

DOI: 10.19666/j.rlfid.202206108

西藏地热能开发利用现状及发展前景

赵斌¹, 吕玥¹, 温柔¹, 龚宇烈², 王善民³

(1.长沙理工大学能源与动力工程学院, 湖南 长沙 410114;

2.中国科学院广州能源研究所, 广东 广州 510640;

3.西藏地热产业协会, 西藏 拉萨 850000)

[摘要] 西藏地处青藏高原腹地, 海拔4 000 m以上的地区占全区总面积的85%, 地热资源非常丰富。为实现地热资源的合理开采, 结合国家“双碳”战略, 对西藏地热资源的开发利用现状进行了全面梳理, 提出了地热产业未来发展的建议。分析表明: 西藏水热型和干热岩型地热资源存储量大、品质好, 发电潜力巨大, 而浅层地热资源主要分布在拉萨, 可结合热泵技术为当地供暖。目前在地质勘查、技术改进、装备研发、运营管理等方面仍存在一些问題, 需开展有机朗肯循环机组研发、搭建增强型地热系统实验平台, 科学地开发深层地热能。研究表明: 西藏地热资源开发利用应遵循“勘测为基、发电为主、供暖为辅、装备提升、梯级利用”的原则, 推进地热资源的科学开采和高效利用, 完善地热产业链, 从而有效改善西藏地区能源消费结构。

[关键词] 西藏; 地热资源; 典型案例; 五步原则; 发展前景

[引用本文格式] 赵斌, 吕玥, 温柔, 等. 西藏地热能开发利用现状及发展前景[J]. 热力发电, 2023, 52(1): 1-6. ZHAO Bin, LYU Yue, WEN Rou, et al. Utilization situation and development prospect of geothermal energy in Tibet[J]. Thermal Power Generation, 2023, 52(1): 1-6.

Utilization situation and development prospect of geothermal energy in Tibet

ZHAO Bin¹, LYU Yue¹, WEN Rou¹, GONG Yulie², WANG Shanmin³

(1. College of Energy and Power Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China;

2. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510640, China;

3. Tibet Geothermal Industry Association, Lhasa 850000, China)

Abstract: Tibet is located in the hinterland of the Qinghai-Tibet Plateau, the area above 4 000 m accounts for 85% of the total area of the region, its geothermal resources are very rich. To realize the reasonable exploitation of geothermal resources, combined with the carbon peaking and carbon neutrality strategy, the current situation of the development and utilization of geothermal resources in Tibet is comprehensively combed, and the suggestions for the future development of the geothermal industry are put forward. The analysis shows that the geothermal resources of hydrothermal and dry hot rock in Tibet have large storage capacity, good quality, and excellent power generation potential. The shallow geothermal resources are mainly distributed in Lhasa, which can be combined with heat pump technology for local heating. At present, there are still some problems in geological exploration, technical improvement, equipment development, and operation management. It is necessary to develop ORC units, build EGS experimental platform, and scientifically develop deep geothermal energy. The research shows that the development and utilization of geothermal resources in Tibet should follow the principles of “survey-based, power generation-based, heating-assisted, equipment upgrading, and cascade utilization”, promote the scientific exploitation and efficient utilization of geothermal resources, improve the geothermal industry chain, and effectively improve the energy consumption structure in Tibet.

Key words: Tibet; geothermal resources; typical case; “Five-step” principle; development prospect

地热能具有资源潜力大、无环境污染、不受气候影响、可就地持续利用等优势, 是重要的可再生

能源之一。与风能、光能等其他可再生能源相比, 地热能具有能量形式稳定、利用率高等特点, 在现

收稿日期: 2022-06-12 网络首发日期: 2022-12-15

基金项目: 广州市基础研究计划(202102020301)

Supported by: Guangzhou Basic Research Program (202102020301)

第一作者简介: 赵斌(1968), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为新能源科学技术及应用, zhaobin19680507@163.com。

今低碳能源利用环境下具有较大的优势。地热资源的合理利用可有效缓解化石能源短缺问题,为实现能源转型作出重要贡献^[1-3]。中国是世界上地热资源储量较大的国家之一,其地热资源约占全球总储量的7.9%,且分布广泛。

2021年国家能源局出台的《关于促进地热能开发利用的若干条意见》中,对地热发电、供暖等方面做出规划,并提出到2035年全国地热能发电装机容量以及地热能供暖(制冷)面积将比2025年增加1倍。西藏地区地热资源的储存量和资源开发利用潜力大,加大对地热资源开发利用是西藏地区能源结构性调控的主要手段,并成为了西藏地区资源发展热点和重点。随着能源可持续发展观念和“双碳”战略目标的提出,加快西藏地区地热资源科学开发利用具有重要战略意义^[4]。

