

黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估

卞正富 朱超斌 周跃进 徐雨农

引用本文:

卞正富, 朱超斌, 周跃进, 等. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 51-64.
BIAN Zhengfu, ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, et al. Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River Basin[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2022, 50(12): 51-64.

在线阅读 View online: <https://dx.doi.org/10.12363/issn.1001-1986.22.06.0460>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

山西省废弃矿井煤层气地面钻井开发关键问题与对策

Key problems and countermeasures of CBM development through surface boreholes in abandoned coal mines of Shanxi Province
煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 86-95 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.011>

废弃矿井地下空间旅游资源开发利用模式研究

Study on exploitation and utilization mode of tourism resources of the underground space in abandoned mines
煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 79-85 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.010>

沁水盆地南部潘庄区块废弃矿井煤层气地球化学特征及成因

Origin and geochemical characteristics of coalbed methane in abandoned coal mines, Panzhuang block, southern Qinshui basin
煤田地质与勘探. 2019, 47(6): 67-72,77 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2019.06.011>

基于脆弱性指数法的韩城矿区11号煤层底板突水危险性评价

Risk assessment of water inrush of No.11 coal seam floor in Hancheng mining area on the basis of vulnerability index method
煤田地质与勘探. 2017, 45(4): 112-117,125 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2017.04.020>

关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究

Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines
煤田地质与勘探. 2021, 49(4): 71-78 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.04.009>

神府矿区5⁻²煤层富油煤赋存特征及资源潜力评价

Occurrence characteristics and resource potential evaluation of tar-rich coal for No.5⁻² coal seam in Shenfu Mining Area
煤田地质与勘探. 2021, 49(3): 26-32, 41 <https://doi.org/10.3969/j.issn.1001-1986.2021.03.004>



移动阅读

卞正富, 朱超斌, 周跃进, 等. 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估[J]. 煤田地质与勘探, 2022, 50(12): 51–64. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0460

BIAN Zhengfu, ZHU Chaobin, ZHOU Yuejin, et al. Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River Basin[J]. Coal Geology & Exploration, 2022, 50(12): 51–64. doi: 10.12363/issn.1001-1986.22.06.0460

黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估

卞正富^{1,2}, 朱超斌¹, 周跃进², 徐雨农²

(1. 中国矿业大学 环境与测绘学院, 江苏 徐州 221116; 2. 中国矿业大学 深部岩土力学与地下工程国家重点实验室, 江苏 徐州 221116)

摘要: 针对我国关闭矿井资源利用率低、蓄电储能需求日益增长的问题, 废弃矿井抽水蓄能技术是实现资源二次开发利用, 提升电网调峰能力的有效手段。基于废弃矿井抽水蓄能电站工作原理与发展现状, 提出在黄河流域九省区利用废弃矿井建设抽水蓄能电站的半地下式、全地下式 2 种模式。通过综合考虑空间、地质、水文、社会、经济与资源等影响因素, 提出废弃矿井抽水蓄能电站选址评价指标体系, 并进行黄河流域废弃矿井抽水蓄能电站实例分析。基于 2016—2020 年黄河流域九省区的废弃煤矿资料, 利用废弃矿井抽水蓄能电站静态效益与动态效益计算方法, 定量评估黄河流域九省区废弃煤矿抽水蓄能电站建设的开发潜力。结果表明: (1) 黄河流域九省区能源资源丰富, 现阶段满足电力供应需求, 但火电仍是电力供应主体且水电发展进入瓶颈阶段; (2) 影响废弃矿井抽水蓄能电站选址的重要因素为巷道空间体积、上下水库水位差、巷道围岩稳定性、巷道围岩渗透率与地下水循环特征; (3) 由黄河流域废弃矿井抽水蓄能电站实例分析可知, 其发电效率可达到 75.7%, 可媲美常规抽水蓄能电站; (4) 2016—2020 年黄河流域九省区废弃煤矿累计有效可利用井巷空间为 $4.7 \times 10^7 \text{ m}^3$, 依据 132 座废弃矿井基本情况, 从统计学角度估算出废弃矿井抽水蓄能电站可利用井巷空间为 $1.34 \times 10^7 \text{ m}^3$, 利用其建设抽水蓄能电站年发电量可达 $3.78 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$, 可满足 2021 年黄河流域九省区 28.4% 的弃风、弃光电量的消纳需求, 每年直接经济效益约达 21.2 亿元。综上表明, 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能利用具有可观的发展前景。

关键词: 废弃矿井; 抽水蓄能; 选址因素; 指标体系; 效益分析; 潜力评估; 黄河流域

中图分类号: TD74; TV743 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-1986(2022)12-0051-14

Evaluation on potential of using abandoned mines for pumped storage in nine provinces of Yellow River Basin

BIAN Zhengfu^{1,2}, ZHU Chaobin¹, ZHOU Yuejin², XU Yunong²

(1. School of Environment and Spatial Informatics, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China;

2. State Key Laboratory for Geomechanics and Deep Underground Engineering, China University of Mining and Technology, Xuzhou 221116, China)

Abstract: In view of the low utilization rate of closed mine resources and the increasing demand for power and energy storage in China, the pumped storage technology of abandoned mine is an effective means to realize the secondary development and utilization of resources and enhance the peak sheaving capacity of power grid. Based on the working principle and development status of pumped storage power plants using the abandoned mines, it was proposed to build the semi-underground and full-underground pumped storage power plants using the abandoned mines in the nine provinces of Yellow River Basin. By considering the influence factors of space, geology, hydrology, society, economy

收稿日期: 2022-06-04; 修回日期: 2022-10-14

基金项目: 国家自然科学基金国际(地区)合作与交流资助项目(52061135111)

第一作者: 卞正富, 1965 年生, 男, 江苏建湖人, 博士, 教授, 博士生导师, 从事矿区土地复垦与生态重建、地下空间利用的研究工作。

E-mail: zfbian@cumt.edu.cn

and resources, an evaluation index system of site selection for pumped storage power plants using the abandoned mine was developed and an case analysis was performed for the pumped storage power plants using abandoned mine in Yellow River Basin. Besides, the development potential of pumped storage power plants using abandoned coal mines in the nine provinces of Yellow River Basin was quantitatively assessed based on the data of abandoned coal mines in the nine provinces of Yellow River Basin from 2016 to 2020 and the calculation methods of static and dynamic benefits of pumped storage power plants using the abandoned mines. The research shows that: (1) Rich energy resources are distributed in the nine provinces in Yellow River Basin and could meet the demand for electricity supply at present, but thermal power is still the main source of electricity supply while hydropower has entered the bottleneck stage of development. (2) The important influencing factors for the site selection of pumped storage power plant using abandoned mine are the special volume of drifts, the water level difference between the upper and lower reservoirs, the stability and permeability of the drift surrounding rocks and the characteristics of groundwater circulation. (3) According to the case analysis on the pumped storage power plant using abandoned mine in Yellow River Basin, it is found that its power generation efficiency could reach 75.7%, which is comparable to that of the conventional pumped storage power plant. (4) The cumulative special volume of shafts and drifts available in the abandoned coal mines in the nine provinces of Yellow River Basin from 2016 to 2020 is $4.7 \times 10^7 \text{ m}^3$. According to the basic information of 132 abandoned mines, it is further estimated from the statistical point of view that the available space of shafts and drifts for the pumped storage power plant in the abandoned mine is $1.34 \times 10^7 \text{ m}^3$, and it is calculated that the annual power generation of the pumped storage power plants using the abandoned mines would reach $3.78 \times 10^9 \text{ kW} \cdot \text{h}$, which could meet the consumption demand for 28.4% of the abandoned wind and photovoltaic power in the nine provinces of Yellow River Basin in 2021, with an annual direct economic benefit of about 2.12 billion yuan. To sum up, the utilization of abandoned mine for pumped storage power plant in the nine provinces of Yellow River Basin has huge prospects of development.

