

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2023.04.001

水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势

贡力^{1,2},董洲全¹,贾治元¹,杨腾腾¹,喻星博¹

(1. 兰州交通大学土木工程学院,甘肃 兰州 730070;
2. 兰州交通大学调水工程及输水安全研究所,甘肃 兰州 730070)

摘要:采用 Cite Space 软件对 2011—2021 年水利行业碳中和技术的研究热点与前沿技术进行分析,总结了水利行业低碳技术的历史和发展趋势,阐明了水利行业低碳技术的运用对促进国家能源结构转型升级的关键作用,研究了水利行业低碳技术的发展对于缩减碳源、提高碳汇的优势,发现水利行业面向碳中和的共性支撑技术、一体化技术和利用技术是未来三大研究热点,分析了水利行业在实现“3060”目标过程中的前沿技术,并展望了未来水利行业低碳前沿技术的发展方向及亟需解决的问题。

关键词:水利行业;低碳技术;碳中和;能源

中图分类号:X322;F426.91 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-1980(2023)04-0001-09

Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry

GONG Li^{1,2}, DONG Zhouquan¹, JIA Zhiyuan¹, YANG Tengting¹, YU Xingbo¹

(1. Department of Civil Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;
2. Institute of Water Diversion Engineering and Security of Water Transferring, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: Cite Space software was used to analyze the research hotspots and frontier technologies of carbon neutrality technologies in water conservancy industry from 2011 to 2021, summarize the history and development trend of low carbon technologies in water conservancy industry, clarify the key role of the application of low carbon technologies in water conservancy industry to promote the transformation and upgrading of national energy structure, and study the development of low carbon technologies in water conservancy industry for the advantages of reducing carbon sources and increasing carbon sinks. It is pointed out that the common supporting technology, integration technology and utilization technology for carbon neutrality in the water conservancy industry are the three major research hotspots in the future. This study also analyzes the frontier technology of water conservancy industry in the process of achieving the “3060” goal, and foresees the future development direction of low-carbon frontier technology in the water conservancy industry and the urgent problems that need to be solved.

Key words: water conservancy industry; low carbon technology; carbon neutrality; energy

随着碳达峰、碳中和“3060”战略的实施,中国持续推进产业和能源结构调整。为适应碳达峰、碳中和“3060”背景的战略需要,水利事业发展的总量和结构也必将并行调整、优化和完善,水利行业专业人员需要及时、准确地认识到碳达峰、碳中和“3060”国家战略带给水利行业的影响并据此研判未来的发展趋势,这对水利行业低碳技术的发展具有重要的意义。

围绕碳达峰、碳中和国家战略需求,深入推进水利工程低碳理念与技术革新,不仅可助力流域内生态环境保护、推进“十四五”能源领域科技创新规划实施,还可促进实现“3060”目标,完成国家能源结构转型升级。水利工程作为中国新能源发展的主要工程之一,2021 年中国水利建设投资达 7 576 亿元。因此,当前亟

基金项目:国家自然科学基金项目(51969011,72261024);甘肃省科技计划资助项目(20JR10RA274, 21JR7RA301,20JR2RA002);甘肃省优秀研究生“创新之星”项目(2022CXZX-603)

作者简介:贡力(1977—),男,教授,博士,主要从事长距离输水工程安全研究。E-mail:gongl@mail.lzjtu.cn

通信作者:董洲全(1997—),男,硕士研究生,主要从事长距离输水工程安全研究。E-mail:2416793647@qq.com

引用本文:贡力,董洲全,贾治元,等.水利行业低碳技术研究热点与前沿趋势[J].河海大学学报(自然科学版),2023,51(4):1-9.

GONG Li, DONG Zhouquan, JIA Zhiyuan, et al. Low carbon technology research hotspots and frontier trends in the water conservancy industry[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023, 51(4): 1-9.

需针对碳中和背景下水利行业低碳技术的战略趋势进行系统研究,揭示水利行业低碳技术对碳中和战略实施的促进机制,明确未来水利行业低碳技术的革新发展方向和技术思路,进而实现碳中和背景下中国水利行业低碳技术理论和技术的跨越式发展。

水利行业的碳中和主要是指在水资源、水工程等方面使所排放和产生的 CO_2 处于一种动态平衡的状态^[1]。本文将针对水利行业低碳技术的研究热点,从水利行业面向碳中和的共性支撑技术、一体化技术和利用技术三类技术出发,聚焦基于碳中和的低碳模型构建与决策、智慧水电一体化技术、水资源利用与保护技术等低碳手段,探索水利行业低碳技术。

1 水利行业碳中和研究情况

1.1 数据来源与分析方法

本文基于 Cite Space 软件绘制知识图谱^[2],以 Web of Science(WOS)数据库和中国知网 CNKI 数据库为数据源,将时间跨度设为 2011—2021 年,时间分区设为 1 年。在 WOS 数据库中 TS = (carbon neutral) AND TS = (water) 为检索条件,在 CNKI 数据库中主题 = “碳中和” 和主题 = “水” 为检索条件,通过检索共得到中文文献 880 篇,英文文献 372 篇。

