

DOI:10.19853/j.zgjsps.1000-4602.2025.20.004

基于CiteSpace的城市水系统能耗及温室气体排放研究进展

武利园^{1,2,3}, 潘宇霖^{1,2,3}, 杨思雯^{1,2,3}, 李昂臻⁴, 李海燕^{1,2,3}, 金 弈⁵

(1. 北京建筑大学 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室, 北京 102616; 2. 北京节能减排与城乡可持续发展省部共建协同创新中心, 北京 102616; 3. 北京市可持续城市排水系统构建与风险控制工程技术研究中心, 北京 102616; 4. 中国城市规划设计研究院, 北京 100044; 5. 中国电建集团北京勘测设计研究院有限公司, 北京 100024)

摘要: 城市水系统的能源消耗和温室气体排放核算及评估已经成为近年来的研究热点。利用 CiteSpace 可视化分析软件对 Web of Science 数据库近 15 年收录的相关学术论文进行文献计量学分析,发现随着气候变化学科的研究发展,城市水系统能耗与温室气体排放相关研究逐渐由环境影响评估、生命周期评价的部分章节扩展为核算、评估、相关政策建议与技术优化等主题研究。聚类分析显示,此方向的研究主要集中在“水-能-碳”关系、量化分析、基于生命周期评价的环境影响评估及优化探索研究等方面。整体来看,该领域已经初步形成了一个较为完整的研究体系,但引文衍生分支较少,未见明显的层级网络,研究热点代际更替规律不明显,研究深度上延伸空间较大。

关键词: 城市水系统; 水-能-碳关系; 水-碳关系; CiteSpace 引文分析; 温室气体
中图分类号: TU992 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4602(2025)20-0025-10

Review of Energy Consumption and Greenhouse Gas Emissions of Urban Water Systems Based on CiteSpace

WU Li-yuan^{1,2,3}, PAN Yu-lin^{1,2,3}, YANG Si-wen^{1,2,3}, LI Ang-zhen⁴, LI Hai-yan^{1,2,3},
JIN Yi⁵

(1. Key Laboratory of Urban Rainwater System and Water Environment <Ministry of Education>, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 102616, China; 2. Beijing Energy Conservation & Sustainable Urban and Rural Development Provincial and Ministry Co-construction Collaboration Innovation Center, Beijing 102616, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Sustainable Urban Sewage System Construction and Risk Control, Beijing 102616, China; 4. China Academy of Urban Planning & Design, Beijing 100044, China; 5. PowerChina Beijing Engineering Corporation Limited, Beijing 100024, China)

Abstract: Calculation and assessment of energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water systems have become a research hotspot in recent years. A bibliometric analysis of academic papers published in the Web of Science database over the last 15 years using CiteSpace software, reveals

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52100001); 2021年住房和城乡建设部科学技术项目(2021-R-059); 青年北京学者计划(024); 北京建筑大学研究生创新项目(PG2023069、PG2022067); 城市雨水系统与水环境教育部重点实验室(2022年开放课题); 北京建筑大学金字塔人才工程-建大领军培养计划(JDLJ20200301)

通信作者: 李海燕 E-mail: lihaiyan@bucea.edu.cn

that the related researches of energy consumption and greenhouse gas emissions of the water system were initially only used as part of the environmental impact assessment and life cycle assessment. However, with the advancement of climate change research, a large number of thematic studies have been conducted on the energy consumption and greenhouse gas emissions of water systems, along with calculation, assessment, relevant policy recommendations and technological optimizations. Cluster analysis shows that research in this field primarily concentrates on the “water-energy-carbon” nexus, quantitative analysis, environmental impact assessments grounded in life cycle assessments, and optimization explorations. Overall, this field has established a relatively complete research system. However, there are few citation-derived branches, no apparent hierarchical network, and an unclear generational replacement of research hotspots. The research depth is still lacking.

Key words: urban water system; water-energy-carbon nexus; water-carbon nexus; CiteSpace citation analysis; greenhouse gas

人类对水资源的开发利用活动贯穿于生产和生活的全过程,城市水系统中各环节如取水、制水、配水、用水、污水处理等均需消耗能源与材料,同时产生大量温室气体排放,城市水系统能源消耗可达国家总能源消耗的13%^[1]。随着城市发展,经济和人口持续增长,人类对水资源的开发利用强度进一步增加,城市水系统能源消耗与材料使用扩增,进而导致碳排放量不断增大。水-能-碳内在关联机制在未来水资源管理政策中将逐步受到重视,区域宏观尺度及微观尺度的城市水系统碳排放研究迅速成为研究热点之一^[2-3]。近年来,为推动城市水能节约及实现低碳发展目标,大量学者对城市水系统能源消耗和温室气体排放相关核算方法、范围及两者之间的内在关系机理等方面进行了研究探索,然而国内目前很少有研究对城市水系统能源消耗和温室气体排放文献进行总结归纳,相关的文献计量学研究也尚未见报道。因此,系统梳理归纳了近15年城市水系统能源消耗及温室气体排放相关研究,并在此基础上通过文献计量学分析软件 CiteSpace 对此领域已发表文献进行文献计量学分析,以期在城市水系统低碳管理相关研究提供方向参考。

1 方法与数据

基于信息可视化技术和引文分析理论,通过 CiteSpace 对城市水系统能耗及温室气体排放研究进行文献计量学分析,并绘制该领域研究知识图谱,梳理归纳研究发展趋势及方向。