Keywords: abandoned mine; pumped storage; factor of site selection; index system; benefit analysis; potential evaluation; Yellow River Basin

习近平总书记在第 75 届联合国大会上提出“中国二氧化碳排放力争于 2030 年前达到峰值, 争取在 2060 年前实现碳中和”^[1]。据国际能源机构(IEA)统计, 2021 年, 与能源相关 CO_2 排放量达到 363 亿 t, 煤炭使用产生的碳排放占全球 CO_2 排放增量的 40% 以上, 达到 153 亿 t, 均创历史新高。中国 CO_2 排放量达到 119 亿 t, 约占全球碳排放总量的 33%^[2]。2021 年 10 月, 国务院印发《2030 年前碳达峰行动方案》, 提出“构建新能源占比逐渐提高的新型电力系统, 推动清洁电力资源大范围优化配置”。当前我国正构建以光、风、水、核为主体的新能源电力系统, 并推动电力行业从高碳向低碳、从以化石能源为主向以清洁能源为主的发展方向^[3-4]。在新能源电力系统发展过程中, 风、光等可再生能源存在强间歇性、随机性与波动性等诸多问题^[5], 迫切需要建设储能电站, 保障电力系统的稳定性与安全性。在诸多储能方式中, 抽水蓄能电站是促进新能源大规模利用、实现多能互补、打造安全可靠与经济灵活电力系统的最可靠方法^[6]。

抽水蓄能电站具有技术成熟、容量大、能源效率高、使用寿命长等优点, 然而其建设受到地形、土地可利用性和较高的资金成本的限制, 同时易对周边环境产生负面影响, 因此, 抽水蓄能电站选址成为亟待解决的重要科学问题。针对矿产资源开发过程中形成的、大小、形态不一的巷道、硐室及采空区等地下空间^[7],

袁亮、谢和平、顾大钊等院士和专家提出了废弃矿井抽水蓄能电站利用的战略构想^[8]。废弃矿井巷道具有空间大、结构简单等特点, 进行简易加固密封后即可使用, 是建设抽水蓄能电站地下水库的理想场所^[9], 为抽水蓄能电站选址提供了新的方向。利用废弃矿井建设抽水蓄能电站可以减少土地占用和景观破坏, 降低电站建设投资^[10], 缩短建库周期^[11], 具有良好的经济、社会和环境效益。

伴随煤炭供给侧结构性改革的不断深化, 黄河流域九省区均推行煤炭行业化解过剩产能政策, 关闭了数量众多的资源枯竭型或落后产能煤矿, 形成了大量废弃矿井地下空间。为实现空间资源高效利用, 笔者开展废弃矿井抽水蓄能利用潜力评估, 提出一种废弃矿井抽水蓄能选址评价指标体系, 并进行典型废弃矿井抽水蓄能电站实例分析, 以 2016—2020 年黄河流域九省区关闭煤矿资料为基础, 对黄河流域废弃矿井抽水蓄能电站利用潜力进行动静态效益定量计算分析, 以为黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站建设提供参考。

1 废弃矿井抽水蓄能电站发展现状与工作原理

20 世纪初, 美国麻省注册了一个结合风车的半地下、半地表蓄能装置^[12], 但该前瞻性想法在之后几十年并未实现。20 世纪 60 年代起, 以美国、德国为主的

许多国家开始进行地下抽水蓄能电站的基础研究^[13-15]。1960 年, R. D. Harza^[16] 提出可使用地下或露天矿山建设抽水蓄能电站。美国提出建设 Mount Hope 抽水蓄能电站项目^[17], 其上水库是在地面开挖的人工水池, 下水库则是利用地下约 760 m 深处废弃的矿井空间, 但该项目并未成功利用废弃矿井作为下水库。随着理论与技术的不断完善, 废弃矿井抽水蓄能电站逐步由理论走向工程实践。奥地利在阿尔卑斯山的 Nassfeld 成功建造首个真正意义的半地下抽水蓄能电站, 上水库为 2 km 的人工隧道群, 下水库为天然湖泊^[18], 为废弃矿井抽水蓄能电站工程建设奠定了基础。澳大利亚计

划用露天金矿建设抽水蓄能电站, 储能规模预计为 250 MW^[19], 并于 2021 年举行 Kidston 抽水蓄能发电站破土动工典礼。南非规划利用 Fast West Rand 区废弃的深井金矿建设一个大型全地下抽水蓄能电站^[20], 目前该项目正在做大量详细的数据分析及可行性分析。德国正在利用废弃的 Prosper-Haniel 煤矿改建为半地下抽水蓄能电站, 若项目实施成功将成为世界第一个废弃煤矿抽水蓄能电站, 同时下萨克森州能源研究中心也在规划将废弃金属矿巷道改建为全地下的抽水蓄能电站^[21-22], 当前进行试验型抽水蓄能电站建设。国外废弃矿井抽水蓄能电站工程设计参数见表 1。

表 1 国外部分废弃矿井抽水蓄能电站工程设计参数^[23]

Table 1 Engineering design parameters of some pumped storage power plants using abandoned mines abroad^[23]

电站名称	类型	水库巷道长/m	水头/m	库容/10 ³ m ³	功率/MW	储能容量/(MW·h)
西班牙 Asturian 发电站	半地下	5 700	300~600	170	23.52	141
南非 Fast West Rand 发电站	全地下	67 000	1 200/1 500	1 000	抽 955/发 1 230	6 800
德国 Prosper-Haniel 发电站	半地下	15 500	560	600	200	820
德国 Grund ore mine 发电站	全地下	25 000	700	240~260	100	400

当前国内学者在废弃矿井建设抽水蓄能电站方面研究较少。2010 年, 神东大柳塔矿建设煤矿地下分布式水库示范工程^[24], 顾大钊院士团队建立了煤矿地下水库理论框架和技术体系^[25], 为废弃矿井抽水蓄能地下水库建设提供了借鉴。2015 年, 谢和平院士团队全面阐述了煤矿井下抽水蓄能发电的概念与技术^[26]。2021 年中煤能源大电煤公司对 2022 年底即将闭坑的江苏沛县龙东煤矿抽水储能电站建设项目开展前期可行性研究。2022 年山东省地矿局八〇一队与中国华电集团山东公司、山东省科学院合作, 在淄博市启动废弃矿井抽水蓄能发电多能互补能源综合体项目, 计划利用闭坑煤矿建设分布式矿坑水抽水蓄能电站及供暖能源站, 开启我国废弃矿井抽水蓄能电站工程应用新篇章。

废弃矿井抽水蓄能电站工作原理与常规抽水蓄能原理一致, 其不同之处在于水库建设采用矿井原有的塌陷区或巷道群。当电网在负荷低谷期时, 利用富余电能将下水库水抽至上水库, 当电网处于负荷高峰期时, 将上水库水放至下水库发电。依据国内外现有废弃矿井抽水蓄能电站工程实践规划与工作原理, 黄河流域九省区废弃矿井建设抽水蓄能电站构建原理如图 1 所示。本文提出黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站建设的 2 种模式: 第一种为半地下式, 上水库利用塌陷区, 下水库利用巷道群(图 1a); 第二种为全地下式, 上下水库为处于不同水平的回风巷道群与运输巷道群(图 1b)。废弃矿井抽水蓄能电站模型主要由上

水库(矿山巷道群/塌陷区)、下水库(矿山下水平巷道群/上水平巷道群), 及在矿井主/副井中布置的引水系统与地下厂房等组成。

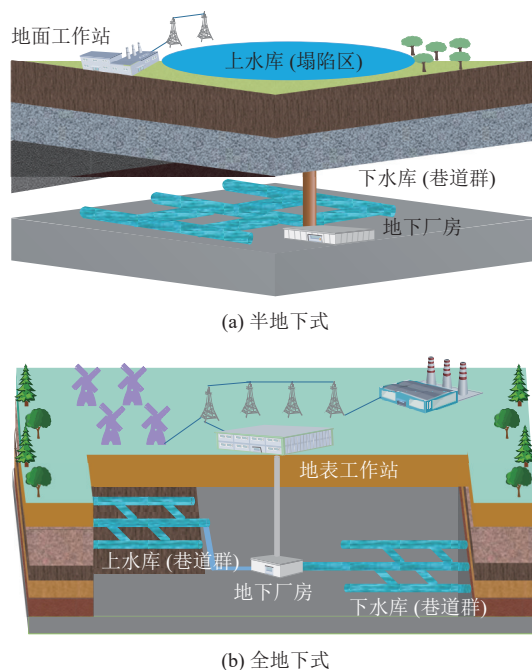


图 1 废弃矿井抽水蓄能电站建设模式

Fig.1 Construction modes of pumped storage power plant using abandoned mine

不同模式的废弃矿井抽水蓄能电站各有其优缺点, 半地下式抽水蓄能电站优点在于地下空间需求较少和改建要求相对较低, 缺点是上水库的建造需利用沉陷

区或工程开掘,且存在水的蒸发损失;全地下抽水蓄能电站的优点是减少了上水库的土地占用、减轻了水资源的蒸发损失,缺点是对地下水库要求较高,既要保持上下水库的有效库容大致相当,又需避免上下水库串通。黄河流域矿区生态以绿色、稳定和可持续发展为导向,许多矿区采用绿色采矿方法防止形成塌陷区,同时加强了矿区土地复垦与生态恢复工作,该区蒸发强烈。据此,全地下式模式更适合黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站的建设。