1.2 发文量和学科分布

年度发文量能够全面反映我国水利行业碳中和技术的整体发展趋势,2011—2021 年水利行业碳中和技术研究发文量如图 1 所示,从图 1 可以看出,水利行业的发文情况可大致分为 2 个阶段。2011—2021 年 CNKI 和 WOS 发表文献的数量均在 0~90 篇之间,其中 2015—2016 年 WOS 发表文献的数量出现了较缓的增长,引起这一现象的原因可能是 2015 年《联合国气候变化框架公约》的第 21 届缔约方大会通过《巴黎协定》;2020—2021 年 CNKI 和 WOS 发表文献的数量均呈指数增长趋势,主要是因为中国在 2020 年提出的“3060”战略目标,这对水利行业碳中和技术的发展起到了重要推动作用。从整体上看,CNKI 2011—2021 年平均发文量为 62 篇,高于同期 WOS 平均发文量 24 篇;在 2020 年之后,两者均快速增长,CNKI 在 2021 年的发文量达到了 253 篇,WOS 在同

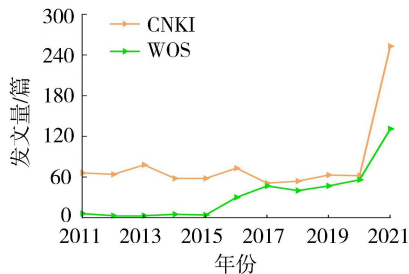


图 1 2011—2021 年水利行业碳中和研究发文量
Fig.1 Number of papers on carbon neutrality in water conservancy industry published from 2011 to 2021

从研究的学科分布来看,水利行业低碳技术在 CNKI 中主要集中在环境科学与资源回收、金属学及金属工艺、地质学等学科;在 WOS 中主要集中在能量燃料、化学工程、物理化学等学科。可见该技术呈现出多学科交叉融合的特征。基于 CNKI 和 WOS 数据库水利行业碳中和研究学科分布如图 2 所示。

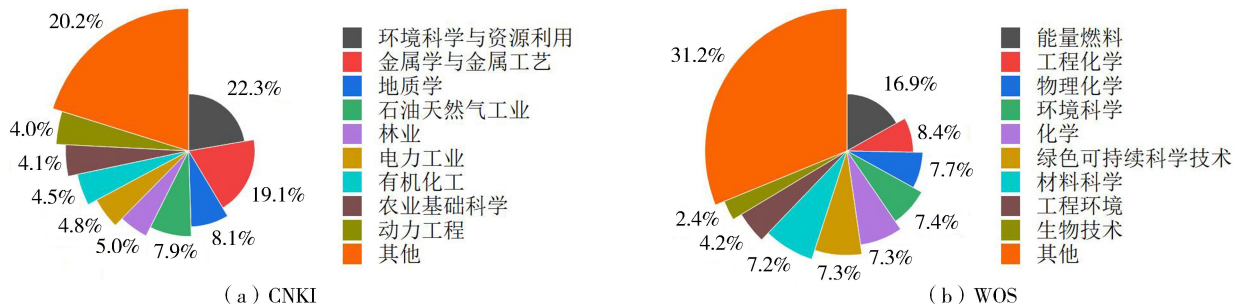


图 2 水利行业碳中和研究学科分布

Fig.2 Distribution maps of carbon neutrality research in water conservancy industry

1.3 水利行业低碳技术高频词

基于 Cite Space 软件通过关键词共现来分析水利行业碳中和领域的研究前沿及热点^[3],并绘制水利行业碳中和研究领域的关键词共现图谱。从图 3 可以看出,CNKI 关键词共现图谱中呈现出以碳中和为核心、多领域共同发展的趋势。碳中和、碳达峰、可再生能源等关键词的词频最高,究其原因可能是中国在 2020 年

系的建立以及政府部门的决策更加全面、公正。此外,沈菊琴等^[7]针对2021年郑州特大暴雨,构建了碳排放测度模型和STIRPAT模型,研究水利工程与碳排放的关系,为政府节能减排政策的制定提供科学依据。

碳中和背景下,水利行业面向碳中和的低碳模型构建与决策应向统筹化与多元化协同发展,其发展方向主要包括:①建成面向水利行业的国家碳中和成效监测评估指标体系和决策支撑系统,包括基于水利行业特点的碳减排进程与成效监测评估指标体系、数据采集体系、碳达峰碳中和脱碳成本模型。②针对日益复杂的气候环境所导致的灾害,建立水利工程与碳排放量的模型关系。③水利行业面向碳中和的低碳模型发展多元化。针对水、风、光等新能源的消纳问题,未来继续优化协调调度模型^[8],进而降低新能源的弃用率,实现各类能源的高效利用。

2.1.2 大数据下水利工程全生命周期碳排放量核算及指标构建

如何基于大数据背景下对水利工程全生命周期碳排放量进行核算及指标构建是实现碳中和的关键。水利工程全生命周期碳排放量的核算是未来节能减排、实现“双碳”目标的关键基础,而构建科学合理的水利工程全生命周期碳排放指标对评估碳排放造成的影响至关重要。此外,针对碳排放量核算和指标不易确定等问题,引入基于大数据下的云计算、人工智能、互联网等技术,可进一步提高碳排放量核算和指标构建的智慧化,进而对碳排放量进行科学预测,助力实现碳达峰碳中和。