1.1 文献计量学与 CiteSpace 软件

文献计量学将图形学、信息科学、数学等学科

的理论与方法和文献的引文分析、共现分析相结合,对相关领域知识系统的特征、结构以及规律进行客观性描述^[4],并利用可视化图谱展示领域相关研究的发展趋势。CiteSpace 是文献计量学分析常用软件,其优势在于挖掘相应领域已发表文献中蕴含的潜在信息,借助可视化的手段,以知识图谱形式揭示其内在结构及深层规律^[5]。

1.2 数据来源

数据来自 Web of Science 数据库检索采集的文献数据,以“water cycle”“greenhouse gas emissions”的同、近义扩展作为检索词进行检索。同、近义词扩展信息如表1所示,文献检索策略如表2所示。

表1 检索词的同、近义扩展信息

Tab.1 Extended information of synonyms and homoonyms

项目	检索词	相近词
限定词1	water cycle	water treatment, water production, water distribution, water conservation, water saving, water resource management
限定词2	greenhouse gas emissions	climate change, energy consumption, GHGs emissions, carbon emission, GHG, emission, climate action, sustainable, CO ₂ , energy

表2 文献检索策略

Tab.2 Literature retrieval strategy

项目	内容
检索内容	限定词1和限定词2
检索字段	主题、篇名、关键词、摘要
检索模式	精确
时间跨度	2007年—2021年
文献类型	论文、会议论文、综述
文献来源	Web of Science

1.3 数据处理方法

文献导出时对所有文献进行人工检查,剔除信息不完整的文献,如作者缺失;剔除报告、新闻、会议通知等明显不相关条目,并通过审阅摘要的方式,筛选去除内容相关较弱的条目。

2 结果与讨论

2.1 文献检索结果分析

根据表2所述检索策略,收集Web of Science数据库2007年—2021年城市水系统能耗及温室气体排放相关学术论文共380篇,其中研究性论文328篇、综述性论文43篇,其他类型9篇,以阅读摘要方式筛选相关性偏弱条目后,获取有效文献231篇,年度文献发表数量及发展趋势如图1所示。

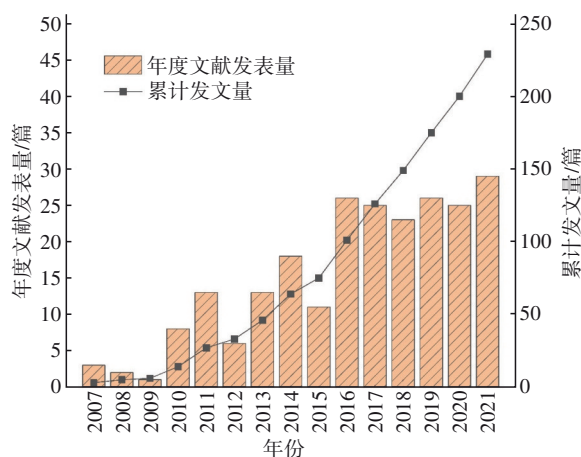


图1 2007年—2021年城市水系统能耗及温室气体排放研究成果发表情况

Fig.1 Publication of research results on energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system during 2007–2021

根据文献产出量及其变动趋势,可分析此研究方向在知识体系中的地位和热度。由图1可见,城市水系统能耗及温室气体排放研究领域的文献累计发文量呈指数型上升,2016年—2021年年均发文量达25篇,表明该领域的受关注程度逐年增加。自2016年起,年度文献发表量维持高位波动,表明此领域热度较高。2015年全球平均地表温度创下有气象观测记录以来的最高值,气候变化的负面影响使得温室气体排放受到重视,2015年12月《巴黎协定》提出“将全球平均气温较工业化前水平升高幅度控制在 2°C 之内”的目标,以避免气候变化带来的大量损失与风险。为了应对这一世纪挑战,大量学者对此展开了探索。

2.2 文献发表期刊分布分析

充分掌握文献发表的期刊分布信息,能够为早期文献搜集以及相关能力、知识的储备指明方向。同时,发表期刊的学术影响力也反映了该领域研究的重要性。根据检索,城市水系统能耗及温室气体排放相关文献分别发表在82家学术期刊上,刊文量最高的10家期刊如表3所示。可以看出,城市水系统能耗及温室气体排放相关文献主要发表在环境生态学、环境管理学及能源研究领域,除Water期刊外,其余期刊2022年的影响因子均在8.0以上,具有一定的影响力。

表3 2007年—2021年城市水系统能耗及温室气体排放相关研究成果发表期刊分布

Tab.3 Distribution of research results published journals on energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system during 2007–2021

期刊	发文数量/篇	影响因子(2022年)	JCR分区
Journal of Cleaner Production	8	11.072	Q1
Environmental Research	7	8.431	Q1
Environmental Science & Technology	7	11.357	Q1
Water	7	3.530	Q2
Energy	6	8.857	Q1
Journal of Environmental Management	6	8.910	Q1
Water Research	6	13.400	Q1
Applied Energy	5	11.446	Q1
Resources Conservation and Recycling	5	13.716	Q1
Science of the Total Environment	5	10.753	Q1

根据统计,刊文量前10位学术期刊上所发表的城市水系统能耗及温室气体排放相关学术论文共计62篇,基本归属为JCR一区期刊,所发表成果累计数量占总文献检索数量的26.8%,表明此方向具有较高的研究价值,在环境及能源领域的学术认可程度较高。