2 黄河流域九省区电力与矿产资源概况

2.1 电力情况

2016—2020 年,黄河流域九省区总发电装机容量与发电量全国占比均在 36% 以上,发电装机容量增速与发电量变化如图 2 所示。从图 2a 来看,黄河流域呈现用电量持续增长的特点,但火电依旧占据主体地位。由图 2b 可知,5 年间黄河流域九省区发电装机容量增速均高于全国平均水平,反映出黄河流域九省区在全国能源发展中的重要战略地位。其中,火、电装机容量增速处于全国领先水平,风、光等可再生能源装机容量增速较快,但水电装机容量增速仅在 2017 年高于全国平均值,而最近 2 年增速不到 1%,水电发展陷入桎梏阶段。在碳达峰碳中和(“双碳”)目标下,火电企业纷纷转型为新能源电力运营商,黄河流域九省区电力供需结构将会被打破,必将构建以风、光、水电等清洁能源为主体的电力系统。黄河流域九省区加快风光等可再生能源开发和抽水蓄能电站建设势在必行。

2.2 矿产资源概况

目前我国主要的能源矿产是煤炭、石油与天然气,其中,黄河流域九省区的煤炭储量全国占比 70.9%,石油占比 34.6%,天然气 64.2%,是我国能源生产的重要战略地带(表 2)。

煤炭作为黄河流域九省区最重要的一次能源,在区域经济发展中起到了关键作用。随着资源枯竭和国家政策等原因,大量矿井被关闭或废弃^[27]。据统计,2016—2020 年黄河流域九省区关闭煤矿数量达到 1 314 个,其中,小型矿井数量占 79%,中型矿井占 17%,大型矿井占 4%,总规模达 38 896 万 t/a(表 3)。黄河流域九省区废弃煤矿具有体量大、分布广泛等特征,为建造废弃矿井抽水蓄能电站创造了良好的基础条件。

3 废弃矿井抽水蓄能选址评价指标体系

3.1 选址评价指标体系的建立

废弃矿井抽水蓄能电站目前处于探索发展阶段,并非所有废弃矿井都适宜于建设抽水储能电站,在工

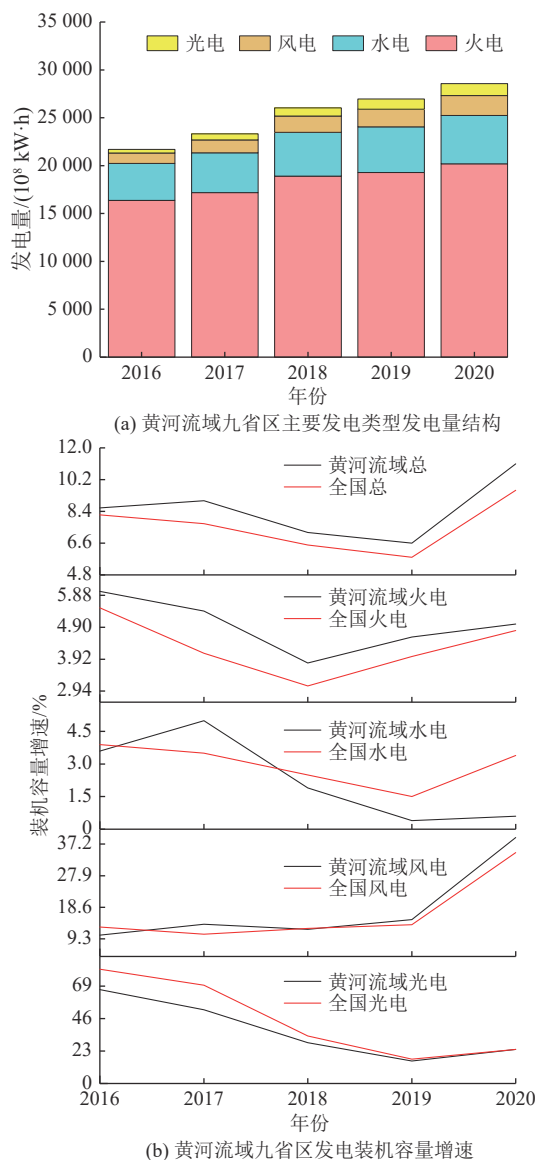


图 2 2016—2020 年黄河流域九省区电力发展情况
Fig.2 Electricity development in nine provinces of Yellow River Basin in 2016—2020

表 2 2020 年黄河流域九省区主要能源矿产储量情况
Table 2 Main energy mineral reserves in the nine provinces of Yellow River Basin in 2020

省/自治区	煤炭/亿t	石油/万t	天然气/亿m ³
青海	2.26	8 251.85	1 055.32
四川	26.66	555.40	15 274.98
甘肃	15.31	39 560.97	588.00
宁夏	35.01	4 670.51	280.67
内蒙古	194.47	6 676.91	10 123.53
陕西	293.90	36 812.83	11 096.45
山西	507.25	0	1 402.04
河南	33.65	3 022.24	62.82
山东	41.32	25 493.92	343.52
合计	1 149.83	125 044.63	40 227.33
全国	1 622.88	361 885.75	62 665.78

表 3 2016—2020 年黄河流域九省区关闭煤矿情况
Table 3 Closed coal mines in the nine provinces of Yellow River Basin from 2016 to 2020

省/自治区	不同产能规模/(万·t·a ⁻¹)						合计	
	(0,30]		(30,120)		[120,500]			
	数量	规模	数量	规模	数量	规模	数量	规模
青海	19	168	0	0	1	120	20	288
四川	447	4 925	11	840	1	150	459	5 915
甘肃	92	965	8	435	0	0	100	1 400
宁夏	31	581	13	823	3	617	47	2 011
内蒙古	41	1 230	22	1 225	5	660	68	3 085
陕西	116	2 457	32	1 890	7	1 250	155	5 597
山西	33	894	80	4 965	25	5 030	138	10 889
河南	208	3 841	29	1 561	5	900	242	6 302
山东	51	969	29	1 535	5	905	85	3 409
总计	1 038	16 030	224	13 274	52	9 632	1 314	38 896

注：数据统计来源，2016—2020年黄河流域九省区煤炭行业化解过剩产能关闭煤矿名单，关停煤矿不计入。

程建设时首先需要综合考虑各种因素，从废弃矿井中选择适宜建设的矿井。以废弃矿井抽水蓄能电站建设过程中地下水库库容、地下水循环、围岩稳定性与水质因素这 4 个关键科学问题^[8]为基础，考虑废弃矿井

区域的经济、社会与资源条件因素，综合大量研究文献^[28-37]，确定用于选址问题的一级指标(B)6 个，二级指标(C)24 个，具体如图 3 所示。

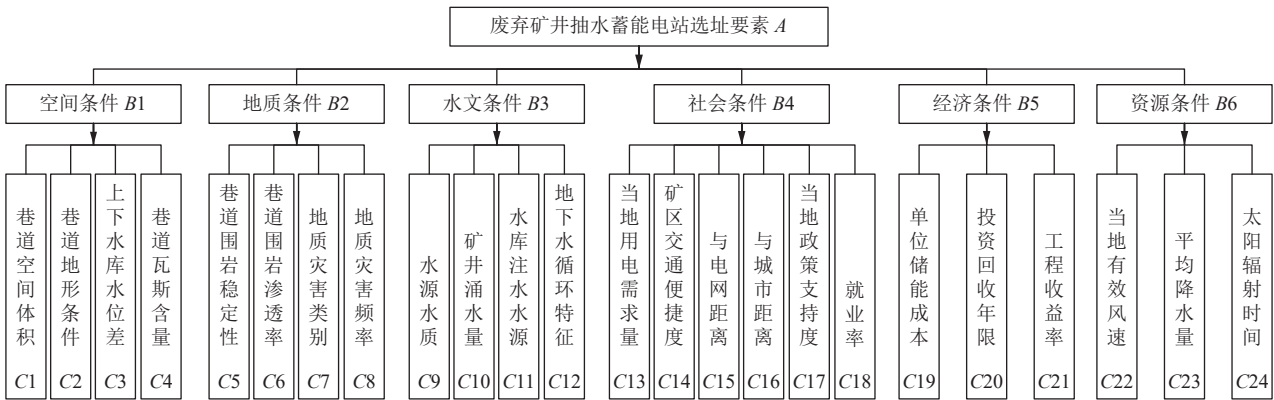


图 3 废弃矿井抽水蓄能电站选址要素

Fig.3 Factors for site selection of pumped storage power plant using abandoned mine

