

“双碳”目标下的节水与能源协同发展

胡庆芳^{1,2}, 陈 剑³, 王慧杰⁴, 苏 鑫¹, 张根瑞¹, 刘 连¹

(1. 南京水利科学研究院水灾害防御全国重点实验室, 210029, 南京; 2. 长江保护与绿色发展研究院, 210098, 南京;
3. 浙江省温州市水利水电勘测设计院, 223800, 温州; 4. 水利部水利水电规划设计总院, 100120, 北京)

摘 要: 水与能源具有复杂的耦合关系。为实现碳达峰碳中和“双碳”目标, 有效应对全球气候变化挑战, 迫切需要研究能源与节水协同发展的对策与措施, 探索实现水资源和能源协同安全保障的技术路径。分析了水与能源的耦合关系以及能源生产和消费的发展趋势, 提出了节水与能源协同发展对策: 一方面需要在能源生产和消费革命过程中落实量水而行, 有效降低对水的依赖和负面影响, 并结合新能源发展开拓节水新途径; 另一方面应将能源节约和高效利用贯穿于水资源开发利用全过程, 在宏观层面控制用水规模, 优化供水水源结构和水网布局, 并在微观层面上实现水资源供用耗排各环节的能源集约利用。

关键词: “双碳”目标; 能源生产消费; 节水; 协同发展

Coordinated development of energy with water conservation under the carbon peaking and carbon neutrality goals//Hu Qingfang, Chen Jian, Wang Huijie, Su Xin, Zhang Genrui, Liu Lian

Abstract: Water and energy have a complex coupling relationship. To achieve the carbon peaking and carbon neutrality goals, and to effectively respond to the challenges of global climate change, it is urgent to research measures and strategies for the coordinated development of energy and water conservation, and explore technical paths to ensure the security of both water resources and energy. The coupling relationship between water and energy and the development trends of energy production and consumption are analyzed. Strategies for the coordinated development of water conservation and energy are proposed: on the one hand, it is necessary to implement water-based measures in the evolution of energy production and consumption to effectively reduce dependency on water and mitigate negative impacts, while exploring new water conservation avenues through the development of new energy sources; on the other hand, energy conservation and efficient utilization should be integrated into the entire process of water resources development and utilization. At the macro level, we should control the scale of water use, optimize the structure of water supply sources, and improve the layout of the water network. At the micro level, intensive energy utilization should be achieved in all aspects of water supply, consumption, and discharge.

Keywords: carbon peaking and carbon neutrality goals; energy production and consumption; water conservation; coordinated development

中图分类号: TV213+TK 文献标识码: B 文章编号: 1000-1123(2024)15-0039-06

水是人类赖以生存和发展的基础性、战略性资源, 攸关国计民生。享有基本的清洁饮水, 是联合国确定的基本人权之一, 也是可持续发展目标的基本考量因素。但时至今日, 全球仍面临十分严重的水危机。根据联合

国发布的《2023年可持续发展目标报告: 特别版》, 2022年全球有22亿人口缺乏安全管理的饮用水服务, 35亿人口缺乏安全管理的环境卫生服务, 20亿人口缺乏基本个人卫生服务, 44%的生活污水没有得到安全处理。

收稿日期: 2024-07-12

作者简介: 胡庆芳, 正高级工程师, 主要从事流域水文模拟预报、水资源规划调度等方面研究工作。

基金项目: 国家自然科学基金(52279019); 中国工程院咨询研究项目(2022-PP-04)。

随着人口增长与城镇化推进,预计全球水资源需求仍将持续增长,加之气候变化、环境污染、地区争端和冲突等因素影响,水资源风险防控备受关注。我国降水和水资源时空分布高度不均,在时程上年内集中性强、年际变化剧烈,在空间上东多西少、南丰北缺,水资源是我国国土空间高水平保护和高品质开发利用的关键性制约因素。“节水优先”是习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”治水思路的首要内容,随着节水型社会建设全方位推进和持续深化,我国用水总量和消耗强度得到有效控制,用水效率大幅提升,显著控减了水资源承载压力。