2.3 文献关键词共现与突现性分析

文献关键词是对论文核心主题的概括,利用CiteSpace进行关键词共现分析以及突现性检测,可为构建城市水系统能耗及温室气体排放研究领域的知识体系和识别发展动向提供帮助。通过g-index

混合量化指标^[6]对文献进行筛选,剔除部分影响较低的文献以确保图谱的简洁性与分析结果的可靠性。关键词共现图谱如图2所示,关键词节点之间的链接颜色从深红到浅黄对应时间跨度(2007年—2021年),连线粗细反映关键词之间的联系紧密程度。

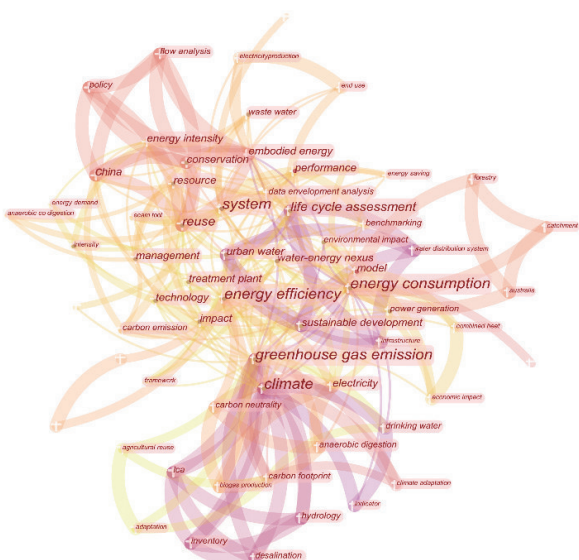


图2 城市水系统能耗及温室气体排放研究领域关键词共现图谱

Fig.2 Co-occurrence map of key words in the research field of energy and greenhouse gas emissions of urban water system

关键词在论文中的共现频次反映了彼此之间的关联程度,分析文献集中关键词的共现情况可以确定主题之间的关系。通过统计文献中主题词的共现频率,构建关键词共现网络,分析共现网络的拓扑结构、连接方式以及节点的重要性,可以揭示热门主题、相关主题和主题之间的演化关系,以展示主题之间的关联,帮助研究者了解学科的动态并发现新的研究方向。结果表明,城市水系统能耗与温室气体排放领域关键词共现图谱中共有关键词节点74个,连接255条,密度为0.094 4,衍生分支少,且未见明显的层级网络,一定程度上表明该领域研究规模较小。早期研究关键词主要集中在生命周期评价、饮用水处理、配水系统等方面,近期研究关键词主要集中在再生水利用、水资源管理、碳排放强度、污水处理等方面。

突现值(Burst)反映了关键词在某一时段引用量的变化,可用于发现某一个主题词、关键词衰落

或者兴起的情况。结合关键词突现图谱(见图3),发现早期研究方向主要集中在基础设施(2007年—2008年)、可持续发展(2007年—2008年)、生命周期评价(2009年—2012年)、海水淡化(2009年—2012年)等方面,近期研究主要集中在隐含能源(2013年—2017年)、能源消耗(2015年—2017年)、节水(2013年—2017年)、污水处理(2014年—2018年)等方面。分析该领域的研究趋势如下:早期研究中水系统的能耗与温室气体排放仅作为基础设施建设环境影响评估、生命周期评价、可持续发展分析、海水淡化技术评估研究中的部分章节,所占篇幅的比例较小,非核心研究内容。随着全球变暖趋势以及此背景下气候变化学科的理论发展,水系统能源消耗、水资源管理政策的气候考量、水系统相关工艺的能耗与温室气体排放等开始受到科研人员的重视,大量主题研究不断涌现。关键词共现图谱中上述关键词节点间连接紧密,知识网络重叠度较高,而表示时间差异的链接颜色区分度较弱,关键词突现图谱中具备突现性的关键词较少。这表明研究热点代际更替规律不明显,可能与城市水系统能耗及温室气体排放领域研究起步晚、发展历史较短有关。

Top 10 Keywords with the Strongest Citation Bursts

Keywords	Year	Strength	Begin	End	2007 - 2021
infrastructure	2007	1.26	2007	2008	
sustainable development	2007	1.06	2007	2008	
lca	2007	1.11	2009	2012	
desalination	2007	1.11	2009	2012	
embodied energy	2007	1.65	2013	2017	
conservation	2007	1.11	2013	2018	
waste water	2007	1.22	2014	2018	
energy consumption	2007	1.55	2015	2017	
model	2007	1.68	2018	2019	
performance	2007	1.29	2018	2019	

图3 城市水系统能耗及温室气体排放相关研究领域关键词突现图

Fig.3 Citation bursts map of key words in the research field of energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system

2.4 文献共被引分析

文献共被引指两篇文献共同出现在第三篇施引文献的参考目录中,这两篇文献则形成共被引关系。共被引次数越多,说明这两篇文献的相似之处越多,使用可视化技术,将共被引矩阵可视化

络即为引文网络。引文网络是文献之间因引用关系而形成的一种网络,引用关系隐含文献内容的相关性以及知识的传递,构建引文网络可以分析研究领域的现状以及发展趋势。

城市水系统能耗及温室气体排放领域的引文网络图谱如图4所示,其中文献节点之间的链接颜色从深红到浅黄对应时间跨度为2007年—2021年,连线粗细反映文献之间的相似程度由强到弱。根据相关节点的连接数及其在引文网络中的位置可知该项研究在领域中的影响力与重要程度,由此总结出该领域引文网络中最关键的10篇文献,文献的具体信息如表4所示。