3.2 基于 AHP 的选址步骤

由于废弃矿井抽水蓄能选址影响因素的模糊性，选用 AHP(层次分析法)确定各指标的影响权重，该方法是将复杂问题分解为多个组成因素，并将这些因素按支配关系分组形成递阶层次，进行定性、定量分析评价^[38]。具体评估步骤如下：

第一步：确定标度和构造判断矩阵。邀请 5 位废弃矿井抽水蓄能相关领域专家对选址因素进行重要性评判，采用 1—9 标度打分法对各影响指标两两比较，构造判断矩阵。

第二步：计算各层次指标所占的权重。计算各判断矩阵的最大特征值及对应的特征向量，利用一致性

指标、随机一致性指标和一致性比率进行一致性检验。

一致性指标 CI 为：

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}$$
 (1)

式中： λ_{\max} 为矩阵最大特征根； n 为判断矩阵阶数。

随机一致性比率 CR 为：

$$CR = \frac{CI}{RI}$$
 (2)

式中：RI 为平均随机一致性指标。

第三步：一致性检验分析。当 $CR < 0.1$ ，表明通过一致性检验，反之则没有通过一致性检验。当一致性检验未通过时，需返还给专家检查是否存在逻辑问题，重新判断，再次录入判断矩阵进行分析。

3.3 选址因素权重计算

通过 5 位专家对各项指标的重要性进行评判,建立准则层对目标层(一级指标对目标层)、分析层对准则层(二级指标对一级指标)各自的判断矩阵,采用加

权平均方法并进行一致性检验,求得废弃矿井抽水蓄能选址体系中各影响因素权重。所得一致性检验与权重结果见表 4—表 5。

表 4 一致性检验结果
Table 4 Consistency test results

专家	一致性检验	判断矩阵						
		A-B	B1-C	B2-C	B3-C	B4-C	B5-C	B6-C
专家1	λ_{\max}	6.015 9	4.061 8	4.068 3	4.166 7	6.211 8	3.009 2	3.094 8
	CR	0.002 5	0.023 1	0.023 9	0.062 5	0.033 6	0.008 9	0.091 1
专家2	λ_{\max}	6.093 9	4.089 0	4.045 8	4.191 6	6.273 6	3.018 3	3.005 5
	CR	0.014 9	0.033 3	0.017 1	0.071 8	0.043 4	0.017 6	0.005 3
专家3	λ_{\max}	6.087 2	4.083 9	4.166 2	4.045 4	6.412 7	3.009 2	3.018 3
	CR	0.013 8	0.031 4	0.062 2	0.017 0	0.065 5	0.008 9	0.017 6
专家4	λ_{\max}	6.059 2	4.051 9	4.109 1	4.159 3	6.577 9	3.044 4	3.053 9
	CR	0.009 4	0.019 4	0.040 8	0.059 7	0.091 7	0.042 7	0.051 9
专家5	λ_{\max}	6.032 8	4.186 5	4.144 8	4.131 6	6.338 6	3.000 0	3.018 3
	CR	0.005 2	0.069 8	0.054 2	0.049 3	0.053 7	0	0.017 6

表 5 废弃矿井抽水蓄能选址各指标权重
Table 5 Weights of each index for site selection of pumped storage plant using abandoned mines

准则层	权重	指标层	综合权重	排序
空间条件 B1	0.304 4	巷道空间体积C1	0.123 9	3
		巷道地形条件C2	0.020 4	12
		上下水库水位差C3	0.142 7	1
		巷道瓦斯含量C4	0.017 4	15
地质条件 B2	0.299 2	巷道围岩稳定性C5	0.133 2	2
		巷道围岩渗透率C6	0.123 3	4
		地质灾害类别C7	0.013 9	18
		地质灾害频率C8	0.028 7	9
水文条件 B3	0.151 6	水源水质C9	0.014 2	17
		矿井涌水量C10	0.030 8	8
		水库注水水源C11	0.015 5	16
		地下水循环特征C12	0.091 1	5
社会条件 B4	0.073 7	当地用电需求量C13	0.022 2	11
		矿区交通便捷度C14	0.005 5	22
		与电网距离C15	0.008 3	21
		与城市距离C16	0.008 8	20
		当地政策支持度C17	0.023 9	10
		就业率C18	0.005 0	23
经济条件 B5	0.129 1	单位储能成本C19	0.055 9	7
		投资回收年限C20	0.012 8	19
		工程收益率C21	0.060 5	6
资源条件 B6	0.042 0	当地有效风速C22	0.019 4	13
		平均降水量C23	0.018 7	14
		太阳辐射时间C24	0.004 0	24

综合以上计算结果可知：C1(巷道空间体积)、C3(上下水库水位差)、C5(巷道围岩稳定性)、C6(巷道围岩渗透率)、C12(地下水循环特征)是选址的重要指标。其中，上下水库水位差影响着抽水蓄能电站的经济效益和发电效率、装机容量等；巷道空间体积则决定着上下水库容量；巷道围岩稳定性和巷道围岩渗透率影响废弃矿井抽水蓄能电站地下空间重构；地下水循环特征影响水库环保性与机组设备效率。这些指标对于抽水蓄能电站建设的可行性、经济性、安全性与环保性等有着举足轻重的影响，是工程选址过程中需要考虑的关键因素。

4 黄河流域典型废弃矿井抽水蓄能电站设计实例

利用废弃矿井抽水蓄能选址评价方法，依据专家对黄河流域九省区 5 座废弃矿井综合评价结果，选取得分最高的某矿建立全地下式抽水蓄能电站(图 4)。该矿地下空间充足，地表土地并未形成塌陷区，采取全地下式抽水蓄能电站设计。电站上水库选用一采区回风巷与运输大巷联合构建，并选取 2 条联络巷保证 2 条巷道之间较好的水体流动性。下水库由三采区东西两翼运输巷道组成，同样采用车场与联络巷作为水体流动性保障。电站采用轨道上下山与地表相连接，采用运输斜巷、二采区运输上山、二采区车场、三采区运输上山等组成输水通道，通过井巷参数确定该抽水蓄能电站主要参数(表 6)。假设废弃矿井抽水蓄能电站所产生的电力均并入电网并出售，抽水时间和发电时间为 6 h，巷道所建地下水库不考虑死库容，水库运行期间全部排空。

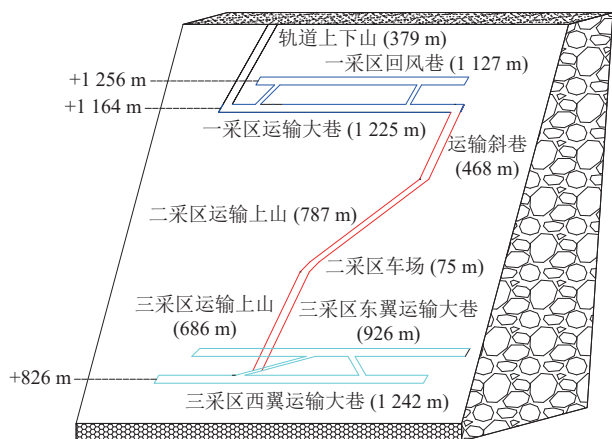


图 4 黄河流域某废矿废井全地下式抽水蓄能电站设计
Fig.4 Design of full-underground pumped storage power plant of an abandoned mine in Yellow River Basin

4.1 电站耗电量

(1) 平均水头(即为上下水库的平均高程差):

$$\bar{H} = H_d + \left(H_{sd} + \frac{1}{2} H_{sg} \right) - \left(H_{ud} + \frac{1}{2} H_{ug} \right) \quad (3)$$

表 6 废弃矿井抽水蓄能电站基本参数
Table 6 Basic parameters of pumped storage power plant using abandoned mine

参数	数值
上水库平均水位/m	1 210
上水库总容积/m ³	34 600
下水库正常储水高度/m	4.5
下水库正常储水位高程/m	830.5
下水库总容积/m ³	41 200
上下水库自然高程差/m	338
上下水库容积之比	0.84
输水巷道长度/m	2 016

式中： H_d 为上水库和下水库的自然高程差，338 m； H_{sd} 、 H_{ud} 分别为上下水库死水位，0 m； H_{sg} 、 H_{ug} 分别为上下水库储水深度，分别取值 92、4.5 m。计算可得平均水头 \bar{H} 为 381.75 m。

