



安徽省关闭/废弃矿井地下空间储能潜力及减碳效益

杨科 魏家乐 付强 吕鑫

引用本文：

杨科, 魏家乐, 付强, 等. 安徽省关闭/废弃矿井地下空间储能潜力及减碳效益[J]. 煤炭科学技术, 2025, 53(4): 45–55.
YANG Ke, WEI Jiale, FU Qiang. Potential of underground space energy storage and carbon reduction benefits of closed/abandoned mines in Anhui Province[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 45–55.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12438/est.2025-0171>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

废弃矿井蓄洪储能与取热综合利用模式研究

Energy storage via storing flood in abandoned mines and low temperature heat energy utilization from mine water
煤炭科学技术. 2023, 51(6): 197–204 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-0323>

关闭矿山地下空间资源定量评估与再利用途径

Quantitative evaluation and reuse path of underground space resources in closed mines
煤炭科学技术. 2022, 50(5) <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/f13141f9-c696-4ae6-9001-904dcab58af7>

三河尖关闭煤矿煤层CO₂封存潜力研究

CO₂ storage potential of coal seam in Sanhejian closed coal mine
煤炭科学技术. 2024, 52(3): 258–268 <https://doi.org/10.12438/est.2023-0877>

废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势

Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines
煤炭科学技术. 2023, 51(10): 163–176 <https://doi.org/10.12438/cst.2023-0131>

深部煤炭地下气化制氢碳排放核算及碳减排潜力分析

Carbon emission accounting and carbon reduction analysis for deep coal underground gasification to hydrogen
煤炭科学技术. 2023, 51(1): 531–541 <https://doi.org/10.13199/j.cnki.est.2022-1638>

碳中和背景下废弃矿山环境正效应资源化开发利用

Resource development and utilization of positive environmental impacts of abandoned mines under carbon neutrality
煤炭科学技术. 2022, 50(6): 321–328 <http://www.mtkxjs.com.cn/article/id/8e8fbb7d-4899-45fd-a0ed-92d75004f1e4>



关注微信公众号，获得更多资讯信息



移动扫码阅读

杨科,魏家乐,付强,等.安徽省关闭/废弃矿井地下空间储能潜力及减碳效益[J].煤炭科学技术,2025,53(4):45-55.

YANG Ke, WEI Jiale, FU Qiang, et al. Potential of underground space energy storage and carbon reduction benefits of closed/abandoned mines in Anhui Province[J]. Coal Science and Technology, 2025, 53(4): 45-55.

安徽省关闭/废弃矿井地下空间储能潜力及减碳效益

杨科^{1,2,3},魏家乐^{1,2,3},付强^{2,3,4},吕鑫^{1,2,3}

(1.安徽理工大学 矿业工程学院,安徽淮南 232001; 2.安徽理工大学 安徽省关闭/废弃矿井资源开发利用工程研究中心,安徽淮南 232001;
3.安徽理工大学 深部煤炭安全开采与环境保护全国重点实验室,安徽淮南 232001; 4.安徽理工大学 煤炭安全精准开采国家地方
联合工程研究中心,安徽淮南 232001)

摘要:随着“双碳”目标的持续推进,构建以可再生能源为主体的新型电力系统已成为我国能源转型的核心任务。大规模、高灵活性的储能技术需求与日俱增,这为关闭/废弃矿井抽水蓄能电站的开发提供了重要发展机遇。对安徽省关闭/废弃矿井地下空间抽水蓄能建设潜力进行评估,以期解决选址等因素对传统抽水蓄能电站建设的制约,探索矿区绿色转型与新型电力系统协同发展的创新路径,推进安徽省抽水蓄能高质量发展。通过文献计量与政策分析详细总结了近年抽水蓄能电站发展规划,分析了当前关闭/废弃矿井抽水蓄能电站建设的发展趋势,并结合安徽省关闭煤矿位置、地下空间规模和水资源分布等抽水蓄能资源禀赋,将近年全省60处关闭/废弃矿井按距主要水系距离划分为3个梯度:50 km内高潜力区、50~100 km中潜力区以及100 km外低潜力区,并分别选取典型矿井开展精细化评估,探讨抽水蓄能电站建设规模。以两淮矿区朱庄煤矿为例,从地下可利用空间、地下储水库有效库容等方面详细分析了朱庄煤矿建造抽水蓄能电站的可行性并设计朱庄煤矿拟建抽水蓄能电站装机容量达17.87 MW。采用关闭/废弃矿井抽水蓄能电站碳排放量计算模型,计算其相较传统火力发电碳减排量约为1.13万t/d。结果表明:利用关闭/废弃矿井建造抽水蓄能电站可以成为安徽省新型储能建设发展的有效支撑,为安徽省能源结构调整和碳中和目标作出积极贡献。

关键词:关闭/废弃矿井;抽水蓄能;可行性;碳排放计算

中图分类号:TD985 文献标志码:A 文章编号:0253-2336(2025)04-0045-11

Potential of underground space energy storage and carbon reduction benefits of closed/abandoned mines in Anhui Province

YANG Ke^{1,2,3}, WEI Jiale^{1,2,3}, FU Qiang^{2,3,4}, LV Xin^{1,2,3}

(1. Faculty of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 2. Anhui Provincial Engineering Research Center for Closed/Abandoned Mine Resources Development and Utilization, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China;
3. National Key Laboratory of Deep Coal Safety Mining and Environmental Protection, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China; 4. National and Local Joint Engineering Research Center for Coal Safe and Precise Mining, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China)

Abstract: With the continuous advancement of the “double carbon” goal, the construction of a new power system with renewable energy as the main body has become the core task of China’s energy transformation. The demand for large-scale and highly flexible energy storage technology is steadily on the increase, which provides an important development opportunity for the development of closed/abandoned mine pumped storage power stations. The potential of pumped storage construction in underground space of closed/abandoned mines in Anhui Province is evaluated in order to solve the constraints of site selection and other factors on the construction of traditional

收稿日期:2025-02-10 策划编辑:朱恩光 责任编辑:陈思成 DOI: 10.12438/cst.2025-0171

基金项目:深地国家科技重大专项资助项目(2024ZD1004100);煤炭安全精准开采国家地方联合工程研究中心开放基金资助项目(EC2023030);安徽省教育厅项目安徽高校自然科学研究资助项目(2024AH050392)

作者简介:杨科(1979—),男,四川泸州人,教授,博士。E-mail: keyang2003@163.com

通讯作者:付强(1994—),男,河南固始人,讲师,博士。E-mail: fuqiang@aust.edu.cn

pumped storage power stations, explore the innovative path of green transformation of mining areas and coordinated development of new power systems, and promote the high-quality development of pumped storage in Anhui Province. The development planning of pumped storage power stations in recent years is summarized through bibliometrics and policy analysis, and the development trend of the construction of pumped storage power stations in closed/abandoned mines is analyzed. Combined with the pumped storage resource endowments such as the location of closed coal mines, the scale of underground space and the distribution of water resources in Anhui Province, the 60 closed/abandoned mines in the province in recent years are divided into three gradients according to the distance from the main water system: high potential area within 50 km, medium potential area within 50–100 km and low potential area outside 100 km, and typical mines are selected to carry out fine evaluation and discuss the construction scale of pumped storage power stations. Taking Zhuzhuang Coal Mine in Huainan-Huaibei Coal Mines mining area as an example, the feasibility of building pumped storage power station in Zhuzhuang Coal Mine is analyzed in detail from the aspects of underground available space and effective storage capacity of underground storage reservoir. The installed capacity of the proposed pumped storage power station in Zhuzhuang Coal Mine is designed to reach 17.87 MW. The carbon emission calculation model of closed/abandoned mine pumped storage power station is used to calculate the carbon emission reduction of 11 300 t/d compared with traditional thermal power generation. The results show that the use of closed/abandoned mines to build pumped storage power stations can become an effective support for the development of new energy storage construction in Anhui Province, and make a positive contribution to the adjustment of energy structure and carbon neutrality in Anhui Province.