分析表4中10篇文献的关键研究发现,城市水系统能耗及温室气体排放研究方法主要有投入产出法、生命周期评价法、直接计算法等,数据来源主要为已发表文献中的数据、政府或机构统计数据、实际调研数据等。相关核算方法、边界和数据的统计获取等尚无规范标准,缺乏一个整体和系统的框架,难以捕捉综合城市水系统中多种水-能源-温室气体的联系。该领域已发表研究更多集中在定量分析,而定性分析较少;相较早年,目前研究在广度

和深度上有所扩展,研究对象从发达地区向欠发达地区扩展;研究尺度从单一对象向多个对象比分析扩展;研究主题从全环节整体核算到细分环节局部核算扩展。

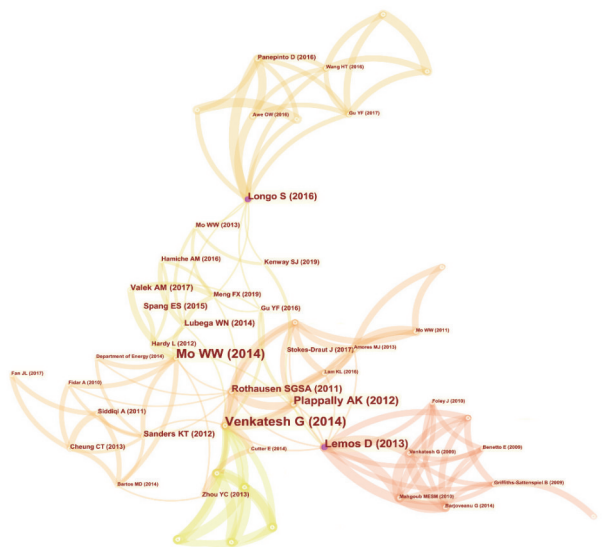


图4 城市水系统能耗及温室气体排放研究领域引文网络
Fig.4 Citation network in the research field of energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system

表4 城市水系统能耗及温室气体排放领域关键研究信息

Tab.4 Key research information in the field of energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system

第一作者	发表年份	研究区域	方法	数据来源	研究对象	主要结论
Venkatesh	2014	都灵、奥斯陆、南特、多伦多	生命周期评价	文献数据	水系统能耗与碳排放	城市水系统的碳排放受地理、气候、技术和社会等因素影响
Mo	2014	坦帕湾、圣地亚哥	基于投入产出的混合分析	文献数据、统计数据	3种供水方案的能源消耗与温室气体排放	圣地亚哥隐含能源和能源成本较高,碳排放量较低,在两个地区再生水利用均为最佳方案
Lam	2017	全球30个城市	文献比较	文献数据、统计数据	供水能耗	过去10年人均供水能源使用量普遍减少,建议节约用水以抵消供水相关能源消耗的增加
Lemos	2013	阿威罗市	生命周期评价	文献数据、调查数据	供水能耗	城市供水系统的电力消耗大部分发生在取水和水处理阶段
Longo	2016	全球600座污水处理厂	文献比较	文献数据	污水处理能耗	表征能源绩效的单一关键指标不具备普适性,处理能力、稀释倍数、流量、技术选择、工厂布局、所在地区等因素均影响污水处理厂能耗
Rothasen	2011	全球范围	文献比较	文献数据	水部门能耗	定义了将能源使用整合到水资源管理的必要性
Spang	2015	东湾市	直接计算	统计数据	供水能耗	供水能耗受季节、距离、海拔等因素影响
Valek	2017	墨西哥	直接计算	调查、统计数据	水系统能耗与碳排放	墨西哥城供水系统消耗了整个水系统90%的能源,产生了90%的碳排放,节水可以大幅降低水系统的能耗与碳排放
Sanders	2012	美国	直接计算	统计数据	用水能耗	美国用水能源消耗约占一次总能源量的12.6%
William	2014	埃及	投入产出模型	文献数据、统计数据	水系统能耗	从工程的角度讨论了能源-水的关系,将城市用水量与能耗相关联

2.5 基于聚类图谱的研究进展分析

基于共引关系的摘要、关键词、标题文本聚类分析能够帮助研究者在科学文献中发现主题聚类,揭示学科领域的发展趋势和演化过程,有助于理解领域内的研究重点和热点,以评估不同研究方向的发展潜力、研究合作的机会以及研究资源的分配,进而为制定科学研究的战略和决策提供参考。2007年—2021年,城市水系统能耗及温室气体排放领域相关研究的摘要、关键词和标题 AKT (Abstract, Keywords, Title) 聚类分析可视化图谱如图5所示。其中,反映聚类效果的模块化 (Modularity) 评价指标 Q 值为 0.853 3, 反映聚类成员相似度的同质性 (Mean Silhouette) 评价指标 S 值为 0.929, 表明聚类结果结构显著,可信度高^[7]。聚类结果显示,研究内容大致可以分为“水-能-碳”关系研究 (#0 聚类 water-energy-carbon nexus, 红色节点)、量化分析研究 (#1 聚类 quantitative assessment, 黄色节点)、基于生命周期评价的环境影响评估研究 (#3 聚类 case studies, 绿色节点) 及优化探索研究 (#6 聚类 optimization exploration, 蓝色节点) 四个方向。