(2) 抽水流量：

$$Q = \frac{V}{t} \quad (4)$$

式中： V 为上水库库容，34 600 m³； t 为抽水时间，6 h；计算抽水流量 Q 为 1.60 m³/s。

(3) 输水路管道直径：

$$d = \sqrt{\frac{4Q_{\max}}{\pi v}} \quad (5)$$

式中： Q_{\max} 为管道最大水流量，取抽水流量 1.60 m³/s^[39]； v 为输水管中的水流速度，取经济流速 2.4 m/s^[40]。计算得出输水路管道直径 d 约为 0.9 m。

(4) 抽水总水头损失量 H_p ，主要包括沿程水头损失量(H_f)与局部水头损失量(H_j):

$$H_f = \beta \frac{lv^2}{2dg} \quad (6)$$

$$H_j = \xi \frac{v^2}{2g} \quad (7)$$

$$H_p = H_f + H_j \quad (8)$$

式中： β 为输水管糙率系数，取值 0.018^[41]； l 为输水巷道长度，2 016 m； g 为重力加速度，9.8 m/s²； ξ 为局部水头损失系数，取值 1^[40]。

通过计算得出沿程水头损失量为 11.85 m，局部水头损失量为 0.29 m，抽水总水头损失量为 12.14 m。

(5) 水泵最大耗电量：

$$W_{pc} = \frac{(\bar{H} + H_p) V \rho_w g}{\eta_1} \quad (9)$$

式中： W_{pc} 为水泵最大耗电量，J； ρ_w 为水的密度，1.0×10³ kg/m³； η_1 为电力系统的整体机械效率，取值 87%。

水泵的最大耗电量为 1.535×10^{11} J, 相当于 42 644 kW·h, 在抽水时长为 6 h 的模式下, 电机的平均功率为 7 107 kW。

4.2 电站发电量

(1) 最大发电量:

$$W_{pg} = (\bar{H} + H_t) V \rho_w g \eta_2 \quad (10)$$

式中: W_{pg} 为最大发电量; H_t 为发电总水头损失, 假设其近似与抽水总水头损失相同^[40]; η_2 为发电系统的整体机械效率, 取值 87%。

电机最大发电量为 1.162×10^{11} J, 相当于 32 277 kW·h, 在发电时长为 6 h 情况下, 平均发电机功率为 5 380 kW。

(2) 发电效率:

$$\eta_0 = \frac{W_{pg}}{W_{pc}} \times 100\% \quad (11)$$

式中: η_0 为废弃矿井抽水蓄能电站发电效率, %。

计算得到该抽水蓄能电站发电效率为 75.7%, 可媲美常规抽水蓄能电站。

综上可知, 该废弃矿井抽水蓄能电站装机容量可以选择为 5 000 kW(考虑死库容情况和预留库容情况水库库容会减少), 按照每天运行 6 h, 每月 3 d 停运检修计算, 发电效率约为 75.7%, 则年发电量可达 7.47×10^6 kW·h。如果建设成本在可控制范围内, 则该小型废弃矿井抽水蓄能电站方案具有一定的可行性。

5 废弃矿井抽水蓄能电站运行效益

5.1 静态效益

对于废弃矿井抽水蓄能电站静态效益的评价可以从容量效益、调峰填谷效益、排放效益等^[42]方面进行分析。

1) 容量效益

容量效益, 是指废弃矿井抽水蓄能电站投入后, 减少同规模火电站建设投入节约的效益。其计算公式^[43]如下:

$$B_c = \left[C_0 + I_0 \left(\frac{A}{P}, i, y_0 \right) \right] - \left[C_1 + I_1 \left(\frac{A}{P}, i, y_1 \right) \right] \quad (12)$$

式中: B_c 为抽水蓄能电站每年的容量效益, 万元; C_0 为火电机组固定运行费用, 万元; I_0 为火电机组的建设费用, 万元; A 为年终支付金额, 万元; P 为净值, 万元; i 为年利率; y_0 为火电机组成本回收周期, 年; C_1 为抽水蓄能机组运行费用, 万元; I_1 为抽水蓄能机组建设成本, 万元; y_1 为抽水蓄能机组成本回收周期, 年。

2) 调峰填谷效益

抽水蓄能重要作用之一就是调峰填谷, 其中, 调峰效益指抽水蓄能机组运行时减少常规调峰机组燃料所获得的效益; 填谷效益是指用电低谷期抽水蓄能电站

为保持功率平衡, 消耗富余电量进行抽水, 避免火电机组降负荷运行, 提升火电机组燃料利用率所带来的效益。综合计算公式^[42]如下:

$$B_p = \sum_{i=1}^{365} (B_0 + B'_0 - B_1 - B'_1) \cdot \omega \quad (13)$$

式中: B_p 为废弃矿井抽水蓄能电站每年调峰填谷效益, 万元; B_0 、 B'_0 分别为调峰时火电机组在调峰时段和非调峰时段燃料消耗量; B_1 、 B'_1 分别为填谷时火电机组在非填谷时段和填谷时段的燃料消耗量; ω 为市场实时煤炭价格。

3) 排放效益

排放效益是指废弃矿井抽水蓄能电站发电量替代火电站同等发电量时所减少的有害气体排放量, 主要通过减少的二氧化碳、二氧化硫与氮氧化物等排放量进行量化。

4) 建设成本节约效益

建设成本节约效益是指利用废弃矿井进行改建所节约的建设成本, 当前常规抽水蓄能电站投资标准为 5 000~6 000 元/kW。目前关于废弃矿井抽水蓄能电站成本有 2 种预测结果: 第一种利用煤矿建设抽水蓄能电站工程投资为 17 959 元/kW^[44]; 第二种基于废弃矿井改造的抽水蓄能电站的投资为 2 982 元/kW^[39]。这 2 种建设投资成本差距在于废弃矿井地下空间重构。对于巷道加固密闭所需成本存在争议, 因此, 目前对于废弃矿井抽水蓄能电站建设成本预估方案, 需待废弃矿井抽水蓄能地下空间稳定性与密闭性问题的进一步解决。

5.2 动态效益

抽水蓄能电站具有适应负荷快速变化的特性, 机组运行快速灵活, 负荷调整范围大, 调频、调相性能好, 可满足系统运行需要, 提高电网安全可靠, 由此产生的效益为动态效益。废弃矿井抽水蓄能动态效益主要体现在调频效益、调相效益、备用效益与黑启动效益。

1) 调频效益

调频效益是抽水蓄能电站代替小型火力机组进行增减荷, 以保持频率并提高电网的稳定性, 由此带来的减少能源损耗的效益。实际工程中存在一些不确定参数, 计算过程中结合经验值及实际情况进行取值, 其公式^[42]如下:

$$B_f = \sum_{i=1}^{365} \left[\sum_{j=1}^n (c_{1i} \cdot x_i + c_{2i} \cdot T_i \cdot D_i) \cdot f_i \right] - \sum_{i=1}^{365} \left(\frac{V_0 \cdot H \cdot \eta}{365} \cdot z_i \cdot m_i \cdot j_s \right) \quad (14)$$

式中： B_i 为废弃矿井抽水蓄能电站的调频效益； c_{li} 为第 i 台调峰火电机组启停时煤炭的消耗量， $g/(kW \cdot h)$ ； x_i 为第 i 台火电机组每日启动次数； c_{2i} 为第 i 台机组调频耗煤量； T_i 为第 i 台机组参与调频的总时长， h ； D_i 为第 i 台机组的机组容量， $万 kW$ ； V_0 为机组启动时消耗水量； H 为机组的平均工作水头， m ； η 为水轮机效率； z_i 为废弃矿井抽水蓄能电站日启动次数； m_i 为废弃矿井抽水蓄能电站机组数量； j_s 为当前电价， $元/(kW \cdot h)$ 。

2) 调相效益

调相效益是废弃矿井抽水蓄能机组替代火电机组，为系统提供调相时节约的火电动态成本^[43]。其计算公式为：

$$B_t = P_0 \cdot U \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot \left(\frac{A}{P}, i_s, e_s \right) + P_0 \cdot U \cdot \cos\theta \cdot \sin\theta \cdot 2\% \quad (15)$$

式中： B_t 为废弃矿井抽水蓄能电站年调相效益； P_0 为不考虑视在容量时机组的单位有功容量投资； U 为机组无功容量； $\cos\theta$ 为额定功率因数； i_s 为社会折现率； e_s 为废弃矿井抽水蓄能电站设计使用期限。