碳中和背景下,目前国际上通用的碳排放量核算方法主要有实测法、排放因子法、物料衡算法^[9]。彭琛等^[10]研究发现,实测法和物料衡算法均不适合建筑领域碳排放量的核算,因此对其核算主要依托于排放因子法。而水利工程投资规模大、生命周期长,其碳排放量核算以碳足迹分析为基础,形成PA-LCA、EIO-LCA法和混合生命周期评价方法^[11]。上述方法可为工程中的碳减排提供技术和理论支撑,但在碳排放核算范围界定、数据库建立等方面还存在局限性,对此未来将展开进一步研究。碳中和背景下,有关碳排放指标的构建研究主要集中在低碳经济^[12]、低碳城市^[13]等方面。近年来有学者对低碳建筑构建了评价指标体系^[14],但对水利工程全生命周期碳排放指标的构建还缺乏相关的研究。

2.1.3 面向碳交易的检测技术

碳交易作为一种新型市场化的节能机制,不仅对控制污染有着重要的作用,而且还可以促进低碳节能技术的推广。碳交易是政府根据企业的减排承诺,向企业分配碳排放配额,企业排放的CO₂若低于该配额,则企业可向外出售;若高于此配额,则需要购买额外配额或缴纳罚款^[15]。在此背景下,企业必须发展CO₂的检测措施,从而实时、准确掌握企业自身CO₂的排放量,并以此为碳交易提供技术支撑。同时还需研究碳交易制度下对企业的精准激励措施,构建政府企业居民协同共治的碳交易机制。

针对水利行业CO₂的排放,开展相应的检测对碳交易是非常必要的。目前CO₂气体的检测方法其主要有气相色谱法、电化学法、固体电解式、可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)、光纤检测法、非分光型红外光谱法等。通过分析不同方法的优缺点,发现TDLAS和非分光型红外光谱法具有较高的检测灵敏度和高可靠性。TDLAS可以短时间内获得被测气体完整的光谱信号^[16],而且采用的可调谐激光二极管成本低、可靠性高、结构稳定;非分光型红外光谱法^[17]是国际上统一认定的CO₂检测技术,这种检测技术响应速度快、稳定性好、相较于其他检测技术成本低,而且由于其可以直接在现场检验,因此具有可行性。

2.2 水利行业面向碳中和的一体化技术

2.2.1 智慧水电一体化技术

水力发电作为我国能源革命转型的重要保障,不仅只有良好的经济效益和社会效益,而且相较于其他发电方式具有较大的优势^[18]。水电站按其建设规模可分大水电和小水电,大水电在科学调度、能源消纳等方面存在管理和技术难题,而小水电在一定程度上可以避免此类问题,因此应该进一步加强基于物联网技术下的智慧水利建设,实现大小水电的协调管理^[19]。一体化大数据平台作为智慧水电一体化的核心组成要素,通过融合大数据、云计算、人工智能、物联网等高新技术,为海量数据汇聚、治理、共享、服务等提供高效支撑。通过智慧调度,在汛期水量丰富时充分利用大水电的调度、蓄水等能力,使水资源得到充分利用;在枯水期利用大水电汛期蓄的水,保障区域内的用电需求。但随着风电等间歇性能源的并网,进一步加剧了输送压力,其运行管理及大规模消纳问题成为目前亟须解决的关键难题。

碳中和背景下,新能源并网后的运行管理问题,主要通过研发大水电、小水电、抽水蓄能电站与其他能源的智慧一体化调度系统,构建高效合理的交互运行手段等措施来解决。针对新能源大规模消纳问题,可通过

研发多能互补系统变革性技术来解决^[20-21]。对于偏远山区的水电站建设,未来应因地制宜地发展离网型水风光联合运行系统^[22]。此外,未来应根据不同区域的不同特点建立水风光储一体化的能源消纳系统,中国东部地区土地资源紧张且开发成本高,因此未来可发展水面光伏、海上发电-光伏开发和近地消纳;西部地区由于消纳能力低,且风光等能源不可储存、不可调节,因此可将风光能源接入流域梯级水电系统^[23],最大限度地挖掘和发挥多能互补潜力和优势,再联合打捆外送,实现能源的高效利用。

2.2.2 CO₂ 地质封存技术

CO₂ 地质封存技术(简称 CCS)是一种成本低、效率高的减排手段^[24],其技术路径是通过物理吸附法、化学吸附法、富氧燃烧法、膜分离等技术对大气中的 CO₂ 进行捕集,经压缩处理后采用石油或天然气的钻井技术注入封闭的地下储层^[25]。从宏观上看,地下储层上层的岩石、泥岩对封存后的 CO₂ 迁移起到了阻滞作用;从微观上看,地质岩层中的毛细管力将封存的 CO₂ 固定在岩层孔隙中,进而实现地质封存^[26];从碳的资源化角度看,封存的 CO₂ 与地底岩石发生反应生成矿物质,在一定程度上为石油、煤层气企业强化驱替增采^[27]。