我国是水资源消耗大国,也是能源消费大国。我国能源消耗规模大、强度高,单位国内生产总值能耗远高于美国、欧洲、日本等发达国家和地区。随着工业化和城镇化的深入推进,我国能源消费仍将维持高位运行甚至有一定刚性增长。加快构建清洁低碳、安全高效的现代能源体系,是保障能源自主供给、推动污染源治理、促进产业升级发展的必然要求。同时,能源领域还是实现碳达峰碳中和的主战场。大力推进节能和储能,提高清洁能源比例和能源利用效率,是减少温室气体排放、减缓气候变化不利影响、深度参与全球气候治理的紧迫需求。

水与能源紧密相连、高度依存,两者具有复杂的耦合关系,这一情况已获得广泛重视。水和能源协同安全是我国高质量发展和国家安全保障中面临的重大命题。在全球新一轮科技革命和产业变革方兴未艾,生产生活方式加快转向低碳化、智能化的背景下,迫切需要基于水与能源互动耦合关系,研究能源与节水协同发展的对策与措施,探索实现水资源和能源协同安全保障的技术路径。

一、水与能源耦合关系

水在能源生产过程中扮演着至关重要的角色。煤炭、石油和天然气等化石能源在开采、清洗、冷却和废水处理等环节均需要用水。石油和天然气开采过程中会产生大量“采出水”,其处理通常非常困难且代价昂贵。页岩气、油砂等非常规油气资源的开发通常较常规油气生产用水量更大,且对环境不利影响更大。煤炭作为亚太地区最普遍的能源产品,在中短期内将继续作为中国、印度等国家能源的主体来源。煤炭开采、加工和燃煤发电过程均需要消耗水资源且排放废水,还会造成水土流失、生物栖息地破坏等问题,因

此人们对煤电行业所需水量及造成的生态环境影响存在严重担忧。在一些干旱地区,水资源是制约煤电发展的重要因素。太阳能等新能源开发过程中,水资源同样不可或缺。太阳能电池板的制造和清洗过程均需要大量水分,且对水质要求甚高。生物质能源是生产过程最耗水的燃料之一,玉米和甘蔗等能源作物和乙醇、生物质燃料颗粒的生产均依赖水分。水为绝大多数热电厂提供冷却功能,且是水电和蒸汽轮机的驱动力。国际能源署估计,2010年全球能源生产用水量为5830亿 m^3 (约占世界总用水量的15%),其中耗水量约660亿 m^3 。到2035年,全球能源生产用水量可能会增加20%,消耗量可能会增加85%。水可能会成为许多新兴经济体,特别是亚洲地区电力部门扩张的重要限制因素。水与能源耦合关系见图1。

水资源的获取、处理和输送等过程也与能源密不可分。地下水或地表水水源取水通常需要电力驱动水泵等机械设备,且地下水开采中,随着水位下降,取水所需能量也会随之增加。在农业灌溉中,将水从水源输送到农田需要消耗大量能源,特别是在非自流灌区和使用喷灌、滴灌等高效节水灌溉方式时,能源消耗更为显著。城市供水系统通常包括泵站、管网等设施,这些设施运行和维护均需要电力支持。水与能源的耦合关系在水处理环节体现尤为明显,混凝、沉淀、过滤、消毒等环节都需要消耗能源;去除水中的有害物质和微生物时,需使用电动设备和化学药剂。海水淡化也是一个高耗能过程,生产每方淡水需要消耗2~4 $\text{kW}\cdot\text{h}$ 的能量,其中反渗透法是能耗较高的一种海水淡化方式。污水收集通常涉及较长距离和高位差,因此需要消耗大量电力和燃料;污水的物理、化学和生物处理方法也均需要消耗电力。污泥