3) 备用效益

备用效益是指废弃矿井抽水蓄能机组替代火电机组，为系统提供旋转备用所节约的火电动态成本^[43]。其计算公式如下：

$$B_s = E \times 30\% \times 2\sigma \quad (16)$$

式中： B_s 为废弃矿井抽水蓄能电站备用效益； E 为抽水电站总装机容量； σ 为废弃矿井抽水蓄能电站综合效率系数。

4) 黑启动效益

发电厂在失去电源时自行启动，称“黑启动”服务，确保在电力系统局部或整体瓦解时系统重新运行，其对电网产生的经济效益称为黑启动效益^[45]。黑启动效益与电网全部停电概率、电网平均负荷、黑启动时间等条件相关，其经济效益属于广义范畴，暂无具体的计算公式。

6 废弃矿井抽水蓄能电站利用效益

由表 2 可知，我国主要煤炭资源储量大多集中在黄河流域九省，由于煤炭资源的不可再生性，未来废弃矿井数量将不断增加。文献^[46]表明 2018 年我国共有各类废弃矿山约 9.9 万座，黄河流域九省作为国家矿业生产的主要地区，废弃矿井数量十分巨大。本次以 2016—2020 年黄河流域各省区废弃煤矿为研究对象，计算其可利用地下空间，采用静态效益和动态效益 2 个维度，分析其应用潜力。

将表 3 数据与文献^[47]中的全国煤矿规模与其

井巷可利用的地下空间量的比例系数相结合，估算得出 2016—2020 年黄河流域九省区废弃矿井井巷地下空间 7 846.47 万 m^3 。按照煤矿关停后 60% 的井巷空间可以有效利用估算^[47]，黄河流域九省区 5 年来关闭矿井的可有效利用井巷空间为 $4.7 \times 10^7 m^3$ ，如图 5 所示。

因废弃矿井抽水蓄能电站对两水库间距有一定要求，所以图 5 中关闭煤矿的井巷可利用空间并非都可以作为废弃矿井抽水蓄能电站地下水库载体，需根据矿井开采情况，对废弃煤矿抽水蓄能地下水库可利用巷道进一步估算。根据现有研究表明：当上下水库高程差在 200~400 m 时，发电机组与设备成熟，但存在因水头高度引起的电站发电效率与经济效益的下降；在 400~600 m 时，废弃矿井抽水蓄能电站效率与效益均较好；在 600~800 m 时，电站所需发电机组及设备难度提升，但其发电效率和经济效益会增加；当小于 200 m，电站效率较低且建设成本较高；当大于 800 m 时，现有的高水头水泵水轮机不能满足废弃矿井抽水蓄能电站需求^[48-49]。通过调研收集黄河流域九省区 132 座关闭煤矿基本情况，其中小型矿井占比 70%，中型矿井占比 23%，大型矿井占比 7%；关闭矿井采深小于 200 m 的占比 19%，200~400 m 占比 30%，400~600 m 占比 34%，600~800 m 占比 17%^(图 6)。依据黄河流域九省区关闭矿井调研信息，按照矿井各煤层采深初步划分为不适宜建设、半地下式和全地下式 3 种类型，并按照上下水库高差进一步划分，其中，采深小于 200 m 且规模小于 3 万 t/a 不适宜建设。半地下式与全地下式模式，根据各煤层埋深进行上下水库高差分析。统计结果表明：其中 25 座不适宜废弃矿井抽水蓄能利用，95 座适宜于半地下式抽水蓄能电站建设模式，12 座适宜于全地下式抽水蓄能电站建设模式。具体各省市废弃矿井建设模式上下水库高差情况见表 7。

本文利用统计学估算的方法，提出各省区废弃煤矿抽水蓄能电站各模式井巷资源量估算公式：

$$v_{ik} = V_i \cdot a_{ik} \cdot \tau \quad (17)$$

式中： v_{ik} 为 i 省区废弃煤矿抽水蓄能电站建设 k 模式可利用井巷地下空间体积； V_i 为 i 省区井巷可利用地下空间总体积； a_{ik} 为 i 省区废弃矿井抽水蓄能建设 k 模式所占比； τ 为废弃矿井抽水蓄能电站地下水库的井巷空间比例，取 0.27^[9]。

各省区废弃煤矿抽水蓄能电站最大可发电量估算公式如下：

$$W_i = \sum_{k=1}^3 \bar{H}_{sk} v_{sk} \rho_w g \eta_{sk} + \sum_{k=1}^2 \frac{\bar{H}_{ak} v_{ak} \rho_w g \eta_{ak}}{2} \quad (18)$$



图 5 2016—2020 年黄河流域九省区关闭煤矿的井巷可利用地下空间分布(单位: 万 m^3)

Fig.5 Distribution of available underground shaft and drift space of closed coal mines in nine provinces of Yellow River Basin from 2016 to 2020 (unit: 10 000 m^3)

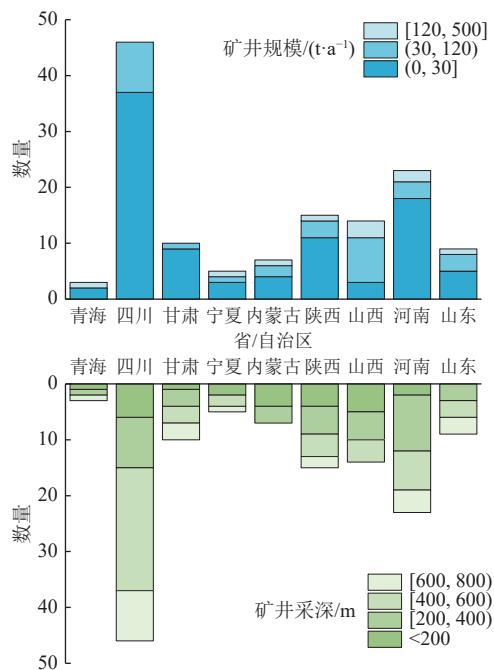


图 6 黄河流域九省区部分废弃煤矿调研情况

Fig.6 Investigation on some abandoned coal mines in nine provinces of Yellow River Basin

式中: W_i 为 i 省区废弃煤矿抽水蓄能电站发电总量;
 \bar{H}_{sk} 、 \bar{H}_{ak} 分别为 i 省区半地下式、全地下式抽水蓄能电

表 7 黄河流域九省区部分废弃矿井抽水蓄能电站建设模式
Table 7 Construction mode of some pumped storage power plants using abandoned mines in nine provinces of Yellow River Basin

省/自治区	半地下式建设矿井数			全地下式建设矿井数	
	200~400 m	400~600 m	600~800 m	200~400 m	400~600 m
青海	1	0	0	0	1
四川	9	22	4	4	1
甘肃	3	3	2	0	1
宁夏	0	2	0	1	0
内蒙古	3	0	0	0	0
陕西	5	4	1	0	1
山西	5	4	0	0	0
河南	10	7	2	1	1
山东	3	3	2	0	1

站建设 k 模式平均水头高; v_{sk} 、 v_{ak} 为 i 省区半地下式、全地下式抽水蓄能电站建设 k 模式可利用井巷地下空间总体积; η_{sk} 、 η_{nk} 为 i 省区半地下式、全地下式抽水蓄能电站建设 k 模式发电效率。

通过井巷资源量估算公式计算出, 黄河流域九省区 5 年废弃矿井抽水蓄能电站各建设模式可利用井巷空间为 $1.34 \times 10^7 \text{ m}^3$ (表 8)。假设上下水库高差 200~

表 8 2016—2020 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站可利用井巷资源量
Table 8 Available shaft and drift resources for pumped storage power plants in abandoned mines in nine provinces of Yellow River Basin in 2016-2020

单位: 万 m³

省/自治区	半地下式			全地下式	
	[200, 400) m	[400, 600) m	[600, 800) m	[200, 400) m	[400, 600) m
青海	1.74	0.00	0.00	0	1.742 4
四川	72.12	176.46	32.08	32.08	8.02
甘肃	18.12	18.12	12.08	0	6.04
宁夏	0	20.75	0	10.36	0
内蒙古	27.44	0	0	0	0
陕西	72.60	58.08	14.52	0	14.52
山西	103.43	82.74	0	0	0
河南	181.72	127.20	36.34	18.17	18.17
山东	58.41	58.41	38.94	0	19.47

400 m 的废弃矿井抽水蓄能电站平均净水头高度为 300 m, 抽水蓄能效率为 70%; 400~600 m 的平均净水头高度为 500 m, 抽水蓄能效率为 75%; 600~800 m 的平均净水头高度为 700 m, 抽水蓄能效率为 80%。按照抽水蓄能电站 1 年运行 329 d, 通过式(18) 计算得出 2016—2020 年黄河流域九省区废弃煤矿抽水蓄能电站每年发电总量约为 3.78×10^9 kW·h(图 7), 根据抽水蓄能电站电能消耗与发电量之比约 4 : 3, 则每年可消纳电能 5.04×10^9 kW·h。