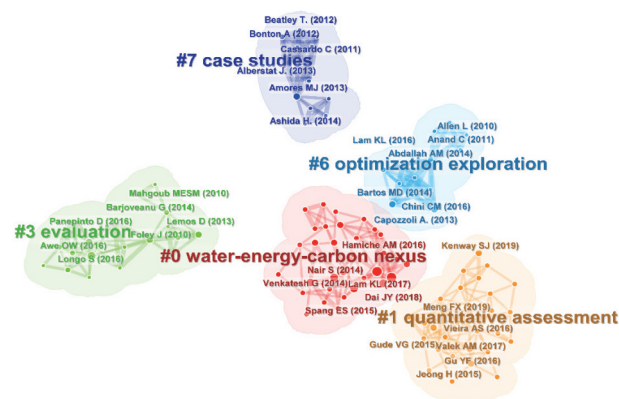


图5 城市水系统能耗及温室气体排放研究聚类图谱

Fig.5 Clustering atlas of urban water system energy consumption and greenhouse gas emissions research

2.5.1 “水-能-碳”关系研究

“水-能-碳”关系是城市水系统能耗和碳排放内在关系机理研究的基础。Wolf等^[8]构建了城市水系统运行能源强度模型,阐述了城市水系统的“水-能”关系。Chhipi-Shrestha等^[9]对加拿大不列颠哥伦比亚区城市用水和相关能源消耗历史数据进行相关性分析,发现水与能源、水与碳、能源与碳的斯皮尔曼相关系数分别为0.94、0.89、0.83,揭示了该地

区“水-能-碳”之间显著的强相关关系。大量研究表明,“水-能-碳”三者之间呈现复杂的相互关系,且随着地区差异、水资源类型、能源类型不同而呈现复杂的变化。Nair等^[10]、Dai等^[11]分别从概念、技术和方法角度进行了系统综述。

2.5.2 量化分析研究

量化评估城市水系统的能源使用和温室气体排放情况可以为城市低碳环境管理决策制定提供客观性和数据性参考。从研究对象来看,早期研究主要集中在能源的评估上,城市水系统运营成本中能源消耗最高^[12]。2015年我国与城市水系统相关的能源消耗约为 7.32×10^8 GJ, 约占全国能源消耗的0.6%, 水务部门用电量约占全国用电量的3.4%^[13]。也有研究从能源利用效率出发,评估了城市水系统单一环节或部分环节的单位水量能源消耗强度,精确到细分环节的量化评估提升了研究内容的精准性。此外,城市水系统中隐含能源相关的碳排放^[14]也是不可忽略的一部分。2005年美国由城市水系统能耗间接引起的水系统碳排放量达 2.9×10^8 t, 约占当年碳排放总量的5%。在细节方面,污水处理^[15]、供水^[16] (包括取水、制水、配水)、用水^[17-18] (工业用水、生活用水、农业用水) 等常规水源水系统能耗及温室气体排放水平评估相关研究较为丰富,非常规水源如调水^[19]、低影响开发设施^[20]、雨水与污水回用^[21]等方面的能耗及碳核算也逐渐开展相关研究。

不同国家和地区的城市水系统能耗与碳排放水平存在显著差异^[22],因此,该领域学者相继开展区域性对比研究^[23-25],相关研究数据结果如表5所示。不同地区水系统的能源消耗和温室气体排放强度差距较大。对比不同环节的能耗和排放强度发现,终端用水的能耗和温室气体排放量巨大,远超出其他环节,由于缺乏明确的系统边界和数据^[26],相关研究较少。相对于常规水源,非常规水源(雨水、再生水、海水淡化等)能耗与碳排放强度均较高,气候友好性较弱。但对于供水能耗高和碳排放强度大的地区,发展非常规水源代替有利于实现水资源可持续利用目标与气候目标间存在的协同效益。

此外,现有量化评估研究大多集中于单一或部分区域,缺乏城市尺度的大规模比较研究^[25]。尽管少数综述通过文献研究进行了区域比较^[12,26-27],但

由于计算方法和统计口径的差异,故缺乏可比性。多区域研究有助于更好地了解地理空间条件对水资源管理决策的影响^[14]。一些因素对城市水系统能源消耗的影响作用可能在空间上不同^[10],因此,水资源管理政策低碳优化的有效性可能存在空间差异,有必要进一步分析城市水系统能源消耗和温室气体排放强度的空间分布特征和空间异质性,为因地制宜的水资源管理政策低碳优化决策提供参考。

表5 不同地区城市水系统各过程、环节的能耗和温室气体排放强度

Tab.5 Energy consumption and greenhouse gas emission intensity of urban water systems in different regions

过程	细分环节	地区	能耗/ (kW·h·m ⁻³)	GHG排放量/ (kgCO ₂ -eq· m ⁻³)
供水	取水	美国	0.07~1.87	0.021~0.560
		中国		0.213
	取水	中国	0.13~0.20	
		英国	0.05~0.12	
		澳大利亚	0.48~0.53	
		英国	0.09	
	制水	新加坡		0.802
		澳大利亚	0.1~0.6	
	制水	中国	<0.03	
		中国	<0.01	
		中国	<0.02	
		中国	<0.01	
	配水	常规	0.3	
		远距离输水	0.082~0.518	
		高层建筑二次加压	0.65~1.70	
	非常规水源供水	雨水	0.20~1.40	0.63
		新加坡		0.378
		再生水	0.7~1.2	
			1.02	0.77
		英国	0.49	
		海水淡化	3.6	
用水	加热		0~54	
	居民生活	美国	208.38	
污水处理	污水回收	南非	0.14	
		美国	0.1~0.3	
		新加坡		0.363
	水处理	波兰		0.6~1.7
		中国上海		0.288~0.738
		中国深圳	0.20~0.78	0.27~0.79