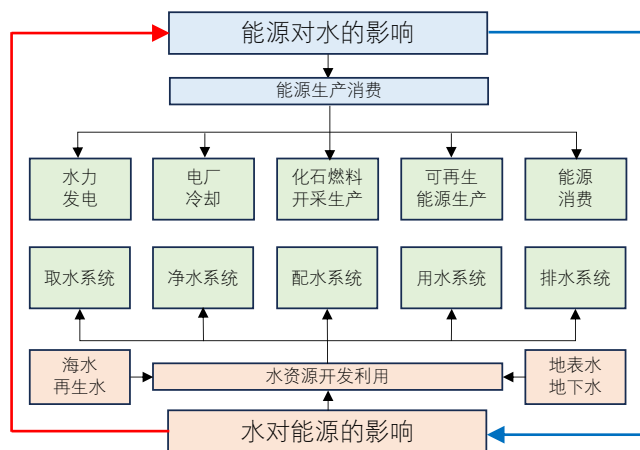


图1 水与能源耦合关系示意

处理过程中的脱水、厌氧消化和焚烧等环节也需要消耗电力;污泥焚烧需消耗燃料,还会产生温室气体排放。

综上,水与能源密不可分。在能源生产过程中,水资源是不可或缺的要素;而在水资源的获取、供应、输送和处理过程中,也需要消耗能源。需通过技术创新和管理优化实现水资源开发利用和能源产业的协调发展。

二、能源生产和消费发展趋势

21世纪以来,我国经济规模总体呈扩张性增长,工业化和城镇化进程快速推进。国内生产总值由2000年的8.94万亿元增长至2022年的121.02万亿元,城镇化率相应由36.2%提高至65.2%(见图2)。受此驱动,我国能源生产和消费规模也快速增加,已连续多年成为全球最大的能源消费国和最大的煤炭、可再生能源(如水电、风电、太阳能等)消费国。在能源生产方面,2000—2022年全国一次能源生产年均增长率约5.67%。2022年全国一次能源生产量为46.6亿t标准煤当量,其中煤炭、原油、天然气产量分别为45.6亿t、2.05亿t和2201亿m³;发电装机容量为25.68亿kW,年发电量为8.8万亿kW·h,总体规模位居世界首位。在能源消费方面,2000—2022年我国一次能源消费年均增长率达6.1%。2022年一次能源消费总量为54.1亿t标准煤当量。在全球能源生产和消费革命加速推进的背景下,我国能源结构优化取得突破。2022年全国常规水电、风电、太阳能发电、核电装机容量分别达到4.140 6亿kW、3.656 4亿kW、3.926 8亿kW和0.555 3亿kW。非化石能源装机占比由2015年的34%提升至2022年的48%,非化石能源发电占比由2015年的27%提升至2022年的33.5%。非化石能源消费占比由2015年的12%提升至2022年的

17.5%,与此同时煤炭消费占比由2015年的64%下降至2022年的56%。

根据牛津大学全球变化数据实验室统计,2022年我国单位国内生产总值能耗为3.4 t标准煤当量/万美元,单位国内生产总值二氧化碳排放量为6.6 t/万美元,均远高于世界平均水平及西方主要发达国家。同时,2010—2022年,我国人均累计二氧化碳排放量约为133 t,高于世界平均水平67 t、法国123 t,低于澳大利亚352 t、加拿大337 t、欧盟195 t、美国386 t和英国162 t(见图3)。因此,尽管我国已进入实现“双碳”目标的关键期,但在工业化和城镇化进程持续、经济总量维持中等增速的条件下,未来10~15年能源消费总量仍将稳中有升。由于新能源安全替代能力尚未完全形成,极端天气对能源稳定供应的影响日益显现且国际能源供需形势复杂,我国能源安全面临多重压力。

中国石油天然气集团有限公司等机构的研究团队设置了“稳健型”“积极型”“激进型”三种实现碳中和的情景(见表1),采用“世界与中国能源展望模型”,预测了2060年前关键时间节点的能源需求与碳排放。结果发现,我国一次能源消费量将在2030年前后达峰,2030—2035年期间缓慢下降,其后基本保持稳定。能源消费结构中,煤炭占比将持续下降,石油占比基本保持稳定,天然气、非化石能源占比快速增长。在“积极型”情景下,我国一次能源消费量的峰值约为60.1亿t标准煤当量,煤炭、石油和天然气消费达峰时间分别为2025年前、2030年前和2040年前。预计到2035年,煤炭、石油、天然气和非化石能源消费占比分别为37.8%、15.8%、14.0%和32.4%。故2035