Key words: closed/abandoned mines; pumped storage; viability; calculation of carbon emissions

0 引言

“十四五”以来,安徽省进入绿色低碳转型的关键时期,《安徽省碳达峰实施方案》明确指出要加快构建清洁低碳安全高效的能源体系^[1]。现阶段省内电力需求快速增长,2023年全省累计用电量3 214亿kWh,同比增长7.4%。尤其是高峰负荷时期,电力系统面临较大的供需压力。传统的火电和核电等基荷电源难以灵活调节输出,而可再生能源的间歇性进一步加剧了这一问题。新型电力系统对灵活调节输出的迫切需求,使得抽水蓄能、压缩空气储能等正日益成为储能技术研发与应用领域的重点。压缩空气储能现阶段正处于示范推广阶段,尽管近年来技术进步显著,但在实际项目中的长期运行数据积累较少^[2]。相较而言,压缩空气储能对地下储能库的气密性保持能力、地质构造适配性以及岩体力学稳定性等方面提出的技术指标,显著高于传统抽水蓄能电站对地下洞室群的工程要求,这构成了制约其规模化应用的重要技术瓶颈^[3]。鉴于此,安徽省能源局发布《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)安徽省实施方案》提出要加快安徽省抽水蓄能电站高质量发展。然而,抽水蓄能高昂的工程成本以及生态环境保护等问题难以解决^[4],并且目前对于安徽省水库选址、工程质量、电网功能和投资回报等方面的评估分析方法不够成熟。但随着安徽省关闭/废弃矿井数量逐年增加^[5],选择将关闭煤矿改建成抽水蓄能电站成为解决安徽省关闭煤矿数量增加、满足电力需求的方案之一^[6]。

关闭/废弃矿井抽水蓄能电站因其有效利用关闭

矿井资源、减少土地占用和环境破坏的特点,受到越来越多学者的重视。20世纪60年代, HARZA^[7]首先提出利用关闭矿井建造抽水蓄能电站的想法。此后,LUICK、MENÉDEZ等^[8-12]多位国外学者针对矿井遗留地下空间建造抽水蓄能电站存在的电站建设方案、水库选址、数值模型建立以及市场潜力等问题进行了深入研究。2018年,德国Prosper-Haniel煤矿关闭,并成为全球首个废弃矿井改建成抽水蓄能电站成功的案例^[13]。随着近年来我国关闭煤矿数量急剧增加,国内众多学者开始关注废弃矿井抽水蓄能,袁亮、谢和平等^[4,14]针对关闭/废弃矿井抽水蓄能电站原理、建设模式、发展战略等开展研究,论证了关闭/废弃矿井抽水蓄能在国内发展的可行性;卞正富等^[15-16]对关闭矿井地下水库设计及建造的基础问题包括水库选址、矿井稳定性、密封性、库容设计等进行了研究,验证了关闭矿井地下空间建造水库的可行性;文志杰等^[17-19]系统分析了井下抽蓄电站面临的关键问题,确定了如地下水库安全性评价及治理技术、水库库容计算模型等关键技术突破方向;朱超斌等^[20]优化了关闭煤矿抽水蓄能电站模型及其地下空间结构,提高了井下抽水蓄能电站的通达性和蓄水能力;刘钦节等^[21]针对石台矿抽水蓄能电站地下水库、厂房、水轮机组设计进行了详细阐述,系统分析了抽水蓄能电站多能互补一体化设计的综合效益。同时,由于现阶段“双碳”目标工作的开展,抽水蓄能电站减碳效益同样备受关注。侯公羽等^[22-24]多位学者采用全生命周期计算、CCER法以及基于碳排放因子等多种方法计算了抽水蓄能电站碳减排量。为解决选址等因素对传统抽水蓄能电站建设的制约,

推进安徽省抽水蓄能高质量发展,开展针对安徽省关闭/废弃矿井抽水蓄能电站建设的可行性和减碳效益研究具有重要的科学与工程意义。

笔者通过分析安徽省乃至全国近十年抽水蓄能电站建设相关支持政策,同时针对安徽省典型关闭矿井位置和可利用地下空间大小差异,探讨了安徽省废弃矿井抽水蓄能电站建设的可行性及规模概况。最后以两淮矿区朱庄煤矿为例,在地下可利用空间及储水库容等方面分析其改建成为抽水蓄能电站的可行性,并详细计算了朱庄煤矿改建抽水蓄能电站带来的减碳效益,为安徽省关闭/废弃矿井抽水蓄能电站建设提供参考依据和数据支持。

1 安徽省关闭/废弃矿井抽水蓄能发展趋势

1.1 政策梳理

2024年11月,国家能源局发布的《关于促进抽水蓄能电站健康有序发展有关问题的意见》中首次明确指出,新型储能技术对推进我国实现“双碳”目标具有重大意义,是实现碳达峰、碳中和的重要支撑。2021-09-17,国家能源局印发了《抽水蓄能中长期发展规划(2021—2035年)》,提出到2025年,我国抽水蓄能电站建设规模将超过6200万kW;到2030年,抽蓄电站发电系统的总容量有望达到12000万kW。此外,2022年5月,国家发改委发布《关于促进新时

代新能源高质量发展实施方案》中强调要加快、鼓励和推动抽水蓄能电站的建设和发展,并将其纳入到全国范围内。近期,国家发改委相继发布《关于加强新形势下电力系统稳定工作的指导意见》和《关于加强电网调峰储能和智能化调度能力建设的指导意见》指出要以创新支持新型电力系统建设,稳步发展抽水蓄能,充分发挥抽水蓄能电站优势。如图1所示。

2022-05-09,安徽省能源局发布《安徽省抽水蓄能电站中长期发展计划(2021—2035)》,通知提到安徽省将着力建设长三角地区的绿色储能基地,推动一批具备良好条件、前期工作深度和综合效益较好的大型抽水蓄能电站建设,为安徽省和长三角建设以新能源为主的新型电网奠定良好的基础。2022-12-07,安徽省人民政府印发了《安徽省碳达峰实施方案》。提出要加快新能源体系的构建,合理布局存储空间,推动风光储、风能、光能、火力发电等多能互补工程的建设。

1.2 发展趋势

1)近年来,“双碳”政策推动了安徽省新型电力系统的迅速发展。抽水蓄能电站作为目前最成熟、最经济、最有可能大规模开发的新型发电方式^[15],其灵活调节电力输出、克服可再生能源间歇性不足的特点,是推动新型电力系统规模化发展的重要保障,也是安徽省未来新型储能建设发展的重点。与此同