2.5.3 基于生命周期评价的环境影响评估研究

此类研究主要以自来水厂或污水处理厂、城市或地区为案例分析对象,在进行基于生命周期评价的环境影响评估时,将相关的能源消耗与GHG排放作为重点评估内容。例如,Amores等^[28]、Lemos等^[29]、Barjoveanu等^[30]率先通过生命周期评价法分别评估了西班牙塔拉戈纳市、葡萄牙阿威罗市、罗马尼亚雅西市城市水系统的环境影响;Bonton等^[31]通过生命周期评价法评估了魁北克省两座水处理厂的环境影响。在研究早期,能源消耗与GHG排放仅作为城市水系统能量消耗与环境释放的一部分出现在环境影响评估中,但仍被列为重要的评估对象,说明城市水系统能耗与温室气体排放对环境影响的重要性。

生命周期评估需要考虑物体的建造、运行和维护以及拆除的整个过程。典型城市水系统包括供水系统、终端用水和污水处理系统,供水系统包括水的提取、生产和分配,污水处理系统包括污水收集和污水处理。然而,大多数研究仅考虑运营阶段除终端用水以外的能源消耗和温室气体排放。一方面,虽然建造和拆除阶段的能耗和排放远低于运营阶段,但随着国家城市化进程的放缓,大批量的城市水系统基础设施服务年限集中到期,大量的拆迁、改造、重建等工作使得建造和拆除阶段的能耗和碳排放量增加,从全生命周期角度考量城市水系统的能源消耗与碳排放研究将更为重要。另一方面,随着经济、信息技术的发展,数据、信息可获得性增加,终端用水作为城市水系统最主要的能耗与碳排放产生环节,更丰富的相关研究将变得更易实现。目前,大多数研究仅考虑了电力相关的能源消耗,尽管城市水系统能源消耗基本源于电力供应^[13],但终端用水环节也存在一定量的天然气、沼气、柴油和其他能源使用形式^[16],由此带来的碳排放情况有必要开展相关评估。

2.5.4 优化探索研究

此类研究在量化评估的基础上对城市水系统能耗及温室气体排放的影响因素以及节能-碳减排优化方向进行了探索。Chini等^[32]、Abdallah等^[33]分析了美国居民生活用水及相关能源的影响因素,并量化了生活节水的节能潜力;Bartos等^[34]和Zhou等^[35]分别评估了美国亚利桑那州、中国常州市节水政策的节能-碳减排效益。除了水资源管理政策的

节能-碳减排效益评估外,学者也对城市水系统中各环节能耗与温室气体排放的影响因素以及节能-碳减排的优化方向进行了探索,提出了区域针对性的政策建议,具体如表6所示。

表6 城市水系统能耗、温室气体排放影响因素及区域性政策建议

Tab.6 Factors affecting energy consumption and greenhouse gas emissions of urban water system and regional policy recommendations

地区	影响因素	环节	建议
中国北京	气候	取水	发展非常规水源,在干旱气候条件下,南水北调工程将成为最优替代水源,且相对气候干旱地区,再生水水源更适合气候潮湿地区
中国天津	水资源供需匹配		使用再生水满足低水质用水需求的同时,平衡海水淡化水量以保证能耗水平
中国	单位长度管道服务人口	配水	增加人口稠密地区的供水管网密度代替提高供水压,可显著降低能耗和温室气体排放强度
中国	供水水压、高层建筑数量		根据高层建筑数量调整供水水压
中国	处理工艺	水处理	推广污泥厌氧消化工艺可以显著降低废水处理的温室气体排放量
中国上海	污水厂负荷率、处理工艺、规模		适当的规模、高负荷率以及较低的理论耗氧量等可以有效降低废水处理的温室气体排放量
美国	污水厂流量、处理技术、电力能源组成		节水、污水处理能量回收、废水处理技术改进等
美国	节水-节能器具的使用	用水	替换成高效电器可以有效减少居民生活用水量以及相关能耗
全球	地形、气候、温度、降雨量	全过程	通过海水淡化、再生水利用等降低新水的取用量,并结合可再生能源等降低相关能耗

上述文献提出城市水系统能耗和温室气体排放强度既受气候、地形等自然因素的影响,也受水资源供需情况、单位长度管道服务人口、高层建筑数量、能源组成、节水-节能器具使用等社会因素的影响。此外,供水水压、污水处理厂负荷率、处理工艺及规模等技术因素的影响也不可忽略。针对相关影响因素,研究者对城市水系统各环节提出了节能-低碳优化建议,例如:取水环节的非常规水源代替、配水环节的供水压力管理优化、水处理环节的低碳工艺选取、工艺参数优化以及能量回收等。但相关优化措施不具普适性,例如雨水收集、再生水利用等非常规水源利用在部分地区将增加水系统