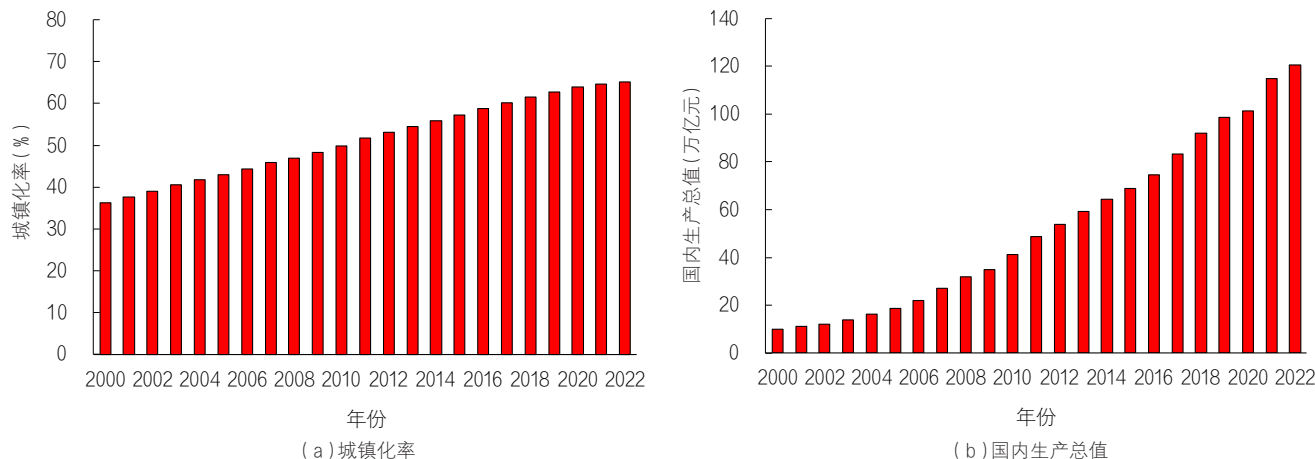


图2 2000—2022年我国城镇化率与国内生产总值增长趋势

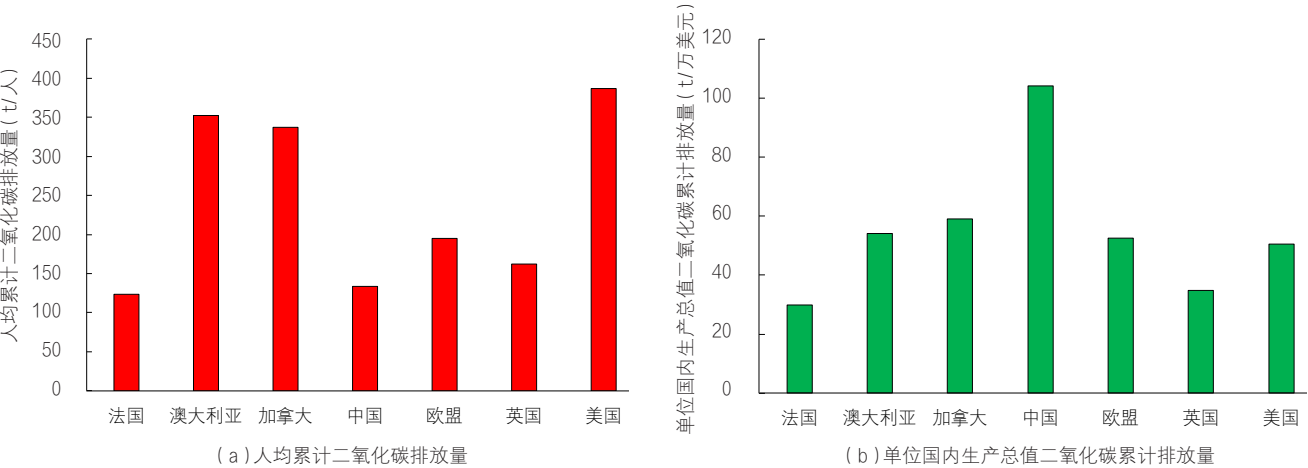


图3 主要国家或区域2010—2022年人均累计碳排放量和单位国内生产总值二氧化碳排放累计量对比

年以前煤炭占一次能源消费比重将持续下降,但仍将发挥能源安全“兜底保障”作用。到2040年前后非化石能源占能源消费的比例将超过50%,成为我国未来能源供应的主体,2060年非化石能源消费占比将进一步达到85%左右。