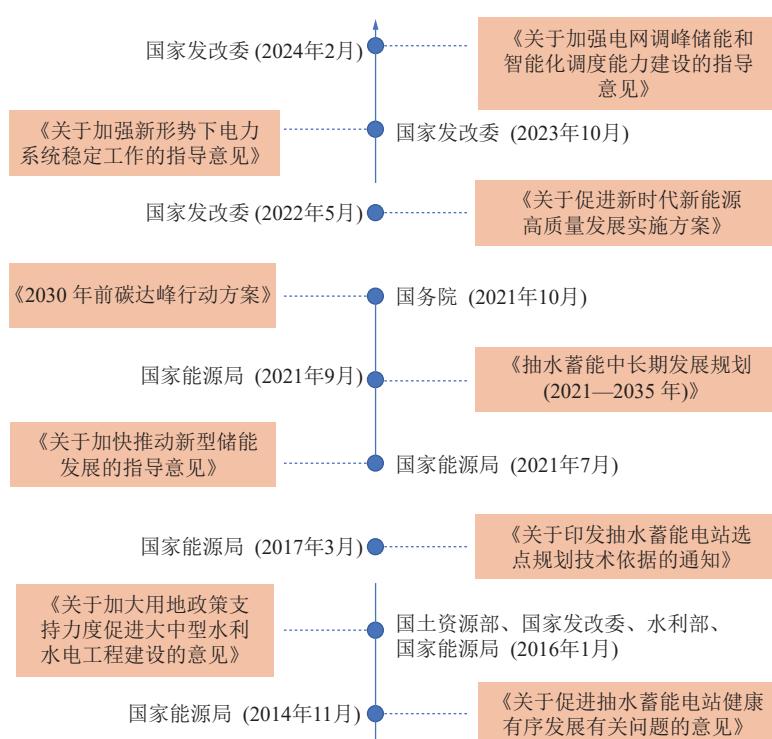


图1 国家抽水蓄能建设发展政策统计情况

Fig.1 National pumped storage construction and development policy statistics

时,国家以及安徽省陆续发布多项支持抽水蓄能发展的文件,特别是在长三角地区内推动抽水蓄能电站的共建共享和协调发展。这些举措为关闭/废弃矿井改造成抽水蓄能电站提供了全面的政策支持,为其发展奠定了坚实的基础。

2)一方面安徽省的抽水蓄能电站建设有着巨大的市场需求,“十四五”期间,全省规划建设抽水蓄能电站项目9个,装机容量1 080万kW。以2025年、2030年和2035年为时间节点,全省累计建成抽水蓄能电站规模分别达468万、1 000万和1 600万kW以上,未来安徽省需要大量建造抽水蓄能电站满足用电需求。另一方面安徽省内大量矿井相继关闭为抽水蓄能电站提供了丰富的可利用地下空间。同时,这些矿井多位于省内各河流系统附近,且本身具备的地下水资源也为抽水蓄能电站的水库建设提供了有力支持。关闭/废弃矿井抽水蓄能电站的诸多优势在这一过程中得到了突显,关闭/废弃矿井改建成为抽水蓄能电站不仅能满足省内抽水蓄能电站建设的需求,还能有效利用废弃矿井资源。此外,关闭的矿井巷道和采空区的利用,对于降低基准水压和减少温室气体排放也具有重要意义。

2 安徽省关闭/废弃矿井抽水蓄能建设潜力

2.1 常规抽蓄电站建设情况

安徽省抽水蓄能资源较为丰富,开发建设抽水蓄能电站潜力较大。目前,安徽省已经建成投入运行了4个抽水蓄能电站,总装机容量为348万kW(其中为安徽电网提供207万kW,为华东电网提供141万kW),占比为10.7%,位居全国第3。在建2个抽水蓄能电站,总装机容量为248万kW,占全国总装机容量的4.5%,位居全国第8。“十四五”期间将完成9个重大工程,总装机容量1 080万kW,占全国总装机容量的5.3%,位居全国第8。详情如图2所示。

结合全省用电需求、新能源开发和补充电源调峰状况,预计到2030年,全省需新增抽水蓄能电站约950万kW。为适应华东电网对电力的需要,至2030年,规划建设规模将达到1 750万kW左右。安徽省用电需求正在急剧增加,同时,“双碳”目标工作的开展也预示着以可再生能源为主的新型储能未来会快速发展。

2.2 关闭/废弃矿井及地下空间资源分布

近年来,安徽省关闭煤矿近60座,主要分布在两淮地区,共计退出产能达3 332万t。2022年淮北石

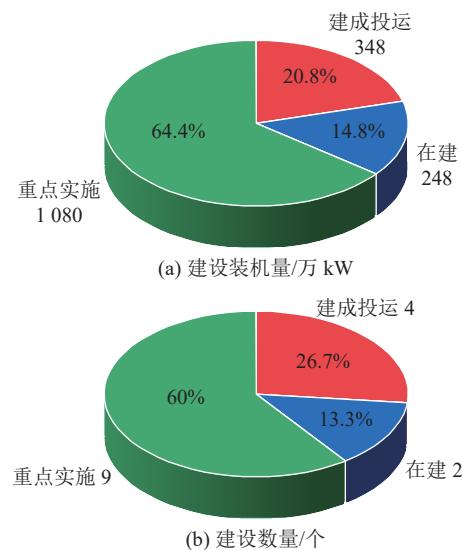


图2 安徽省抽蓄电站建设情况
Fig.2 Construction of pumped storage power station in Anhui Province

台煤矿关闭成为物流园区,2024年安徽淮北双龙煤矿关闭^[25]。经统计安徽省关闭矿井及其退出产能如图3所示。

依据安徽省典型关闭煤矿调研数据与井工矿井可利用地下空间大小与产能的关系系数,安徽省关闭煤矿可利用地下空间资源规模计算公式为^[26]

$$V = kP \quad (1)$$

式中: V 为安徽省关闭煤矿可利用地下空间体积,万m³; k 为安徽省可利用地下空间比例系数,可依据参考文献[24]获得; P 为安徽省关闭煤矿退出产能,万t。

依据参考文献[26]中谢和平院士提出的煤矿可利用空间判识理论体系,结合安徽省典型关闭煤矿的地质赋存条件与工程特征。具体而言,在区域便捷性维度,重点考量矿区与电网基础设施的衔接度、