按照 2021 年全国平均标准煤耗为 302.5 g/(kW·h) 计算, 2016—2020 黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站全年发电量相当于节约了 114.3 万 t 标准煤。2021 年, 黄河流域九省区累计弃风电量为 123.5 亿 kW·h, 弃光电量为 54 亿 kW·h, 总计 177.5 亿 kW·h, 如果利用这些废弃煤矿建设抽水蓄能电站可满足流域内 28.4% 的弃风、弃光电量的消纳需求。统计 2021 年黄河流域九省区峰谷电价差数据(表 9), 选用各地区峰谷电价

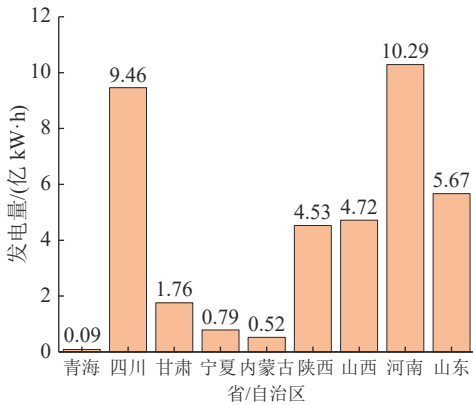


图 7 2016—2020 黄河流域九省区废弃煤矿抽水蓄能发电量

Fig.7 Power generation of pumped storage power plant using abandoned coal mines in nine provinces of Yellow River Basin

差平均值与废弃矿井抽水蓄能发电量计算, 求得 2016—2020 黄河流域废弃煤矿抽水蓄能电站的直接经济效益约达 21.2 亿元/年。

表 9 2021 年黄河流域九省区峰谷电价差统计数据
Table 9 Statistical data of peak-to-valley electricity price difference in nine provinces of Yellow River Basin in 2021

地区	一般工商业峰谷价差/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)			大工业峰谷价差/(元·kW ⁻¹ ·h ⁻¹)			
	<1 kV	1~10(20) kV	≥35 kV	1~10(20) kV	35 kV	110 kV	220 kV
青海	0.444 6	0.438 4	0.398 8	0.424 2	0.411 6	0.399 0	0.390 4
四川	0.615 2	0.602 2	0.589 2	0.540 2	0.520 2	0.498 2	0.475 2
甘肃	0.581 4	0.571 4	0.561 4	0.438 3	0.428 3	0.418 3	0.409 3
宁夏	0.407 6	0.391 6	0.375 6	0.318 8	0.294 8	0.278 8	0.262 8
内蒙古东部	0.717 1	0.680 0	0.594 3	0.492 1	0.485 1	0.445 7	0.422 7
内蒙古西部	0.217 9	0.217 9	0.217 9	0.217 9	0.217 9	0.217 9	0.217 9
陕西榆林	0.564 7	0.544 7	0.524 7	0.530 7	0.511 8	0.486 6	0.486 6
陕西其他	0.577 4	0.557 4	0.537 4	0.633 4	0.608 2	0.583 0	0.576 8
山西	0.455 1	0.435 8	0.421 3	0.438 7	0.409 8	0.385 6	0.366 3
河南	0.624 5	0.596 0	0.566 4	0.622 4	0.606 3	0.590 3	0.581 7
山东	0.744 5	0.728 1	0.711 6	0.735 7	0.717 7	0.699 7	0.681 7

7 结论

a. 提出黄河流域九省区废弃矿井抽水蓄能电站建设的半地下式、全地下式 2 种模式, 并建立抽水蓄能电站选址决策指标体系, 包含 6 个一级指标、24 个二级指标, 其中, 巷道空间体积、上下水库水位差、巷道围岩稳定性、巷道围岩渗透率、地下水循环特征是影响选址的重要因素。

b. 开展了黄河流域某矿改建抽水蓄能电站的实例分析, 计算出矿山可选择机组装机容量为 5 000 kW, 年发电量可达 7.47×10^6 kW·h, 发电效率可达到 75.7%, 对废弃矿井抽水蓄能电站的可行性具有一定的参考价值与指导意义。

c. 统计出黄河流域九省区 2016—2020 年能源消耗与关闭煤矿情况, 据此计算出有效利用井巷空间约 4.7×10^7 m³, 通过统计学分析计算出黄河流域九省区 5 年来废弃矿井抽水蓄能电站可利用井巷空间为 1.34×10^7 m³, 进而预估利用其建设抽水蓄能电站每年可发电 3.78×10^9 kW·h, 可满足黄河流域九省区 28.4% 的弃风、弃光电量的消纳需求, 每年直接经济效益约达 21.2 亿元。

参考文献(References)

- [1] 习近平. 在第七十五届联合国大会一般性辩论上的讲话[R]. 北京: 中华人民共和国国务院, 2020.
- [2] IEA. Global CO₂ emissions rebounded to their highest level in history in 2021[EB/OL]. (2022-03-08) [2022-06-03]. [https://www.iea.org/news/global-CO₂-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021](https://www.iea.org/news/global-CO2-emissions-rebounded-to-their-highest-level-in-history-in-2021).
- [3] 张智刚, 康重庆. 碳中和目标下构建新型电力系统的挑战与展望[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(8): 2806–2818.
ZHANG Zhigang, KANG Chongqing. Challenges and prospects for constructing the new-type power system towards a Carbon Neutrality future[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(8): 2806–2818.
- [4] 舒印彪, 张丽英, 张运洲, 等. 我国电力碳达峰、碳中和路径研究[J]. 中国工程科学, 2021, 23(6): 1–14.
SHU Yinbiao, ZHANG Liying, ZHANG Yunzhou, et al. Carbon Peak and Carbon Neutrality path for China's power industry[J]. Strategic Study of CAE, 2021, 23(6): 1–14.
- [5] 黎博, 陈民铀, 钟海旺, 等. 高比例可再生能源新型电力系统长期规划综述[J/OL]. 中国电机工程学报, 2022: 1–27 [22-06-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.
LI Bo, CHEN Minyou, ZHONG Haiwang, et al. A review of long-term planning of new power systems with large share of renewable energy[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2022: 1–27 [2022-06-03]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.212716>.
- [6] 郭志忠, 叶瑞丽, 刘瑞叶, 等. 含抽水蓄能电站的可再生能源电网优化调度策略[J]. 电力自动化设备, 2018, 38(3): 7–15.
GUO Zhizhong, YE Ruili, LIU Ruiye, et al. Optimal scheduling strategy for renewable energy system with pumped storage station[J]. Electric Power Automation Equipment, 2018, 38(3): 7–15.
- [7] 刘钦节, 王金江, 杨科, 等. 关闭/废弃矿井地下空间资源精准开发利用模式研究[J]. 煤田地质与勘探, 2021, 49(4): 71–78.
LIU Qinjie, WANG Jinjiang, YANG Ke, et al. Research on the model of accurate exploitation and utilization of underground space resources in closed/abandoned mines[J]. Coal Geology & Exploration, 2021, 49(4): 71–78.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 罗魁, 石文辉, 曹飞, 等. 利用废弃矿洞建设抽水蓄能电站初探[J]. 中国能源, 2018, 40(10): 42–47.
LUO Kui, SHI Wenhui, CAO Fei, et al. Preliminary study on construction of pumped storage power station by using abandoned mines[J]. Energy of China, 2018, 40(10): 42–47.
- [11] 刘峰, 李树志. 我国转型煤矿井下空间资源开发利用新方向探讨[J]. 煤炭学报, 2017, 42(9): 2205–2213.
LIU Feng, LI Shuzhi. Discussion on the new development and utilization of underground space resources of transitional coal mines[J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(9): 2205–2213.
- [12] FESSENDEN R A. System of storing power: US1247520[P]. 1917-11-20.
- [13] WILLETT D C. Underground pumped storage research priorities: Technical planning study[M]. Palo Alto: Electric Power Research Institute, 1976.
- [14] TAM S W, BLOMQUIOT C A, KARTSOUNES G T. Underground pumped hydro storage: An overview[R]. Chicago: Harza Engineering Company, 1977.
- [15] CHARLES T. Underground hydroelectric pumped storage: An evaluation of the concept[M]. Boston: Main, 1978.
- [16] HARZA R D. Hydro and pumped storage for peaking[J]. Power Engineering, 1960, 64(10): 79–82.
- [17] CHIU H H, RODGERS L W, SALEEM Z A, et al. Mechanical energy storage systems: Compressed air and underground pumped hydro[J]. Journal of Energy, 1979, 3(3): 131–139.
- [18] SEIWALD S. Erweiterung Kraftwerk Naßfeld-Erhöhung Bockhartseedamm[J]. Österreichische Wasser- und Abfallwirtschaft, 2007, 59(7): 91–97.
- [19] NIEMANN A, BALMES J P, SCHREIBER U, et al. Proposed underground pumped hydro storage power plant at Prosper-Haniel Colliery in Bottrop-State of play and prospects[J]. Mining Report Glückauf, 2018, 154(3): 214–223.

