], Nan Li[5,6,7], Peng Wang[5,6], Chuke Chen[5,6,7], Wei-Qiang Chen[5,6,7*], Lixiao Zhang[8], Junguo Liu[9] & Yonglong Lü[10,11]

[1] *School of Economics and Management, Tongji University, Shanghai 200092, China;*
[2] *UN Environment-Tongji Institute of Environment for Sustainable Development, Shanghai 200092, China;*
[3] *State Key Laboratory of Pollution Control & Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China;*
[4] *The Johns Hopkins University-Nanjing University Center for Chinese and American Studies, Nanjing 210093, China;*
[5] *Key Lab of Urban Environment and Health, Institute of Urban Environment, Chinese Academy of Sciences, Xiamen 361021, China;*
[6] *Xiamen Key Lab of Urban Metabolism, Xiamen 361021, China;*
[7] *University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China;*
[8] *State Key Joint Laboratory of Environment Simulation and Pollution Control, School of Environment, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;*
[9] *School of Environmental Science & Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China;*
[10] *College of the Environment & Ecology, Xiamen University, Xiamen 361102, China;*
[11] *Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China*
* Corresponding author, E-mail: wqchen@iue.ac.cn

Sustainable Development Goals (SDGs) proposed by the United Nations Sustainable Development Summit in 2015 are a roadmap for action to promote coordinated development of economy, society, and the environment. Natural resources, including energy, water, biomass, minerals, and land, are key elements for the achievement of SDGs. Various dependence, substitution, competition, and complementation relationships exist among different kinds of natural resources. The idea of intrinsic interconnectivities of the world’s material basis, which states that the five basic elements of “gold, wood, water, fire, and earth” mutually enable and restrict one other, can be traced back to Wuxing theory in ancient Chinese culture. The research interest in understanding and managing such interconnections has inspired a large number of studies on “resource nexus” and its role in facilitating SDGs in the past decade.

Bibliometric analysis showed that the number of publications on resource nexus increased rapidly after the Bonn 2011 Nexus Conference. Nexuses between water and other resources, especially energy, are commonly investigated issues. Transdisciplinary approaches have become an important research direction in recent years. Studies on resource nexus have been incorporated into SDG discussions after 2015.

Methods and models used in resource nexus studies are generally classified into three categories, namely, accounting, simulation, and optimization. These widely used methods in the system analysis of single-resource elements have been extended to cover and focus on linkages among resources. A number of integrated decision support tools, such as CLEW, WEF Nexus Tool, WEAP-LEAP, and WEF Nexus Rapid Appraisal Tool, have also been developed for problem identification, scenario analysis, and policy design. Many research institutes and international organizations have compiled databases on resource extraction, production, consumption, and trade to facilitate academic studies and decision making.

Effects of resource nexus on sustainable development can be summarized as follows: (1) Strengthened impacts of increasingly interconnected resource nexus on sustainable development, (2) global expansion of localized resource nexus, (3) resource nexus leads to both synergies and conflicts among SDGs, and (4) resource nexus has both promoting and restricting effects on sustainable socioeconomic transitions.

Finally, future investigations can focus on the following directions: (1) Expand the research scope of resource nexus; (2) reveal mechanisms and influences of resource nexus; (3) build universal, open-source, and extendible data platforms; and (4) strengthen the decision support capability of resource nexus studies.

resource nexus, Sustainable Development Goals, water-energy nexus, water-energy-food nexus, energy-material nexus

doi: 10.1360/TB-2020-1193