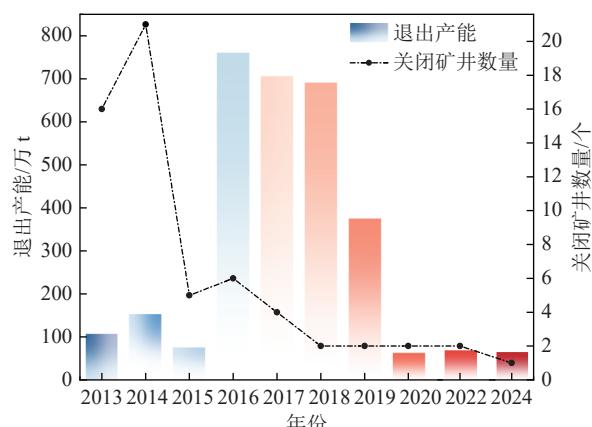


图3 安徽省矿井关闭及其退出产能
Fig.3 Mine closure and exit capacity in Anhui Province

交通可达性以及水文地质稳定性等关键指标;在开发潜力方面,系统评估了煤矿地下可利用空间规模;经济效益分析则基于全生命周期成本理论,统筹考虑初期改建投资、长期水资源调度成本及全周期发电收益等经济要素。因此,本文考虑对安徽省位于水资源丰富地区 50 km 以内、50~100 km 以及 100 km 以外关闭煤矿进行统计并分别计算其可利用地下空间大小(表 1)。

表 1 安徽省关闭煤矿可利用空间分布

Table 1 Available spatial distribution of closed coal mines in Anhui Province

距主要水系距离/km	退出产能/万t	可利用地下空间/万m ³
≤50	1 567	277.74
50~100	1 615	310.68
≥100	150	27.00

根据表 1 估算数据得出安徽省大部分关闭煤矿集中在长江、淮河、新安江等水资源充足地区,且地下可利用空间量可观,距离在 100 km 以内的空间累计达 588.42 万 m³,具备了发展建设关闭煤矿抽水蓄能电站的先决空间资源条件。

2.3 水资源禀赋

2022 年,安徽省水资源总量达 545.19 亿 m³^[27],且水资源多集中在淮河、长江、新安江流域。全省各河系水资源储量详见表 2。

表 2 安徽省各河系水资源储量

Table 2 Water resources reserves of rivers in Anhui Province

河系	淮河流域	长江流域	新安江流域	全省
地表水/亿m ³	118.52	305.55	52.65	476.72
地下水/亿m ³	80.27	69.74	9.00	159.01
总量/亿m ³	174.79	317.74	52.66	545.19

由于安徽省气候和水资源特点,长江、淮河、新安江等流域年平均降水量达 1 153.03 mm,并且拥有丰富的地表水和地下水资源。这一水资源禀赋解决了抽水蓄能电站建造前期所需的水资源调度以及后期水资源的补充,为抽水蓄能提供了得天独厚的条件。

2.4 关闭/废弃矿井抽蓄建设可行性分析

根据安徽省抽水蓄能电站建设规划以及废弃矿井关闭情况。笔者对全省建成投运、在建和重点实施的 15 座抽水蓄能电站以及典型关闭/废弃矿井的站点分布位置进行了普查,站点规划如图 4 所示。

常规抽水蓄能电站选址困难的原因:一是开发难度大。建造抽水蓄能电站上下水库需要足够大的高度差,所以大多抽蓄电站建设都会选择有较大地形差的山区、峡谷等。这类地形不仅开发难度大而且易受自然灾害,如地震、山体滑坡的影响。如何选择地形稳定的地区以及减少开发过程中的安全隐患是常规抽蓄电站选址的难点之一;二是水资源调度难度大。建造初期需要考虑如何获得足够的水资源,其次还要考虑电站后期水资源的损耗以及补给工作,虽然天然径流和降雨可以作为一种有限的补充方式,但是仍需确保充足的水源供给。

关闭/废弃矿井抽水蓄能优势:①如图 4 所示,安徽省部分典型废弃矿井集中在长江、淮河以及新安江流域,水资源充足且降水量大,无论是建造前期水资源调度还是后期水资源的补充都有明显优势。这种“矿井-水系”协同分布格局,使得废弃矿井改造抽水蓄能电站在水资源保障方面较传统站点具有显著优势。此外,我国煤炭开采活动每年造成约 80 亿 t 地下水资源的破坏性流失,而当前矿井水的综合利用率仅为 25%^[16]。在此背景下,利用关闭矿井建设抽水蓄能电站更能实现对矿井水资源的高效循环利用。②安徽省作为华东地区重要的能源基地,近年来随着煤炭行业供给侧结构性改革的深入推进,省内关闭/废弃矿井数量持续增加,形成了规模可观的地下空间资源库。这种“现成”的地下空间资源,不仅能够节省传统抽水蓄能电站地下开挖成本,更能缩短建设周期,具有显著的经济性和工程可行性优势。③天然的高度差满足了抽水蓄能电站的建设要求,并且大部分废弃矿井都集中在经济相对薄弱的地方居住人口不多,针对一些抽水蓄能电站安全隐患的处理相对简单。特别值得关注的是,这种“天然高差+低人口密度+防护结构”的组合优势,使得电站运行中的稳定性风险、渗漏风险等安全隐患的防控难度显著降低,安全维护成本较新建电站可以相应减少。

2.5 关闭/废弃矿井抽蓄建设规模

结合前文安徽省关闭煤矿位置普查以及安徽省关闭煤矿可利用地下空间计算,依据参考文献 [25] 分别对 3 类关闭煤矿建设抽水蓄能电站的规模进行分析计算:

$$Z = \mu g Q_g H \quad (2)$$

$$Q_g = V_y / T \quad (3)$$

式中: Z 为关闭煤矿装机容量, MW; μ 为装机综合效

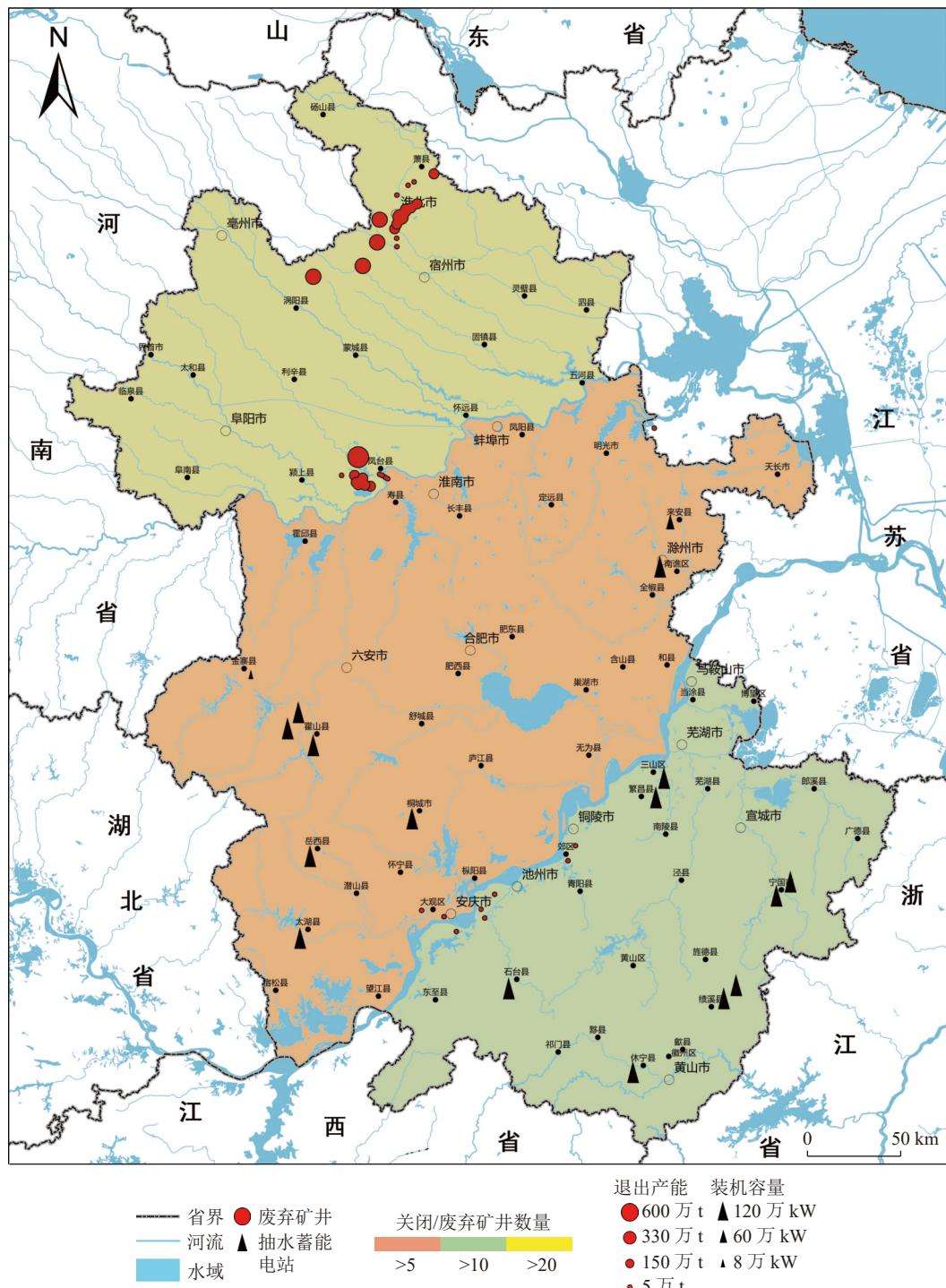


图4 安徽省关闭废弃矿井与抽蓄电站建设分布

Fig.4 Distribution of closed abandoned mines and pumped storage power station construction in Anhui Province

率,取75%; g 为重力加速度, m/s^2 ; Q_e 为流量, m^3/s ; H 为水头高度,取350 m,代表典型关闭煤矿的平均水头高度, m; V_y 为关闭煤矿有效库容, 万 m^3 ; T 为抽水蓄能电站发电时间, h。

拟定安徽省关闭煤矿抽水蓄能电站每天发电时间为10 h^[28], 50 km以内、50~100 km以及100 km以外关闭煤矿有效库容^[25]分别为270万、300万、20万 m^3 。计算50 km以内的关闭煤矿抽水蓄能电

站装机容量:

$$Z_1 = \frac{\mu g V_y H}{T} = 192.94 \text{ MW} \quad (4)$$

同样计算出50~100 km以及100 km以外关闭煤矿抽水蓄能电站装机容量分别为

$$Z_2 = 214.38 \text{ MW} \quad (5)$$

$$Z_3 = 14.29 \text{ MW} \quad (6)$$

综上所述,随着关闭煤矿产能增大,可利用地下

空间增加,关闭煤矿抽水蓄能电站装机容量也随之增加,据估算省内所有关闭煤矿全部建成抽水蓄能电站装机容量可达421.61 MW。

同时,针对3类关闭煤矿周边水资源情况以及地下可利用空间对其电站建造规模进行分析:① ≤ 50 km(李嘴孜煤矿、新庄煤矿),如图5所示,这部分矿井本身周边水资源充足(邻近淮河以及瓦埠湖),并且地下可利用空间较大,可用来建造规模较大的抽水蓄能电站。以新庄孜煤矿和潘一矿为例,拟定其有效库容为160万 m^3 ,全部建成抽水蓄能电站装机容量可达114.33 MW。多用于调峰填谷,平衡电网能量需求。② $50 \sim 100$ km(费村煤矿、戴村煤矿),如图6所示,针对此类周边水资源充足(靠近微山湖),但关闭后留存下来可利用地下空间资源较少的矿井,可以将下水库建造在废弃矿井中而上水库选择建造在地面水源富足区域,形成一种半地下式抽水蓄能电站。以杨庄煤矿、朔里煤矿、朱庄煤矿为例,拟定其有效库容为90万 m^3 ,全部建成抽水蓄能电站装机容量可达64.31 MW。③ ≥ 100 km(刘店煤矿、百善煤矿),如图7所示,这类废弃矿井由于距离两河较远,抽蓄电站前期水资源调度成本较大,后期水库水资源的补充有限,所以适合建造一些小型抽蓄电站,主要用于特殊领域或临时供电。以刘店煤矿

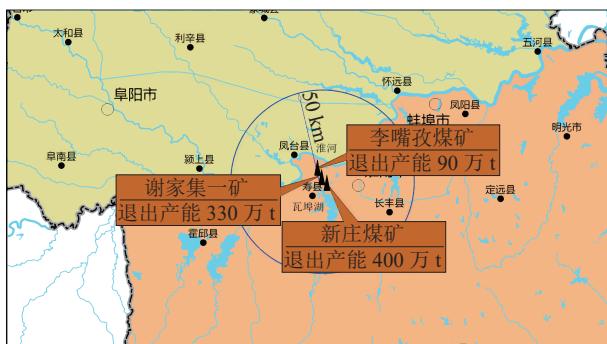


图5 新庄煤矿周边水资源情况

Fig.5 Water resources situation around Xinzhuan Coal Mine

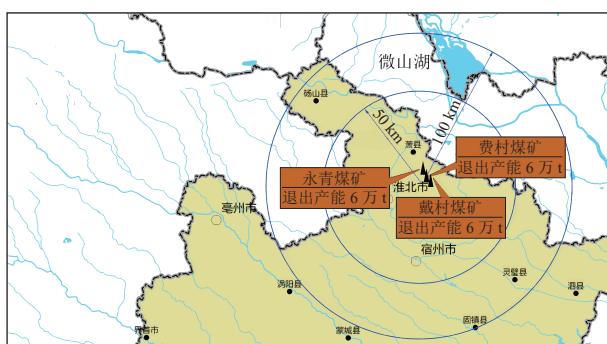


图6 费村煤矿周边水资源情况

Fig.6 Water resources around Feicun Coal Mine

为例,拟定其有效库容20万 m^3 ,建成抽水蓄能电站装机容量可达14.29 MW。



图7 刘店煤矿周边水资源情况

Fig.7 Water resources situation around Liudian Coal Mine

3 安徽省关闭/废弃矿井抽水蓄能减碳效益研究

3.1 抽蓄电力系统碳排放结构

目前,我国抽水蓄能在蓄水环节主要通过燃料燃烧以及可再生能源风光发电将下水库水抽至上水库,在用电高峰期将上水库水排向下水库利用重力势能转化为电能发电。根据用电需求以及碳排放源可以将电力系统的碳排放分为4个环节,如图8所示^[29]。