能耗与排放;紧凑的城市规划可以使水系统管道温室气体排放量降低;而高密度住址区的高层建筑又会引起供水能耗与温室气体排放量的增加^[2];污水处理工艺选取、优化等大多受到经济方面的限制。

向“碳中和”过渡不仅需要技术创新,还需要水资源管理制度的创新。研究^[36]表明,以节水政策为代表的低碳优化水资源管理政策有利于在节约水资源的同时,优化提升节水-节能-碳减排协同效益,但复杂而广泛的影响因素又对水资源管理政策提出了区域差异化管理的要求,兼顾减排效率与区域公平性的城市水系统低碳优化政策需要更为深入的研究和系统的数据支撑。

3 结论与展望

3.1 结论

文献计量分析研究表明城市水系统能耗及温室气体排放领域相关研究已初步形成了一个较为完整的体系。作为新兴学科的交叉领域,此方向的研究获得了较高的研究热度与价值认可度。知识图谱表明,早期研究中水系统的能耗与温室气体排放仅作为环境影响评估、生命周期评价等研究的重要组成部分,但随着气候变化学科理论的发展,围绕水系统能源消耗与温室气体排放,以及相关的政策考量与技术优化报道了大量主题研究。聚类分析表明,该领域研究大致可以分为“水-能-碳”关系研究、量化分析研究、基于生命周期评价的环境影响评估研究、优化探索研究等四类。其中,“水-能-碳”关系方向研究从地区差异、水资源类型、能源类型等方面证实了城市水系统“水-能-碳”关系的复杂多变性;量化分析方向研究为相关决策制定提供了客观性和数据性参考价值;基于生命周期评价的环境影响评估在早期已开展相关研究,并将水系统能源消耗与GHG排放视为环境影响评估的重要内容;优化探索研究在量化评估的基础上对城市水系统能耗及温室气体排放的影响因素以及节能-碳减排优化方向进行了探索。

3.2 不足与展望

城市水系统能耗及温室气体领域研究已经初步形成一个较为完整的体系,但目前该领域引文网络重叠度高,衍生分支少,未见明显的层级网络,研究热点代际更替规律不明显,研究深度上还有所欠缺,这一点可能与该领域研究起步晚、发展历史较

短有关。

根据文献计量学分析与研究梳理结果,提出以下优化建议:①研究范围与边界扩展,建造和运营阶段及终端用水相关能耗和温室气体排放等相关研究较少,研究中系统边界有待扩展并明确。②研究深度拓展,水系统中的非电力能源消耗、水净化与污水处理中的消毒、混凝等化学药品使用带来的间接碳排放,公共供水管网更新与维护的管材使用间接碳排放,城市高层住宅二次加压供水的额外能源消耗与碳排放,污水收集管道中污染物生化反应产生的碳直接排放等,大量细节有待探明。③核算方法、边界和数据的统计获取等尚无规范标准,缺乏一个整体和系统的框架来捕捉综合城市水系统中多种水-能源-温室气体的联系。④研究尺度有限,缺少大范围多区域城市尺度的对比研究,且研究边界往往局限于城市地理或城市经济系统边界,忽略了区域特性及区域间相互影响。⑤水资源管理政策对城市水系统能耗和温室气体排放影响不明晰,相关协同效应与利益权衡需要进一步明确。

参考文献:

- [1] GRIFFITHS-SATTENSPIEL B, WILSON W. The Carbon Footprint of Water[R]. USA: River Network, 2009.
- [2] ZHANG Q, LIU S M, WANG T, *et al.* Urbanization impacts on greenhouse gas (GHG) emissions of the water infrastructure in China: trade-offs among sustainable development goals (SDGs) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2019, 232: 474-486.
- [3] 李增. 环京津城市能源碳排放与水资源纽带关系分析[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2019.
- LI Zeng. The Analysis of the Relationship between Energy Carbon Emissions and Water Resources in Surround Cities of Beijing-Tianjin [D]. Beijing: China University of Mining and Technology (Beijing), 2019 (in Chinese).
- [4] 范全青, 郭维真, 凤元杰. 我国文献计量学研究 30 年之发展[J]. *情报资料工作*, 2009 (3): 30-33.
- FAN Quanying, GUO Weizhen, FENG Yuanjie. The development of bibliometrics research in China in the past 30 years [J]. *Information and Information Work*, 2009 (3): 30-33 (in Chinese).
- [5] CHEN C M. CiteSpace II: detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2006, 57 (3): 359-377.
- [6] EGGHE L. Theory and practise of the g-index [J]. *Scientometrics*, 2006, 69(1): 131-152.
- [7] CHEN C M, IBEKWE-SANJUAN F, HOU J H. The structure and dynamics of cocitation clusters: a multiple-perspective cocitation analysis [J]. *Journal of the American Society for Information Science and Technology*, 2010, 61(7): 1386-1409.
- [8] WOLF F G, WILKINSON R. State-wide Estimate of Water-related Energy Use [R]. California: California Energy Commission, PIER Energy-related Environmental Research Program, 2001.
- [9] CHHIPI-SHRESTHA G, HEWAGE K, SADIQ R. Water-energy-carbon nexus modeling for urban water systems: System dynamics approach [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2017, 143 (6): 04017016.
- [10] 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 [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2014, 89: 1-10.
- [11] DAI J Y, WU S Q, HAN G Y, *et al.* Water-energy nexus: a review of methods and tools for macro-assessment [J]. *Applied Energy*, 2018, 210: 393-408.
- [12] SMITH K, LIU S M, LIU Y, *et al.* Can China reduce energy for water? A review of energy for urban water supply and wastewater treatment and suggestions for change [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 91: 41-58.
- [13] XIANG X Z, JIA S F. China's water-energy nexus: assessment of water-related energy use [J]. *Resources, Conservation and Recycling*, 2019, 144: 32-38.
- [14] MO W W, WANG R R, ZIMMERMAN J B. Energy-water nexus analysis of enhanced water supply scenarios: a regional comparison of Tampa Bay, Florida, and San Diego, California [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(10): 5883-5891.
- [15] XI J R, GONG H, ZHANG Y J, *et al.* The evaluation of GHG emissions from Shanghai municipal wastewater treatment plants based on IPCC and operational data integrated methods (ODIM) [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 797: 148967.
- [16] SMITH K, LIU S M, CHANG T. Contribution of urban water supply to greenhouse gas emissions in China [J]. *Journal of Industrial Ecology*, 2016, 20(4): 792-802.