对 CO₂ 进行地质封存时还需考虑对环境的影响,主要因为封存后的 CO₂ 存在泄露风险。Benson^[28]发现 CO₂ 泄露风险较高的时段主要是在开始封存至封存结束的时间,因此应该对该时段进行重点监测,监测手段主要有测井法、环空压力监测等^[29]。对可能发生的风险也需要进行精准识别和控制,目前识别方法主要有特征-事件-过程、故障模式和影响分析、故障树分析^[30]等。根据分析结果可进一步提出易损性评估框架、筛选和排序框架、性能与风险^[31]等评价方法。未来应该把 CO₂ 封存技术与资源化技术相结合,并且对封存后的 CO₂ 进行实时监测,以及对可能发生的 CO₂ 泄露进行风险识别和控制,实现监测、评价与控制风险的一体化。在 CO₂ 地质封存技术的实际运用过程中还存在以下问题:①CO₂ 地质封存的可注入性;②长期安全性和封存潜力;③CO₂ 地质封存量计算方法;④如何进一步提高非常规油气藏、深层地热的开采率。以上问题也是未来有关 CCS 的关键基础性问题,这些问题涉及地质学、自然地理学、化学等多学科,体现了多学科交叉融合的特征。

2.2.3 抽水蓄能电站建设与储能一体化技术

我国能源结构不断向清洁化、低碳化发展,但受地理环境等因素影响,水风光等新能源均存在一定的弃用现象。以低碳排放量为导向,解决能源消纳问题的途径主要有常规水电大规模开发、推进抽水蓄能电站建设和水风光能源一体化 3 种。其中抽水蓄能电站被认为是当下最清洁的能源开发技术之一,其储能技术是解决新能源灵活性的重要手段^[32]。与常规水电站不同的是,抽水蓄能电站具有调峰、填谷、调相、事故备用和黑启动等多种功能,是目前最成熟、最可靠、最安全、最具大规模开发潜力的储能技术。

碳中和背景下,抽水蓄能电站的建设向统筹化、绿色化、一体化发展,其发展方向主要包括:①健全抽水蓄能电站开发体制和电价机制。以电力市场供需为基础进行科学定价,实现抽水蓄能电站在电量市场和辅助服务市场中具有自主选择自由,获取投资收益。②打造抽水蓄能清洁能源系统。利用抽水蓄能的调节能力应对风光能源的间歇性、波动性和随机性,保障电能质量,同时使抽水蓄能电站的设计及建造低碳化,并提高其自然碳汇能力。③研发远距离特高压输送技术。针对抽水蓄能电站的消纳问题,可进一步研发远距离特高压输送技术,将西部地区弃用水电通过该技术输送到东部用电量较大的地区,实现能源跨区域消纳的一体化、高效化。④加大抽水蓄能电站建设力度,可以有力支撑风光水火储一体化,构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统,服务碳达峰、碳中和目标。

2.3 水利行业面向碳中和的利用技术

2.3.1 水资源利用与保护技术

水资源利用方面的碳减排主要是基于规范化的管理制度并结合高效水资源利用技术来实现对水资源的低碳化利用。从管理层面看,王忠静等^[33]提出了水联网及智慧水利,技术路径是以物联网技术为基础,建立水资源高效利用的水联网,从而实现对水资源的高效管理;从技术层面看,水资源高效利用技术在国家战略的支撑下得到了广泛发展,如在石油生产、火力发电、煤炭燃烧等过程中利用生活污水、工业废水等,提高石油采收率和燃煤的燃烧效率,实现了含碳资源的高效利用^[34-36]。此外,贡力等^[37]对长距离输水工程进行了研究,提出未来应该把输水工程与水面光伏系统相结合,利用长距离输水工程明渠沿线安装架空式水面光伏,以提供清洁电能并实现替代减排,同时可抑制蒸发,产生节水效应。

碳中和背景下,应在治污、开源及节流等方面充分发挥水资源自身优势并结合高新技术不断开辟和优化水资源利用与保护技术,发展方向主要包括:①水环境治理过程的碳减排。通过污水管网改造修复、污水处理工艺优化、高能耗设备更替、智慧化管理等多种组合措施,提高城镇污水收集处理效能,同步减少温室气体的排放;通过开展水源地保护、降低农业面源污染等手段,减少进入水体的污染物含量和污水产生量,从源头提升水质,实现碳减排。②开源的水资源利用。开源就是增加非常规水资源的利用率,将工业废水、生活污水处理后进行二次利用^[38]。此外,未来将联动地表水、地下水等多方水源,引入大数据、云计算技术,实现多方水源的智能调配。③节流利用。节流就是从水资源的供给端、消费端等角度减少水资源的消耗,如在农业灌溉方面,通过确定作物不同阶段的需水量,并结合高效节水灌溉技术实现水资源的合理使用,因此未来需要对气候变化条件下不同作物的灌溉需水量的变化趋势展开研究。未来继续秉持“山水林田湖草沙共治,人与自然和谐共生”的理念^[39],深入推进水资源的综合保护工作,开展污水大规模处理关键技术攻关,采取治污、开源、节流、调配等综合措施。