三、节水与能源协同发展对策

推动能源生产和消费革命,构建能源节约型社会,是国家安全战略和高质量发展至关重要的组成部分,而落实节水优先,构建节水型社会,对于保障国家安全、实现高质量发展至关重要。现代社会水资源开发利用网络和能源生产消费网络日益复杂,高质量发展必须正确处理能源和水的相互依存关系,促进水资源高效利用与能源集约利用的良性协同。

1. 能源发展中的节水对策

长期以来,能源一直被视为受益于战略投资的重要行业,而水常被视作自然的馈赠,是一种“廉价”的公共产品,除水电外,水资源的高效集约利用在能源行业实际上未得到充分重视。能源革命是技术革命和产业革命,同时也是国土空间利用保护方式的深刻变革,在构建我国现代能源体系的过程中,必须不断减轻能源开发利用对水资源系统的不利影响,促进能源发展对水资源的解耦。

(1) 推进化石能源集约利用中的深度节水控水

我国新能源装机虽发展迅猛,但受气候因素影响较大。煤炭是对水资源和生态环境影响最大的能源类型,但在大规模储能技术尚未有效突破的前提下,煤炭在我国能源结构中的主体地位短期内不可替代。我国煤炭资源主要分布在西北地区,该区域是水资源极度

表1 三种实现碳中和的情景

情景类型	情景描述
稳健型	立足可持续、高质量发展,保障能源安全。化石能源清洁化利用技术持续进步,天然气的地位与作用凸显,能效水平显著提升,可再生能源替代化石能源进程稳步推进,碳捕获、利用与封存技术实现大规模商业化应用
积极型	争取尽快实现碳达峰,达峰后CO ₂ 排放量快速下降。化石能源加速向应急储备能源转变,加速从燃料向原料转变,化石能源发电加速向灵活性调峰电源转变;可再生能源技术实现跨越式进步,成本大幅下降
激进型	立足可再生能源技术取得颠覆性突破,能源系统安全性问题得到根本解决。化石能源回归原料属性,主要用于调峰和应急储备

短缺、生态环境脆弱的地区,西北煤电能源基地发展必须深入落实节水优先方针,推进深度节水控水。一是坚持以水定产、量水而行,将水资源承载力作为煤电能源发展的刚性约束,促进水-能源-粮食系统协同保障。二是要开展煤电全生命周期水足迹评估,加快煤炭开采、洗选和燃煤发电的技术升级,进一步提升水资源利用效率,减少废污水排放。推进煤炭精准开采和保水开采,减轻煤炭开采对矿区水文环境的扰动,提升矿井水回用率,防治矿区水土流失;同时应大力推动煤炭洗选技术和洗煤废水处理技术创新。2022年我国直流火(核)电冷却用水量为490亿m³,应大力发展燃煤电厂低水耗技术,积极推进热电厂冷却水源替代,提高空冷机组占比。除煤炭外,还应加强页岩油、页岩气、煤层气等非常规化石能源开采利用中的水资源节约与保护。

(2) 强化新能源发展中的节水和开源并重

一是要加强新能源原料、装备生产以及运行等全周期水足迹评估和核算,优化生产工艺和技术,减少对

水的消耗和污染。虽然太阳能是一种清洁能源,但在原料生产、设备制造和运行维护过程中均与水的使用密切结合,且对水质要求十分严格。光伏电池生产的每一道工序都离不开超纯水的使用。结晶和成形一个 1 m^2 的硅片需要65 L纯水,生成一个规格为 $156\text{ mm}\times 156\text{ mm}$ 的光伏电池需要27 L水,一个含有60个电池的部件组装需要34 L水。而在光伏电站运行过程中,为减少灰尘遮蔽影响,太阳能板也需要定期清洗。新能源储能材料生产也与水密不可分。以广泛应用的锂电池为例,其开采、提纯以及制成阳极、阴极和相关材料的过程中,都会消耗大量清水和纯水并产生具有毒性的废水。

二是要因地制宜推进新能源和节水基础设施的联合布局与管理,提高水能协同效益。利用大型太阳能发电场的光伏面板收集雨水,具有集水面积大、效率高的优点,是雨水收集利用的理想介质材料和场所。