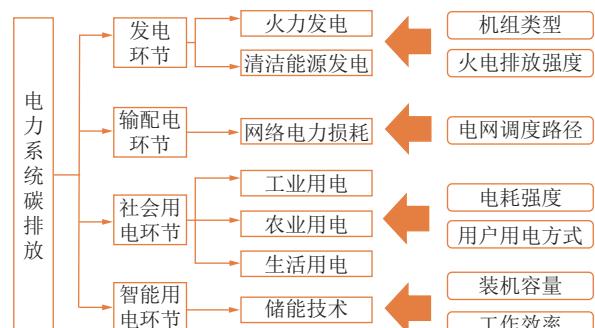


图8 电力系统碳排放来源分解

Fig.8 Decomposition diagram of carbon emission sources in power system

本文将计算传统火电发电以及废弃矿井内抽水蓄能发电碳排放量差异,以此来研究关闭/废弃矿井抽水蓄能电站的碳减排效益。此外,由于实际排放量差异本文只考虑发电环节与输配电环节的碳排放量。

3.2 抽蓄减碳效益计算模型

情景1: 火电发电

1)发电环节。电力系统中,发电过程二氧化碳排放主要由燃料燃烧以及电站的运行2部分组成。其中各种燃料燃烧时产生的二氧化碳量也各不相同,

因此该情况下发电过程中燃料消耗的二氧化碳产生公式^[29]为

$$E_1 = (24 - T_h) \sum_{i=1}^n N_i b \alpha_i + T_h N_1 b_1 \alpha_1 + \theta_x Q \quad (7)$$

式中: i 为发电燃料种类(本案例选用烟煤); N_i 为发电过程燃料发电机组的容量, MW; T_h 为调峰时间, h/d; b 为发电机组以高消耗率运行时燃料的消耗率, g/kWh; α_i 为燃料燃烧过程中二氧化碳的产生系数, g/kg; N_1 为火电机组总容量, MW; b_1 为火电机组额定运行时煤的消耗率, g/kWh; α_1 为煤在燃烧过程中二氧化碳的产生系数, g/kg; Q 为火电组发电总量, kWh; θ_x 为发电过程中电厂稳定运行的二氧化碳产生系数, g/kWh。

2)输配电环节

$$E_2 = \theta_t Q \quad (8)$$

式中: θ_t 为发电后电网配送到用户过程中的二氧化碳产生系数, g/kWh。

情景 2: 废弃矿井抽水蓄能

1)发电环节。发电环节主要包括燃料燃烧、抽水蓄能电站蓄水、电厂发电产生的二氧化碳,则产生公式为

$$E_3 = 24N_i b_i \alpha_i + \frac{1}{\varphi} T_w N_g \sum_{i=1}^n b_i \alpha_i + \theta_x Q \quad (9)$$

式中: φ 为综合效率系数; T_w 为抽蓄电站运行时长, h/d; N_g 为承担填谷作用的抽水蓄能机组容量, MW; b_i 为发电机组额定工作时燃料的消耗率, g/kWh。

2)输配电环节

$$E_4 = \theta_t Q \quad (10)$$

3.3 算例分析

我国矿井地下开采主要采用长壁式开采, 矿井开采完毕后形成了垮落带、裂隙带、位移带(图9)。垮落带位于剩余煤体上方, 大量岩石破碎, 形成巨大的可贮空间。在垮落带(裂隙带)之上, 有许多裂隙和裂缝, 也能储存一些水。而废弃矿井改建的抽水蓄能电站实际装机容量取决于废弃矿井地下空间的有效库容^[15], 因此计算关闭矿井地下采空区储水能力是能否建成抽水蓄能电站的关键。计算关闭矿井地下采空区储水能力时可采用式(11)进行估算^[30]:

$$V_{sg} = \int_0^{h_2} F l_1 l_w f dh \quad (11)$$

式中: V_{sg} 为单个采空区储水体积, m³; F 为储层的可用系数, 取值为 0.8, 代表有 20% 的库容水无法被利用; l_1 、 l_w 分别为采空区的长度和宽度, m; f 为采场储

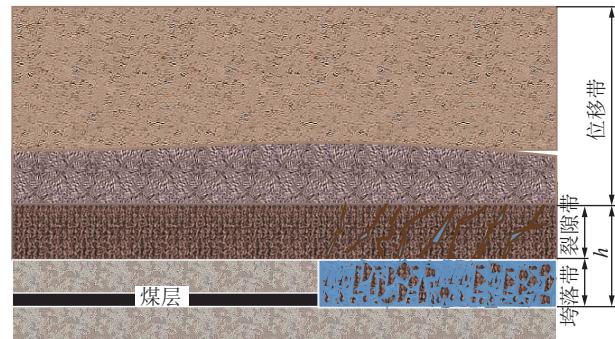


图 9 煤矿地下储水空间

Fig.9 Underground water storage space of coal mine

存系数, 可用膨胀系数 K 计算; h_2 为裂隙带高度, m; 崩落带、裂隙带两者高度可依据下式(12)—式(14)^[30]获得:

$$h_1 = \frac{100M}{2.1M+16} + 2.5 \quad (12)$$

$$h_2 = \frac{100M}{1.6M+3.6} + 5.6 \quad (13)$$

$$f = 1 - 1/K \quad (14)$$

式中: h_1 为垮落带高度, m; M 为开采时煤层厚度, m; K 为不同位置岩体的膨胀系数可按式(15)^[31]估算:

$$K = \begin{cases} K_d + \lambda_1 h & \\ \lambda_1 = \frac{K_{\max} - K_d}{h_1}, & 0 \leq h \leq h_1 \\ K_{\max} - \lambda_2 \ln(h - h_1 + 1) & \\ \lambda_2 = \frac{K_{\max} - 1}{\ln(h_2 - h_1 + 1)}, & h_1 \leq h \leq h_2 \end{cases} \quad (15)$$

式中: K_{\max} 为垮落带岩石残余膨胀系数; K_d 为裂隙带顶部(裂隙带与弯曲沉陷带交点位置)的膨胀系数; λ 为衰减系数。

以安徽省朱庄煤矿为例, 朱庄煤矿计划于“十四五”期间闭坑, 退出产能达 160 万 t, 根据式(1)估算其可利用地下空间为 28.8 万 m³, 拟定朱庄煤矿地下建造抽水蓄能电站有效库容为 25 万 m³。由式(2)计算得出朱庄煤矿抽水蓄能电站抽水蓄能机组装机容量可达 17.87 MW。此外, 朱庄煤矿Ⅲ601 超宽工作面开采煤层均厚 2.7 m, 走向 606 m, 倾向 235 m^[32], 由式(12)、式(13)计算得出其垮落带、裂隙带高度分别为 34.09、34.73 m, 根据式(15)计算取得 K 值为 1.03, 由式(14)计算出采场储存系数 f 为 0.029。最后由式(11)计算朱庄煤矿单个采空区储水库容可达 11.48 万 m³。依据文献 [15] 计算可得朱庄煤矿在此建设规模下最小水库库容大小为 8.45 万 m³, 可以看出朱庄煤矿满足建设废弃矿井抽水蓄能电站的条件。

根据上述计算, 对其不同情况下二氧化碳排放

量进行估算。其中燃煤机组总容量取 600 MW, 且在额定工作运行时的烟煤消耗率为 323 g/kWh。目前, 全球火力发电厂(燃煤电厂)使用的煤种主要为烟煤, 烟煤燃烧时二氧化碳排放因子为 95 700 kg/TJ, 且其平均低位发电量为 23 180 kJ/kg^[33], 依据现行综合能耗计算通则^[34]计算得出烟煤燃烧时过程中二氧化碳产生系数为 2 218.3 g/kg。