- [20] WINDE F, KAISER F, ERASMUS E. Exploring the use of deep level gold mines in South Africa for underground pumped hydro-electric energy storage schemes[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 78: 668–682.
- [21] MONTERO R A, WORTBERG T, BINIAS J, et al. Integrated assessment of underground pumped-storage facilities using existing coal mine infrastructure[C]. London: Taylor & Francis Group, 2016.
- [22] WESSEL M, MADLENER R, HILGERS C. Economic feasibility of semi-underground pumped storage hydropower plants in open-pit mines[J]. *Energies*, 2020, 13(16): 4178.
- [23] 许雨喆. 基于废弃矿井的抽水蓄能电站设计[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2019.
XU Yuzhe. Design of pumped storage power station based on abandoned mines[D]. Huainan: Anhui University of Science and Technology, 2019.
- [24] 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.
- [25] 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.
- [26] 顾大钊. 能源“金三角”煤炭现代开采水资源及地表生态保护技术[J]. 中国工程科学, 2013, 15(4): 102–107.
GU Dazhao. Water resource and surface ecology protection technology of modern coal mining in China's energy “Golden Triangle” [J]. *Strategic Study of CAE*, 2013, 15(4): 102–107.
- [27] 浦海, 许军策, 卞正富, 等. 关闭/废弃矿井地热能开发利用研究现状与进展[J]. 煤炭学报, 2022, 47(6): 2243–2269.
PU Hai, XU Junce, BIAN Zhengfu, et al. Research status and progress of geothermal energy development and utilization from closed/abandoned coal mines[J]. *Journal of China Coal Society*, 2022, 47(6): 2243–2269.
- [28] LIU Qin, SUN Yajun, XU Zhimin, et al. Assessment of abandoned coal mines as urban reservoirs[J]. *Mine Water and the Environment*, 2019, 38(2): 215–225.
- [29] MENENDEZ J, SCHMIDT F, KONIETZKY H, et al. Stability analysis of the underground infrastructure for pumped storage hydropower plants in closed coal mines[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, 94: 103117.
- [30] MENENDEZ J, FERNANDEZ-ORO J M, GALDO M, et al. Pumped-storage hydropower plants with underground reservoir: Influence of air pressure on the efficiency of the Francis turbine and energy production[J]. *Renewable Energy*, 2019, 143: 1427–1438.
- [31] KITSIKOUDIS V, ARCHAMBEAU P, DEWALS B, et al. Underground pumped-storage hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Underground reservoir hydraulics[J]. *Energies*, 2020, 13(14): 3512.
- [32] PUJADES E, ORBAN P, ARCHAMBEAU P, et al. Underground pumped-storage hydropower (UPSH) at the Martelange Mine (Belgium): Interactions with groundwater flow[J]. *Energies*, 2020, 13(9): 2353.
- [33] FAN Jinyang, XIE Heping, CHEN Jie, et al. Preliminary feasibility analysis of a hybrid pumped-hydro energy storage system using abandoned coal mine goafs[J]. *Applied Energy*, 2020, 258: 114007.
- [34] PUJADES E, POULAIN A, ORBAN P, et al. The impact of hydrogeological features on the performance of Underground Pumped-Storage Hydropower (UPSH)[J]. *Applied Sciences*, 2021, 11(4): 1760.
- [35] 王兵, 刘朋帅, 邓凯磊. 基于模糊多准则决策模型的废弃矿井抽水蓄能电站选址研究[J]. 矿业科学学报, 2021, 6(6): 667–677.
WANG Bing, LIU Pengshuai, DENG Kailei. Site selection of pumped storage power station in abandoned mines: Results from fuzzy-based multi criteria decision model[J]. *Journal of Mining Science and Technology*, 2021, 6(6): 667–677.
- [36] YONG Xingkai, CHEN Wenjun, WU Yunna, et al. A two-stage framework for site selection of underground pumped storage power stations using abandoned coal mines based on multi-criteria decision-making method: An empirical study in China[J]. *Energy Conversion and Management*, 2022, 260: 115608.
- [37] XUE Jingguo, HOU Xueliang, ZHOU Jianli, et al. Obstacle identification for the development of pumped hydro storage using abandoned mines: A novel multi-stage analysis framework[J]. *Journal of Energy Storage*, 2022, 48: 104022.
- [38] 杨立滨, 冯冀, 乔梁, 等. 基于层次分析法与劳瑞模型的光伏电站综合效益评估[J]. 电力系统及其自动化学报, 2018, 30(11): 120–125.
YANG Libin, FENG Ji, QIAO Liang, et al. Comprehensive benefit evaluation of PV power station based on AHP and Lowry Model[J]. *Proceedings of the CSU-EPSA*, 2018, 30(11): 120–125.
- [39] 商大成. 毕节地区利用废弃煤矿地下空间建设抽水蓄能电站的研究[D]. 贵阳: 贵州大学, 2021.
SHANG Dacheng. Study on construction of pumped storage power station by using underground space of waste coal mine in Bijie area[D]. Guiyang: Guizhou University, 2021.
- [40] 卢开放, 侯正猛, 孙伟, 等. 云南省矿井抽水蓄能电站潜力评估与建设关键技术[J]. 工程科学与技术, 2022, 54(1): 136–144.
LU Kaifang, HOU Zhengmeng, SUN Wei, et al. Potential evaluation and construction key technologies of pumped-storage power stations in mines of Yunnan Province[J]. *Advanced Engineering Sciences*, 2022, 54(1): 136–144.
- [41] 夏连宁. 关于输水管道水力计算公式选用的探讨[J]. 给水排水, 2020, 46(4): 139–143.
XIA Lianning. Discussion on section of water head loss calculation formulas[J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2020, 46(4): 139–143.
- [42] 韩杨, 张小珩, 汪胜和, 等. 废弃矿井抽水蓄能多场景利用可行性及技术经济研究[J]. 现代商贸工业, 2020, 41(11): 210–213.
HAN Yang, ZHANG Xiaoheng, WANG Shenghe, et al. Feasibil-

- ity and technical and economic research on multi-scenario utilization of pumped storage in waste mine[J]. *Modern Business Trade Industry*, 2020, 41(11): 210–213.
- [43] 王昊婧. 新形势下我国抽水蓄能电站运营效益评价方法研究[D]. 北京: 华北电力大学, 2016.
- WANG Haojing. Pumped-storage power station operation efficiency evaluation method[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2016.
- [44] 曹飞, 王婷婷, 唐修波. 利用废弃矿井建设抽水蓄能电站的效益探讨[C]//抽水蓄能电站工程建设文集(2020). 北京: 中国水利水电出版社, 2020.
- [45] 高瑾瑾, 郑源, 李润鸣. 基于改进序关系分析法的抽水蓄能电站经济效益综合评价[J]. *长江科学院院报*, 2018, 35(4): 137–142.
- GAO Jinjin, ZHENG Yuan, LI Jianming. Comprehensive evaluation of economic benefits of pumped storage power plants by improved order relation analysis method[J]. *Journal of Yangtze River Scientific Research Institute*, 2018, 35(4): 137–142.
- [46] 郗富瑞, 张进德, 王延宇, 等. 中国废弃矿山地下抽水蓄能电站技术要点与可行性分析[J]. *科技导报*, 2020, 38(11): 41–50.
- XI Furui, ZHANG Jinde, WANG Yanyu, et al. Technical key points and feasibility analysis of underground pumped storage power station in built abandoned mines in China[J]. *Science & Technology Review*, 2020, 38(11): 41–50.
- [47] 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.
- [48] SHANG Dacheng, PEI Peng. Analysis of influencing factors of modification potential of abandoned coal mine into pumped storage power station[J]. *Journal of Energy Resources Technology*, 2021, 143(11): 112003.
- [49] 张保生, 陈宁, 高博, 等. 废弃矿井抽水蓄能电站水泵水轮机关键技术[J]. *科技导报*, 2021, 39(13): 66–72.
- ZHANG Baosheng, CHEN Ning, GAO Bo, et al. Key technologies of pump-turbine in underground pumped storage station using abandoned mine[J]. *Science & Technology Review*, 2021, 39(13): 66–72.

(责任编辑 范章群)