2.3.2 生态系统固碳技术

实现碳中和目标并不是单一要求零碳排放,而是通过将减少碳源和增加碳汇两项措施有机协同起来,使大气中的 CO_2 整体上处于下降的趋势。生态系统中的碳循环主要是生产者(植物)通过光合作用实现碳捕集和碳零排,生态系统具有重要的碳汇功能,是碳循环过程中最活跃的碳库。《2030年前碳达峰行动方案》对生态系统碳汇能力巩固提升提出明确要求。高扬等^[40]对海洋生态固碳和陆地生态系统固碳进行了深入研究,认为海洋生态固碳会造成海水酸化,对海洋生态系统产生不可逆的损害^[41],而陆地生态系统固碳目前虽相对安全,但其固碳技术仍需开展实地观测和生态碳储量核算研究。从消费者角度来看,由于人类生产活动会产生大量的 CO_2 等温室气体,因此在社会经济活动中应遵循统筹兼顾、和谐发展的理念,开展生态友好型和资源节约型社会的建设;从分解者角度来看,微生物一方面可以提高碳循环的速度,另一方面微生物经过长时间沉积后会转化为化石能源,因此未来应对微生物功能展开深入研究。

生态系统固碳技术^[42]近年来得到了广泛发展,该技术主要利用光合作用和微生物电化学固碳原理。光合作用固碳原理是高效固碳微生物体吸收无机碳转化为有机物的过程;微生物电化学固碳原理则是通过模仿光合作用,利用微生物阳极氧化、阴极还原的技术构建出一种人造固碳系统,因此未来应考虑生态系统的碳循环和生物固碳技术协同发展;同时,开展生态系统固碳服务价值评估研究,精准评估生态固碳价值对促进我国生态固碳减排的意义。

2.3.3 水利工程低碳材料技术

材料的低碳化处理是实现减少工程生命周期碳排放的重要途径,而对于水利工程来说,混凝土是最常用的材料,为了2060年前实现碳中和的目标,发展基于低碳技术的混凝土材料势在必行。目前低碳材料主要有复合水泥、地聚合物以及再生骨料等,其中复合水泥可使碳排放量降低30%~50%。相比复合水泥,地聚合物具有更大的碳减排潜力,可使碳排放量降低44%~64%^[43-44]。针对中国建筑垃圾排量等特点,大量学者开展了关于再生骨料的研究,发现再生骨料在运输、回收阶段具有碳减排潜力^[45],结合 CO_2 碳化强化技术可使再生骨料品质进一步提升,这对于碳减排具有重要意义^[46]。

碳中和背景下,水利行业低碳材料技术的发展应多元化,发展方向主要包括:①提高材料的耐久性,延长使用寿命,从宏观上减少建筑材料的使用量,进而降低碳排放量;②针对固体废弃物利用率低等问题,开展关键技术攻关;③开展面向水利行业的低碳工程技术研究,通过微生物的矿化功能实现混凝土裂缝自愈,延长混凝土使用寿命。

2.3.4 发展富余水电制氢技术

氢能被认为是当下最具有发展潜力的新能源^[47]。新能源的消纳问题应以国家战略为方向指引,结合高效制氢技术,积极推动富余水电制氢,实现多种能源跨时空配置,构建氢能的“源端经济”^[48],将弃用的新能源转化为氢能,从而解决富余水、风、光等新能源的消纳问题。

对富余水电主要是通过电解水制氢技术进行转化储存^[49]。电解水制氢工艺的优点是全生命周期碳排放量低、氢气利用率高且能消纳多余的水电^[50]。有学者对电解水制氢中的电解质选择进行了研究^[51],发现固体氧化物电解槽能耗低,能量转化效率高,因此未来可重点关注并提前布局^[52]。

我国氢能需求量将在2030年达到3715 t,因此从氢能供给侧结构出发,将氢能供给结构从非低碳能源

逐步转型为以水电等新能源为主的低碳清洁氢^[53],这对于碳中和背景下氢能的供需平衡意义重大。利用富余水电制氢可以实现零碳排放,而且能够有效解决“弃水、弃风、弃光”问题,实现各类能源负载的移峰填谷,但该技术也面临一定的困难和挑战,如水、风、光并网对电解水制氢体系的影响、制氢电价是否合理、氢气利用的方式是否具有竞争性等问题,未来都应展开进一步研究。

3 结 语

本文结合中国水利行业的碳排放量现状,指出水利行业面向碳中和的共性支撑技术、一体化技术和利用技术是未来三大研究热点,并在此基础上,对当前水利行业低碳前沿技术进行了深入分析。

为应对气候变化,未来还应持续推进中小型水电站低碳化改造、零碳水电站建设、智慧水利建设、地下水库在海绵城市中的应用等研究和工作。

参考文献:

[1] 左其亭,邱曦,钟涛. “双碳”目标下我国水利发展新征程[J]. 中国水利,2021(22):29-33 (ZUO Qiting, QIU Xi, ZHONG Tao. The New Journey of Water Conservancy Development in China under the goal of “double carbon” [J]. China Water Resources,2021(22):29-33 (in Chinese))

[2] 陈述,纪勤,陈云,等. 基于知识图谱的智慧水利研究进展分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(3):143-153. (CHEN shu,JI Qin,CHEN Yun,et al. Research progress of smart water conservancy based on knowledge graph[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences):2023,51(3):143-153. (in Chinese))

[3] 宋松,曾庆宝,钟润菲. 基于 CiteSpace 的《水资源保护》创刊 35 年文献计量分析[J]. 水资源保护,2022,38(5):141-150. (SONG Song,ZENG Qingbao,ZHONG Runfei. Bibliometric analysis of water resources protection in past 35 years based on Cite Space[J]. Water Resources Protection,2022,38(5):141-150. (in Chinese))