拟定该电站调峰时间、抽水蓄能电站发电机组工作时间均为 10.00 h/d, 火电机组总发电量为 12.00 GWh/d。综上所示所得到的基础数据(表 3)。

表 3 基础数据
Table 3 Basic data sheet

参数	数值
燃煤机组总装机量 N_t/MW	600.00
额定功率煤消耗率 $b_t/[\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	323.00
抽水蓄能机组装机量 N_g/MW	17.87
综合效率 $\phi/\%$	75.00
工作时间 $T_w/(\text{h} \cdot \text{d}^{-1})$	10.00
火电机组发电总量 $Q/(\text{GWh} \cdot \text{d}^{-1})$	12.00
发电过程二氧化碳产生系数 $\theta_t/[\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	322.15
电网配送二氧化碳产生系数 $\theta_e/[\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	46.80
调峰时间 $T_h/(\text{h} \cdot \text{d}^{-1})$	10.00
高效率运行时燃料的消耗率 $b/[\text{g} \cdot (\text{kWh})^{-1}]$	358.00

根据情景 1、情景 2 的公式以及相关基础数据计算得出该电站在情景 1、情景 2 下碳排放量依次为 2.62 万、1.49 万 t/d。由此可以得出朱庄煤矿建设抽水蓄能电站的碳减排量为 1.13 万 t/d。

4 结 论

1) 抽水蓄能电站建造是安徽省新型储能发展的重点。结合安徽省内关闭/废弃矿井建设抽水蓄能电站的潜在优势, 利用关闭煤矿地下空间建造抽水蓄能电站可有效缓解抽水蓄能电站选址压力, 释放安徽省抽水蓄能电站建设潜力。

2) 省内长江、淮河、新安江水资源充足年平均降水量达 1 153.03 mm, 满足了抽水蓄能电站建造所需的水资源调度和补充。其次, 大量关闭煤矿遗留可利用地下空间可建成装机容量总计达 421.61 MW 的抽水蓄能电站。考虑周边水资源状况, 距离河系在 100 km 以内的关闭煤矿再利用潜力较大, 其中潘一矿、谢一矿、新庄煤矿、杨庄煤矿以及朱庄煤矿等有望建成规模较大的抽水蓄能电站。

3) 详细分析了安徽省朱庄煤矿在可利用地下空

间、地下储水库容量等方面建设抽水蓄能电站的可行性; 设计朱庄煤矿抽水蓄能电站装机容量为 17.87 MW, 计算得出相较于传统火力发电, 朱庄煤矿建设抽水蓄能电站的碳减排量为 1.13 万 t/d。

参考文献(References):

- [1] 安徽省人民政府关于印发安徽省碳达峰实施方案的通知[J]. 安徽省人民政府公报, 2022, (22): 3-14.
Notice of the People's Government of Anhui Province on Printing and Issuing the Implementation Plan of Carbon Peak in Anhui Province [J]. Gazette of the People's Government of Anhui Province, 2022, (22): 3-14.
- [2] 赵同彬, 刘淑敏, 马洪岭, 等. 废弃煤矿压缩空气储能研究现状与发展趋势[J]. 煤炭科学技术, 2023, 51(10): 163-176.
ZHAO Tongbin, LIU Shumin, MA Hongling, et al. Research status and development trend of compressed air energy storage in abandoned coal mines[J]. China Industrial Economics, 2023, 51(10): 163-176.
- [3] 王汉鹏, 武允昊, 张冰, 等. 废弃矿井压缩空气储能技术研究现状与新设计构想 [J/OL]. 煤炭科学技术, 1-15 [2025-02-21].
<https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250221.1159.007>
WANG Hanpeng, WU Yunhao, ZHANG Bing, et al. Research Status and New Design Concept of Compressed Air Energy Storage Technology in Abandoned Mine [J]. Coal Science and Technology, 1-15 [2025-02-21]. <https://link.cnki.net/urlid/11.2402.TD.20250221.1159.007>
- [4] 袁亮, 张通, 张庆贺, 等. 双碳目标下废弃矿井绿色低碳多能互补体系建设思考[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2131-2139.
YUAN Liang, ZHANG Tong, ZHANG Qinghe, et al. Construction of green, low-carbon and multi-energy complementary system for abandoned mines under global carbon neutrality[J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(6): 2131-2139.
- [5] 蒋健明, 韩锋, 丁海, 等. 安徽省两淮煤田废弃煤炭矿井剩余资源综合调查、开发利用现状及展望[J]. 中国矿业, 2024, 33(8): 46-58.
JIANG Jianming, HAN Feng, DING Hai, et al. Comprehensive survey, status and prospect of exploitation and utilization of residual resources of abandoned coal mine in Huainan and Huabei Coalfields, Anhui Province[J]. China Mining Magazine, 2024, 33(8): 46-58.
- [6] 杨科, 付强, 袁亮, 等. 关闭/废弃矿井地下空间抽水蓄能发展战略研究[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(3): 283-292.
YANG Ke, FU Qiang, YUAN Liang, et al. Development strategy of pumped storage in underground space of closed/abandoned mines[J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(3): 283-292.
- [7] HARZA R D. Hydro and pumped storage for peaking[J]. Power Energy, 1960, 64(10): 79-82.
- [8] LUICK H, NIEMANN A, PERAU E, et al. Coalmines as underground pumped storage power plants (UPP): A contribution to a sustainable energy supply [C]: Geo-phys. Res. Abstr. , 2012, 14: 4205.