- [17] WANG X C, KLEMEŠ J J, WANG Y T, *et al.* Water-energy-carbon emissions nexus analysis of China: an environmental input-output model-based approach [J]. *Applied Energy*, 2020, 261: 114431.
- [18] SOUSA V, MEIRELES I. Dynamic simulation of the energy consumption and carbon emissions for domestic hot water production in a touristic region [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2022, 355: 131828.
- [19] LIU J H, CHEN S L, WANG H, *et al.* Calculation of carbon footprints for water diversion and desalination projects [J]. *Energy Procedia*, 2015, 75: 2483-2494.
- [20] 李晨璐, 郑涛, 彭开铭, 等. 基于全生命周期法的海绵城市雨水系统碳排放研究 [J]. *环境与可持续发展*, 2019, 44(1): 132-137.
- LI Chenlu, ZHENG Tao, PENG Kaiming, *et al.* Study on carbon emissions of sponge city stormwater system based on life cycle assessment [J]. *Environment and Sustainable Development*, 2019, 44(1): 132-137 (in Chinese).
- [21] CHANG J, LEE W, YOON S. Energy consumptions and associated greenhouse gas emissions in operation phases of urban water reuse systems in Korea [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 141: 728-736.
- [22] 余娇. 基于“水—能—碳”关联的郑州市水系统碳排放研究 [D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2020.
- YU Jiao. Study on Carbon Emissions of Water System in Zhengzhou Based on “Water-Energy-Carbon” Nexus [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2020 (in Chinese).
- [23] KENWAY S J, SCHEIDEGGER R, LARSEN T A, *et al.* Water-related energy in households: a model designed to understand the current state and simulate possible measures [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 58: 378-389.
- [24] VENKATESH G, CHANA, BRATTEBØ H. Understanding the water-energy-carbon nexus in urban water utilities: comparison of four city case studies and the relevant influencing factors [J]. *Energy*, 2014, 75: 153-166.
- [25] LAM K L, KENWAY S J, LANT P A. Energy use for water provision in cities [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2017, 143: 699-709.
- [26] WAKEEL M, CHEN B, HAYAT T, *et al.* Energy consumption for water use cycles in different countries: a review [J]. *Applied Energy*, 2016, 178: 868-885.
- [27] MENG F X, LIU G Y, LIANG S, *et al.* Critical review of the energy-water-carbon nexus in cities [J]. *Energy*, 2019, 171: 1017-1032.
- [28] AMORES M J, MENESES M, PASQUALINO J, *et al.* Environmental assessment of urban water cycle on Mediterranean conditions by LCA approach [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 43: 84-92.
- [29] LEMOS D, DIAS A C, GABARRELL X, *et al.* Environmental assessment of an urban water system [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2013, 54: 157-165.
- [30] BARJOVEANU G, COMANDARU I M, RODRIGUEZ-GARCIA G, *et al.* Evaluation of water services system through LCA. A case study for Iasi City, Romania [J]. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 2014, 19: 449-462.
- [31] BONTON A, BOUCHARD C, BARBEAU B, *et al.* Comparative life cycle assessment of water treatment plants [J]. *Desalination*, 2012, 284: 42-54.
- [32] CHINI C M, SCHREIBER K L, BARKER Z A, *et al.* Quantifying energy and water savings in the US residential sector [J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(17): 9003-9012.
- [33] ABDALLAH A M, ROSENBERG D E. Heterogeneous residential water and energy linkages and implications for conservation and management [J]. *Journal of Water Resources Planning and Management*, 2014, 140(3): 288-297.
- [34] BARTOS M D, CHESTER M V. The conservation nexus: valuing interdependent water and energy savings in Arizona [J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(4): 2139-2149.
- [35] ZHOU Y C, ZHANG B, WANG H K, *et al.* Drops of energy: conserving urban water to reduce greenhouse gas emissions [J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(19): 10753-10761.
- [36] SPANG E S, HOLGUIN A J, LOGE F J. The estimated impact of California's urban water conservation mandate on electricity consumption and greenhouse gas emissions [J]. *Environmental Research Letters*, 2018, 13(1): 014016.

作者简介: 武利园(1984—), 女, 河南焦作人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 主要从事水质净化技术及水资源管理相关研究工作。

E-mail: wuliuyan@bucea.edu.cn

收稿日期: 2023-04-08

修回日期: 2023-06-02

(编辑: 丁彩娟)