[4] 陈明星,程嘉梵,周园,等. 碳中和的缘起、实现路径与关键科学问题:气候变化与可持续城市化[J]. 自然资源学报,2022,37(5):1233-1246. (CHEN Mingxing,CHENG Jiafan,ZHOU Yuan,et al. Origin, realization path and key scientific issues of carbon neutrality: Climate change and sustainable urbanization[J]. Journal of Natural Resource,2022,37(5):1233-1246. (in Chinese))

[5] 袁鸾,谢敏,周炎. 浅谈区域空气质量监测网络成效评估指标体系的建立[J]. 中国高新技术企业,2012(20):3-6. (YUAN Nuan,XIE Ming,ZHOU Ye. A brief discussion on the establishment of effectiveness evaluation index system of regional air quality monitoring network[J]. China High-Tech Enterprises,2012(20):3-6. (in Chinese))

[6] 贺媛媛. 基于 SD-IDMI 方法的区域低碳发展政策研究[D]. 天津:天津大学,2013.

[7] 沈菊琴,马玲利. 基于 STIRPAT 模型的水利工程建设对碳排放的影响研究[J]. 资源开发与市场,2019,35(1):26-31. (SHEN Juqin,MA Lingli. Research on impact of water conservancy projects construction of carbon emissions basedon STIRPAT model[J]. Resource Development & Market,2019,35(1):26-31. (in Chinese))

[8] 范臻,娄素华,吴耀武,等. 大规模风电接入下基于序数效用论的日前低碳调度决策模型[J]. 水电能源科学,2018,36(9):212-216. (FAN Zhen,LOU Suhua,WU Yaowul,et al. Dayahead low carbon scheduling decision model based on the theory of ordinal utility with significant wind power generation[J]. Water Resources and Power,2018,36(9):212-216. (in Chinese))

[9] 陈华盾,赵子豪,刘红波,等. 基于过程的建筑全生命周期碳排放核算问题及对策[C]//第二十二届全国现代结构工程学术研讨会论文集. 天津:天津市钢结构学会,2022:510-513.

[10] 彭琛,江亿,秦佑国. 低碳建筑和低碳城市[M]. 北京:中国环境出版社,2018.

[11] 黄跃群,刘耀儒,许文彬,等. 水利水电工程全生命周期碳排放研究:以犬木塘工程为例[J]. 清华大学学报(自然科学版),2022,62(8):1366-1373. (HUANG Yuequn,LIU Yaoru,XU Wenbin,et al. Life cycle carbon emissions of water reservoir and hydroelectric projects:a case study of the Quanmutang project[J]. Journal of Tsinghua University(Science and Technology),2022,62(8):1366-1373. (in Chinese))

[12] 杜莉丽,蒋平,余琦,等. 城市国民经济与社会发展规划碳排放评估综合指标体系构建与应用:以上海市为例[J]. 生态经济,2018,34(2):30-36. (DU Lili,JIANG Ping,YU Qi,et al. The establishment and application of comprehensive Indicator system for carbon emission evaluation from the perspective of urban national economy and social development plan:taking shanghai as an example[J]. Ecological Economy,2018,34(2):30-36. (Chinese))

[13] TAN S T,YANG J,YAN J Y,et al. A holistic low carbon city indicator framework for sustainable development [J]. Applied Energy,2017,185:1919-1930.