- [9] MENÉNDEZ J, LOREDO J, GALDO M, et al. Energy storage in underground coal mines in NW Spain: Assessment of an underground lower water reservoir and preliminary energy balance[J]. *Renewable Energy*, 2019, 134: 1381–1391.
- [10] TAM S W, BLOMQUIST C A, KARTSOUNES G T. Underground pumped hydro storage: An overview[J]. *Energy Sources*, 1979, 4(4): 329–351.
- [11] BODEUX S, PUJADES E, ORBAN P, et al. Interactions between groundwater and the cavity of an old slate mine used as lower reservoir of an UPSH (Underground Pumped Storage Hydroelectricity): A modelling approach[J]. *Engineering Geology*, 2017, 217: 71–80.
- [12] SORENSEN K E. Underground reservoirs: Pumped storage of the future[J]. *Civil Engineering*, 1969, 39(3): 66–70.
- [13] ANDRE N. Proposed underground pumped hydro storage power plant at prosper-haniel colliery in bottrop-state of play and prospects[J]. *Mining Report Gluckauf*, 2018, 154(3): 214–223.
- [14] 谢和平, 侯正猛, 高峰, 等. 煤矿井下抽水蓄能发电新技术: 原理、现状及展望[J]. 煤炭学报, 2015, 40(5): 965–972.
- XIE Heping, HOU Zhengmeng, GAO Feng, et al. A new technology of pumped-storage power in underground coal mine: principles, present situation and future[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(5): 965–972.
- [15] 卞正富, 周跃进, 曾春林, 等. 废弃矿井抽水蓄能地下水库构建的基础问题探索[J]. 煤炭学报, 2021, 46(10): 3308–3318.
- BIAN Zhengfu, ZHOU Yuejin, ZENG Chunlin, et al. Discussion of the basic problems for the construction of underground pumped storage reservoir in abandoned coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(10): 3308–3318.
- [16] 顾大钊. 煤矿地下水库理论框架和技术体系[J]. 煤炭学报, 2015, 40(2): 239–246.
- GU Dazhao. Theory framework and technological system of coal mine underground reservoir[J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(2): 239–246.
- [17] 文志杰, 姜鹏飞, 宋振骐, 等. 关闭/废弃矿井抽水蓄能开发利用现状与进展[J]. 煤炭学报, 2024, 49(3): 1358–1374.
- WEN Zhijie, JIANG Pengfei, SONG Zhenqi, et al. Development status and progress of pumped storage in underground space of closed/abandoned mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2024, 49(3): 1358–1374.
- [18] 文志杰, 姜鹏飞, 宋振骐, 等. 废弃矿井抽水蓄能面临的关键问题与对策思考[J]. 山东科技大学学报(自然科学版), 2023, 42(1): 28–37.
- WEN Zhijie, JIANG Pengfei, SONG Zhenqi, et al. Key problems and countermeasures of abandoned mine pumped storage[J]. *Journal of Shandong University of Science and Technology (Natural Science)*, 2023, 42(1): 28–37.
- [19] 高学平, 袁泽雨. 抽水蓄能电站地下水库建设进展及关键水力学问题[J]. 水利学报, 2023, 54(9): 1058–1069.
- GAO Xueping, YUAN Zeyu. Construction progress and key hydraulic problems of underground reservoir in pumped storage power station[J]. *China Industrial Economics*, 2023, 54(9): 1058–1069.
- [20] 朱超斌, 周跃进, 卞正富, 等. 废弃矿井抽水蓄能句法视角下拓扑模型构建及空间优化[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2279–2288.
- ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, BIAN Zhengfu, et al. Topological model construction and space optimization of abandoned mine pumped storage from the perspective of space syntax[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2279–2288.
- [21] 刘钦节, 杨卿干, 杨科, 等. 废弃矿井抽水蓄能电站多能互补利用模式及案例分析[J]. 采矿与安全工程学报, 2023, 40(3): 578–586.
- LIU Qinjie, YANG Qinggan, YANG Ke, et al. Case study of pumped storage hydropower based on multi-energy complementary utilization mode in abandoned coal mines[J]. *Journal of Mining & Safety Engineering*, 2023, 40(3): 578–586.
- [22] 侯公羽, 马晓赟, 杨振华, 等. 抽水蓄能电站全生命周期碳排放计算与分析[J]. 中国环境科学, 2023, 43(S1): 326–335.
- HOU Gongyu, MA Xiaoyun, YANG Zhenhua, et al. Calculation and analysis of carbon emissions in the whole life cycle of pumped storage power stations[J]. *China Environmental Science*, 2023, 43(S1): 326–335.
- [23] 徐三敏, 张弓, 王放. 基于CCER规则的抽水蓄能碳减排计算方法研究[J]. 中国电力, 2024, 57(1): 175–182.
- XU Sanmin, ZHANG Gong, WANG Fang. Study on calculation method of carbon emission reduction of pumped storage based on CCER rule[J]. *China Industrial Economics*, 2024, 57(1): 175–182.
- [24] 许一洲, 刘皓明, 潘方圆, 等. 基于排放因子法的抽水蓄能碳减排量化方法研究[J]. 电力需求侧管理, 2023, 25(4): 48–54.
- XU Yizhou, LIU Haoming, PAN Fangyuan, et al. Research on carbon emission reduction for pumped storage based on emission factor method[J]. *Power Demand Side Management*, 2023, 25(4): 48–54.
- [25] 刘飞跃, 陈漓赟, 杨科, 等. 安徽省关闭煤矿资源调查及其综合利用研究[J]. 煤田地质与勘探, 2024, 52(6): 1–11.
- LIU Feiyue, CHEN Yunyun, YANG Ke, et al. Investigation and comprehensive utilization of resources in closed coal mines in Anhui Province, China[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(6): 1–11.
- [26] 谢和平, 高明忠, 刘见中, 等. 煤矿地下空间容量估算及开发利用研究[J]. 煤炭学报, 2018, 43(6): 1487–1503.
- XIE Heping, GAO Mingzhong, LIU Jianzhong, et al. Research on exploitation and volume estimation of underground space in coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2018, 43(6): 1487–1503.
- [27] 何刚, 张世玉, 杨霞, 等. 安徽省“水–土–能”系统安全评价及联合风险概率测算[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(10): 4094–4106.
- HE Gang, ZHANG Shiyu, YANG Xia, et al. Safety evaluation and joint risk probability calculation of Water-Land-Energy systems in Anhui Province[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2024, 24(10): 4094–4106.
- [28] 姜淇, 常玉红, 衣传宝, 等. 基于NSGA-II串行模式搜索的新能源发电与抽水蓄能电站联合系统多时间尺度优化调度方法

- [J]. 太阳能学报, 2024, 45(4): 434–441.
- JIANG Qi, CHANG Yuhong, YI Chuanbao, et al. Multi-time scale optimization scheduling of combined system of new energy power generation and pumped storage power station based on NSGA-II serial pattern search[J]. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 2024, 45(4): 434–441.
- [29] 何姗姗. 结合储能技术的电力系统低碳发展模式研究: 以抽水蓄能为例 [D]. 北京: 华北电力大学, 2017.
- HE Shanshan. Research on low carbon development model of power system with energy storage technology: A case study of pumped storage power system [D]. Beijing: North China Electric Power University, 2017.
- [30] 浦海, 卞正富, 张吉雄, 等. 一种废弃矿井地热资源再利用系统研究 [J]. 煤炭学报, 2021, 46(2): 677–687.
- PU Hai, BIAN Zhengfu, ZHANG Jixiong, et al. Research on a reuse mode of geothermal resources in abandoned coal mines [J]. *Journal of China Coal Society*, 2021, 46(2): 677–687.
- [31] FAN J Y, XIE H P, CHEN J, et al. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs [J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114007.
- [32] 王晨. 朱庄煤矿超宽工作面底板采动破坏规律及防治水工程应用 [D]. 徐州: 中国矿业大学, 2023.
- WANG Sheng. Mining failure law of ultra-wide working face floor in Zhuzhuang coalmine and application of prevention and control water engineering [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2023.
- [33] 蔡博峰. 中国城市温室气体清单研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2012, 22(1): 21–27.
- CAI Bofeng. Research on greenhouse gas emissions inventory in the cities of China [J]. *China Population*, 2012, 22(1): 21–27.
- [34] 陈海红, 李鹏程, 王中航. GB/T 2589-2020《综合能耗计算通则》国家标准解读 [J]. *标准科学*, 2021(12): 107–111.
- CHEN Haihong, LI Pengcheng, WANG Zhonghang. Interpretation of National Standard GB/T 2589-2020, General rules for calculation of the comprehensive energy consumption [J]. *Standard Science*, 2021(12): 107–111.