三是结合太阳能开展生态修复或发展立体农业,实现光伏发电、生态、农业和节水的多赢。在光伏发电场下方种植耐旱植被或农作物,不仅可以提高土地利用效率,且因光伏发电板具有降低蒸散发量的作用,可有效减少灌溉用水实现节水。有研究表明,在光伏面板减少太阳辐射30%~50%的条件下,其下方的植被实际蒸散发量会减少10%~30%,因此光伏阵列的大面积布设能在一定程度上起到节水效果。目前结合光伏发电的生态恢复或农业发展模式,在北方干旱半干旱地区已有一定规模。同时,近年“渔光互补”绿色生态模式备受关注,这是一种渔业养殖与太阳能光伏发电相结合的产业模式。在沿海地区,可推进新能源发电与海水淡化厂联合布局。利用风能或太阳能驱动海水淡化设备,为当地居民提供生活用水,减少常规淡水资源利用。此外,通过特殊设备和技术,风力发电装置可捕捉空气中的水分,并通过冷凝等方式将其转化为淡水。这种方法虽然成本较高,但在极端缺水地区具有重要应用价值。

2. 水资源利用中的节能对策

在“双碳”目标背景下,应将能源节约和高效利用贯穿于水资源开发利用全过程。在宏观层面,落实“四水四定”,从源头上控制用水增长,特别是控制河道外经济社会用水规模和消耗强度,优化供水水源结构和供用水网络布局,不仅有利于协调能源生产与其他产业用水需求,还可以减少取水、制水、供水、水处理和排放等环节的能源消耗需求和温室气体排放,对于保障能源安全、实现“双碳”目标具有重要积极作用。在

微观层面,针对水资源供用耗排的各环节探索能源高效集约利用措施。

(1) 构建能源节约型水网

我国已建成大量大规模、长距离引调水工程,这些工程的运行均需要可靠的电力保障。以南水北调东线一期工程为例,该工程全长1467 km,共设立13个梯级泵站、22处枢纽、34座泵站,总扬程65 m,是世界上大型泵站数量最集中的泵站群。据《2022年中国水资源公报》,我国地表水水源供水量中,引水工程供水量占31.8%,提水工程供水量占32.8%,水资源一级区间调水量占4.4%。随着国家水网建设的推进,四级水网和水网末梢将形成规模更宏大、结构更复杂的水流调配网络。因此,需要关注复杂水网的能源集约利用问题,提升多级多层水网运行效益。一是充分利用水网水力条件,合理配置水力发电设施,提高水网运行的能源自我保障程度。二是提升水网水流精准调配能力,将能效作为大型水库、泵站、闸门等控制性工程智慧化调度管理的重要目标。三是提高城乡供排水系统厂网设施运行能效,包括更好解决城市高层建筑密集下二次供水设施的能源集约利用问题。

(2) 推进水-能源-粮食协同保障

农业灌溉是用水大户,其能源消耗和温室气体排放规模十分可观。因此,不仅需要关注不同灌溉模式下的水分、养分生产效率差异,而且应关注不同灌溉模式下能源消耗和碳排放强度的差异。据Qin等人的研究,采用高效、低碳灌溉方法有可能将能源消耗减半,将二氧化碳排放量减少约90%。各类灌区规划设计应优化渠系布局和提水配水方式,尽可能采取自流灌溉,同时减少渠系输配水损失。对于提水灌溉和高效节水灌溉,应加强水源泵站、各级闸门等控制设施的智慧化运维管理。水-能源-粮食系统协同保障将是基本发展趋势。

(3) 促进非常规水源利用与新能源一体化发展

再生水利用、海水淡化有助于解决水资源短缺问题。随着城镇污水再生利用的持续推进,我国再生水生产、输配能力均不断提高,全国116个城市开展了再生水利用相关试点。《水利部 国家发展改革委关于加强非常规水源配置利用的指导意见》明确提出,到2025年,全国非常规水源利用量超过170亿 m^3 ;而目前根据水利部发布的2024年水利系统节约用水工作要点,我国2024非常规用水量预计将超过180亿 m^3 。而据《海水淡化利用发展行动计划(2024—2028年)》,2025年全国海水淡化总规模将达到290万 t/d 以