[14] 高朋钊,刘中文,王景平. 低碳建筑评价指标体系研究[J]. 价值工程,2013,32(12):66-67. (GAO Pengzhao,LIU

- Zhongwen, WANG Jingping. Research on low carbon building evaluation index system[J]. Value Engineering, 2013, 32(12): 66-67. (in Chinese))
- [15] 张丽娜. 碳排放权交易对可再生能源发展的影响[D]. 北京: 对外经济贸易大学, 2020.
- [16] 樊鸿清. 基于TDLAS的非合作目标二氧化碳检测系统设计[D]. 天津: 天津工业大学, 2020.
- [17] 郑玲娇. 基于红外吸收光谱的设施园艺二氧化碳检测系统的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2017.
- [18] 韩冬, 赵增海, 严秉忠, 等. 2021年中国常规水电发展现状与展望[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 1-5. (HAN Dong, ZHAO Zenghai, YAN Bingzhong, et al. Status and prospect of China's conventional hydropower development 2021[J]. Water Power, 2022, 48(6): 1-5. (in Chinese))
- [19] 李树山, 廖胜利, 李刚, 等. 大规模小水电群一体化发电计划编制方法[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(13): 29-35. (LI Shushan, LIAO Shengli, LI Gang, et al. Integrated power generation scheduling compilation method for large scale small hydropower station group[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(13): 29-35. (in Chinese))
- [20] YU Y, XIAO W, WANG Y, et al. Evaluation of the carbon emission reduction effects of ecological river revetment construction[J]. Journal of Water and Climate Change, 2021, 12(2): 362-370.
- [21] 李铁, 李正文, 杨俊友, 等. 计及调峰主动性的风光水火储多能系统互补协调优化调度[J]. 电网技术, 2020, 44(10): 3622-3630. (LI Tie, LI Zhengwen, YANG Junyou, et al. Coordination and optimal scheduling of multienergy complementary system considering peak regulation initiative. Power System Technology. 2020, 44(10): 3622-3630. (in Chinese))
- [22] 陈星宇, 刘忠, 寇攀高, 等. 离网型风-光-抽水蓄能恒压供电系统[J]. 储能科学与技术, 2021, 10(1): 355-361. (CHEN Xingyu, LIU Zhong, Kou Pangao, et al. The off-grid wind-PV-PHES hybrid system with continuous power at constant voltage[J]. Energy Storage Science and Technology, 2021, 10(1): 355-361 (in Chinese))
- [23] 谭乔凤, 聂状, 闻昕, 等. 大规模风光接入下梯级水电站调度方式研究[J]. 水力发电学报, 2022, 41(8): 44-55. (TAN Qiaofeng, NIE Zhuang, WEN Xin, et al. Operation mode of cascade hydropower stations considering large scale integration of wind and photovoltaic power[J]. Journal of Hydroelectric Engineering, 2022, 41(8): 44-55. (in Chinese))
- [24] 李光, 刘建军, 刘强, 等. 二氧化碳地质封存研究进展综述[J]. 湖南生态科学学报, 2016, 3(4): 41-48. (LI Guang, LIU Jianjun, LIU Qiang, et al. Review on geological storage of carbon dioxide[J]. Journal of Hunan Ecological Science(in Chinese))
- [25] 胡叶军, 王蔚, 任杰, 等. 深部咸水层CO₂地质封存对地层压力环境的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2016, 44(6): 512-518. (HU Yejun, WANG Wei, REN Jie, et al. Effect of CO₂ geological sequestration in deep saline aquifer on formation pressure environment[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2016, 44(6): 512-518. (in Chinese))
- [26] 庞忠和, 杨峰田, 段忠丰. 二氧化碳地质封存技术发展现状与展望[C]//第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 敦煌: 中国岩石力学与工程学会废物地下处置专业委员会, 2008: 480-493.
- [27] 张鸿翔, 李小春, 魏宁. 二氧化碳捕获与封存的主要技术环节与问题分析[J]. 地球科学进展, 2010, 25(3): 335-340. (ZHANG Hongxiang, LI Xiaochun, WEI Ning. The major technology track and analysis about carbon dioxide capture-and storage[J]. Advances in Earth Science, 2010, 25(3): 335-340. (in Chinese))
- [28] BENSON S A. Geological storage of CO₂: analogues and risk management[R]. Melbourne: Carbon Sequestration Leadership Forum, 2007.
- [29] MOHAMMED D. A review of developments in carbon dioxide storage[J]. Applied Energy, 2017, 208: 1389-1419.
- [30] 王容, 杨宇尧, 段希宇, 等. CO₂封存地下监测评价技术[J]. 油气藏评价与开发, 2011(4): 44-46. (WANG Rong, YANG Yuyao, DUAN Xiyu, et al. Subsurface monitoring and evaluation technique for CO₂ storage[J]. Petr-oleum Reservoir Evaluation and Development, 2011(4): 44-46. (in Chinese))
- [31] OIDENBURG C M. Screening and ranking framework for geologic CO₂ storage site selection on the basis of health, safety. and environmental risk[J]. Environmental Geology, 2008, 54(8): 1687-1694.
- [32] 茅昌平, 杨张阳, 李广凯, 等. 抽水蓄能电站库区水化学特征、影响因素及其示踪作用[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2023, 51(1): 34-42. (MAO Changping, YANG Zhangyang, LI Guangkai, et al. Major in chemistry of pumped storage power station reservoir: controlling mechanisms and tracing implications for reservoir water leakage[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2023, 51(1): 34-42. (in Chinese))
- [33] 王忠静, 王光谦, 王建华, 等. 基于水联网及智慧水利提高水资源效能[J]. 水利水电技术, 2013, 44(1): 1-6. (WANG Zhongjing, WANG Guangqian, WANG Jianhua, et al. Developing the internet of water to prompt water utilization efficiency[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2013, 44(1): 1-6. (in Chinese))
- [34] 王睿坤. 污泥与煤/石油焦协同制备浆体燃料的基础研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
- [35] 赵振新, 朱书全, 马名杰, 等. 中国褐煤的综合优化利用[J]. 洁净煤技术, 2008, 14(1): 28-31. (ZHAO Zhenxin, ZHU Shuquan, MA Mingjie, et al. Comprehensive and optimal utilization of lignite in China[J]. Clean Coal Technology, 2008, 14(1): 28-31. (in Chinese))

[36] 张茹,楼晨笛,张泽天,等. 碳中和背景下的水资源利用与保护[J]. 工程科学与技术,2022,54(1):69-82. (ZHANG Ru, LOU Chendi,ZHANG Zetian,et al. Utilization and protection of water resources under the background of carbon neutralization [J]. Advanced Engineering Sciences,2022,54(1):69-82. (in Chinese))

[37] 贡力,贾治元,李义强,等. 流冰对输水明渠混凝土衬砌的撞击影响[J]. 农业工程学报,2021,37(21):163-172. (GONG Li,JIA Zhiyuan,LI Yiqiang,et al. Impact of drift ice on concrete lining of open water conveyance channel[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering 2021,37(21):163-172. (in Chinese))

[38] 卢耀如,刘琦,张鑫馨. 贯彻科学生态文明理念以综合开发水资源防灾兴利[J]. 河海大学学报(自然科学版),2015,43(5):384-394. (LU Yaoru,LIU Qi,ZHANG Xinxin. Implementation of concept of scientific ecological culture for comprehensive development of water resources and disaster prevention[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2015,43(5):384-394. (in Chinese))

[39] 谢三桃,朱慧雯,唐晓先,等. 巢湖流域山水林田湖草生态保护和修复[J]. 水资源保护,2023,39(2):252-258. (XIE Santao,ZHU Huiluan,TANG Xiaoxian,et al. Ecological protection and restoration of mountain river forest farmland lake-grassland system in Chaohu Lake Basin[J]. Water Resources Protection,2023,39(2):252-258. (in Chinese))

[40] 高扬,何念鹏,汪亚峰. 生态系统固碳特征及其研究进展[J]. 自然资源学报,2013,28(7):1264-1274. (GAO Yang, He Nianpeng, WANG Yafeng. Characteristics of carbon sequestration by ecosystem and progress in its research[J]. Journal of Natural Resources,2013,28(7):1264-1274. (in Chinese))

[41] 焦念志. 研发海洋“负排放”技术支撑国家“碳中和”需求[J]. 中国科学院院刊,2021,36(2):179-187. (JIAO Nianzhi. Developing ocean negative carbon emission technology to support national carbon neutralization[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences,2021,36(2):179-187. (in Chinese))

[42] 胡小夫,王凯亮,沈建永,等. 基于生物固碳技术的 CO₂ 资源化利用研究进展[J]. 华电技术,2021,43(6):79-85. (HU Xiaofu, WANG Kailiang, SHEN Jianyong, et al. Research progress of CO₂ resource utilization based on biological carbon sequestration technology[J]. Huadian Technology,2021,43(6):79-85. (in Chinese))

[43] LIPPIATT N, LING T C, PAN S Y. Towards carbon-neutral construction materials: Carbonation of cement based materials and the future perspective[J]. Journal of Building Engineering,2020,28:101062.

[44] MCLELLAN B C, WILLIAMS R P, LAY J, et al. Costs and carbon emissions for geopolymer pastes in comparison to ordinary port land cement[J]. Journal of Cleaner Production,2011,19(9/10):1080-1090.

[45] 肖建庄,邓琪,夏冰. 混凝土制备低碳化演进与展望[J]. 建筑科学与工程学报,2022,39(5):1-12. (XIAO Jianzhuang, DENG Qi, XIA Bing. Evolution and prospects of low-carbon concrete[J]. Journal of Architecture and Civil Engineering,2022,39(5):1-12. (in Chinese))

[46] 赵增丰,姚磊,肖建庄,等. 再生骨料 CO₂ 碳化强化技术研究进展[J]. 硅酸盐学报,2022,50(8):2296-2304. (ZHAO Zengfeng, YAO Lei, XIAO Jianzhuang, et al. Development on accelerated carbonation technology to enhance recycled Aggregates [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society,2022,50(8):2296-2304. (in Chinese))

[47] 雷超,李韬. 碳中和背景下氢能利用关键技术及发展现状[J]. 发电技术,2021,42(2):207-217. (LEI Chao, LI Tao. Key technologies and development status of hydrogen energy utilization under the background of carbon neutrality [J]. Power Generation Technology,2021,42(2):207-217. (in Chinese))

[48] 何仲辉,李林,马芳平,等. 推动富余水电制氢促进绿色低碳发展[J]. 中国能源,2019,41(7):5-10. (HE Zhonghui, LI Lin, MA Fangping, et al. Push electrolysis hydrogen production by surplus hydropower to facilitate green and low carbon developmen [J]. Energy of China,2019,41(7):5-10. (in Chinese))

[49] 郝伟峰,贾丹瑶,李红军. 基于可再生能源水电解制氢技术发展概述[J]. 价值工程,2018,37(29):236-237. (HAO Weifeng, JIA Danyao, LI Hongjun. Overview of hydrogen production technology based on renewable energy from water electrolysis [J]. Value Engineering,2018,37(29):236-237. (in Chinese))

[50] 徐秋玲. 富余水电制氢或成解决弃水新途径[N]. 中国电力报,2016-06-18(02).

[51] HAUCH A, KÜNGAS R, BLENNOW P, et al. Recent advances in solid oxide cell technology for electrolys[J]. Science,2020,370(6513):6118.

[52] 李建林,李光辉,马速良,等. 碳中和目标下制氢关键技术进展及发展前景综述[J]. 热力发电,2021,50(6):1-8. (LI Jianlin, LI Guanghui, MA Suliang, et al. Overview of the progress and development prospects of key technologies for hydrogen production under the goal of carbon neutrality[J]. Thermal Power Generation,2021,50(6):1-8. (in Chinese))

[53] 刘玮,万燕鸣,熊亚林,等. “双碳”目标下我国低碳清洁氢能进展与展望[J]. 储能科学与技术,2022,11(2):635-642. (LIU Wei, WAN Yanmin, XIONG Yaling, et al. Outlook of low carbon and clean hydrogen in China under the goal of “carbon peak and neutrality” [J]. Energy Storage Science and Technology,2022,11(2):635-642. (in Chinese))