上。随着非常规水源利用规模进一步扩大,其能源消耗已不容忽视,故需更加注重水处理过程中的节能减排。在一定意义上,污水是未开发的资源,其温度在冬季高于平均气温、在夏季低于平均气温,这种温度差可通过水源热泵技术转换为清洁能源。欧洲有的污水处理厂通过提取废水能源等途径已实现能源自给。上海白龙港污水处理厂是亚洲最大的污水处理厂,设计处理规模达280万m³/d,该厂利用污水厂光伏发电的电能电解再生水制氢,同时利用污泥厌氧消化产生的沼气制氢,后续衔接安全储氢技术装备、氢燃料电池及高效用氢场景,实现了污水厂“绿氢制备-固态储氢-热电联供”的全链条应用与循环经济示范。

(4) 通过地下水资源保护减少能源消耗

地下水资源的合理利用和保护也是强化水资源与能源协同保障的重要途径。抽取地下水所需能源随着地下水埋藏深度增加而增加,因此禁止地下水超采也可以带来长期能源节约。利用含水层补给管理来创建或增加本地水源供应可以节省大量能源并减少碳排放。联合国世界水发展报告2014针对旧金山湾区部分地区的研究表明,创建本地水源每年可节省供水系统运行能源消耗约6.37亿kW·h。

四、结 语

水与能源高度依存,能源产业发展与水资源节约之间存在着密切的耦合关系。构建绿色低碳的现代能源体系和集约高效的水资源利用体系,是我国国家安全和资源节约型社会至关重要的组成部分。为有效应对全球气候变化挑战,促进高质量发展,必须正确处理好能源和水的相互依存关系,促进水资源开发利用与能源产业发展的良性协同。因此,在推动能源生产和消费革命、加快新能源产业发展的过程中,需要更加注重水资源保护和节约利用。而落实节水优先和“四水四定”,也要将能源节约和高效利用贯穿于水资源开发利用的全过程,针对水资源供、用、耗、排的各个过程和环节,实现能源集约利用。

参考文献:

[1] 胡庆芳,陈秀敏,高娟,等.水平衡与国土空间协调发展战略研究[J].中国工程科学,2022,24(5):63-74.

- [2] 黄维和,韩景宽,王玉生,等.我国能源安全战略与对策探讨[J].中国工程科学,2021,23(1):112-117.
- [3] 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[J].科学通报,2020,65(16):1569-1581.
- [4] Global Change Data Lab.Our World In Data [EB/OL].[2024-06-28].<https://ourworldindata.org/co2-emissions>.
- [5] 匡立春,邹才能,黄维和,等.碳达峰碳中和愿景下中国能源需求预测与转型发展趋势[J].石油科技论坛,2022,41(1):9-17.
- [6] 中华人民共和国水利部.2022年中国水资源公报[EB/OL].[2024-06-29].<http://www.mwr.gov.cn/zzsc/tjgb/szygb/2022/files/basic-html/page1.html>.
- [7] MARROU H, DUFOUR L, WERY J.How does a shelter of solar panels influence water flows in a soil-crop system[J].European Journal of Agronomy, 2013(50):38-51.
- [8] QIN J X, DUAN W L, ZOU S, et al.Global energy use and carbon emissions from irrigated agriculture[J].Nature Communications, 2024, 15(1):3084.
- [9] 国家统计局.中国统计年鉴2001[M].北京:中国统计出版社,2001.
- [10] 国家统计局.中国统计年鉴2023[M].北京:中国统计出版社,2023.
- [11] 联合国可持续发展部.2023年可持续发展目标报告:特别版[EB/OL].[2023-09-14].https://unstats.un.org/sdgs/report/2023/The-Sustainable-Development-Goals-Report-2023_Chinese.pdf.
- [12] 吴川东,苏泽兵,刘鹤,等.干旱、半干旱区光伏发电设施的生态-水文效应研究评述[J].高原气象,2021,40(3):690-701.
- [13] AHMAD S, JIA H F, CHEN Z X, et al.Water-energy nexus and energy efficiency: A systematic analysis of urban water systems[J].Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2020, 134.
- [14] 云兆得,杨元月,胡庆芳,等.高质量推进幸福河湖建设的认识与建议[J].中国水利,2024(8):55-62.

责任编辑 李卢祎