1 西藏地热资源概况

西藏位于地中海喜马拉雅地热带,地热资源品质较高且储量丰富,是全球四大地热富集区之一,特别是新生代的断裂构造是构成水热活动的良好通道。根据中国地质调查局编制《中国地热志(西南卷三)》中所述,西藏地热田主要为构造裂隙型热储,热储岩性为花岗岩。按照埋存深度和温度等级,将地热资源分为水热型地热资源、浅层地热资源和干热岩型地热资源。

西藏是我国水热型地热资源蕴藏最丰富、利用价值最高的地区之一。根据行政区域和地热资源分布特征,将西藏隆起山地对流型地热资源分为藏南高温水热活动区(I)、藏中中温水热活动区(II)、藏北低温水热活动区(III)和藏东低-中温水热活动区(IV)4个区域^[5]。水热活动区(点)累计多达672处。针对其中279处水热活动区的调查结果显示,全区水热型地热系统资源总量为 3.2×10^{20} J,折合标准煤108亿t;年可采资源量为 2×10^{19} J,折合标准煤6.5亿t。其中,中低温(低于150℃)水热系统积存热量为 1.75×10^{20} J,折合标准煤59.9亿t;年可开采量为 1.1×10^{19} J,折合标准煤3.6亿t。高温(高于150℃)水热活动区有34处^[6],初步估算地热发电潜力约为2900 MW。

据中国地质调查局勘测结果显示,拉萨为浅层地热资源开发较适宜区。目前拉萨浅层地热能供暖系统主要为地源热泵系统,利用浅层土壤的传热和蓄能特性,结合热泵技术,将低品位能量转换为高品位能量,为武警部队及解放军营房建筑物供暖^[7]。

西藏是中国干热岩资源最为丰富的地区之一。据2013年统计,全区基础温度高于150℃、地表热流体温度高于沸点的显示区22处,在此基础上计算埋深3~5 km段干热岩积存热量为 1.7×10^{20} J,折合标准煤为59亿t,发电潜力约为2100 MW^[5,8]。

2 西藏地热资源开发利用现状

2.1 开发利用现状

西藏是我国少数拥有完整地热产业的地区,其地热资源开发利用形式分为地热发电和地热直接利用。

1) 地热发电 自20世纪70年代起,已在西藏羊八井、那曲、朗久、羊易等多地建设了中高温地热发电站^[9],累计装机容量47.18 MW,而目前仅羊易地热电站运行。

2) 地热直接利用 西藏地热的直接利用可以分为浅层地热能供暖、水热型地热供暖、种养殖与康养、矿泉水^[10]及相关矿产开发等。目前,西藏利用地热水开展养殖和种植的面积分别为742万m²和0.11亿m²;工业利用年开采地热流体0.22亿m³;用于洗浴疗养的地热流体开采量年约17.5亿m³。拉萨市公用建筑采取浅层地热供暖,累计供暖面积超过21.6万m²^[11]。

2.2 现存主要问题

西藏地热资源潜力大但开发利用程度低,地热产业发展缓慢,其主要存在以下3方面问题。

1) 地热资源评价及开发规划不完善制约了地热产业的发展。西藏地区目前存在地热勘探投入少、开发技术与管理人员不足的问题^[12]。现探明储量、技术可采储量和经济可采储量还处于估算阶段,地热资源赋存规律及分布特征等与生产密切相关的问题仍没有得到解决,影响了西藏地热产业的规模化发展。需做好地热资源勘查、潜力评价、开发规划,为地热持续开发提供保障。

2) 地热电站运行中存在的技术问题是影响其可持续性发展的关键问题。随着地热田不断开采,地热流体参数发生变化,羊八井、朗久、那曲等地热电站(设备)均存在不同程度的结垢、腐蚀等问题^[13-16],使地热电站热力系统和热控系统安全性下降,运行成本增加。但西藏大多数地热田为构造裂隙型热储,热储大多数是岩浆岩,地质构造条件比较适宜实施尾水回灌。目前,在羊易地热电站发电尾水已实现了100%回灌。羊八井地热电站北

区火山岩裂隙型热储尾水回灌取得一定进展,但南区砂砾岩型热储回灌仍需进一步研究^[17]。

3) 成套地热装备国产化进程亟待推进。近年来,部分企业已开展地热装备的研发与生产,如东方汽轮机有限公司研发的 300 kW 有机朗肯循环 (organic Rankine cycle, ORC) 试验电站已投入运行^[18]。然而,部分设备关键技术仍有待于突破,如地源热泵的关键部件高压压缩机目前仍依靠进口,增加了地热利用成本。突破成套地热装备生产过程中的关键技术问题,降低现有地热项目投资成本和运营成本,带动相关产业升级,实现成套地热中高温发电装备的国产化、系列化及标准化,是西藏地区未来地热规模化发展的基础。

此外,西藏地热开发利用相关政策的缺失,特别是地热发电上网电价政策和地热供暖财政补贴政策,严重制约了西藏中高温地热发电的发展。西藏地质构造复杂导致西藏中高温地热田钻井成本较高,在缺少地热开发示范项目的背景下,定向井钻井技术和中高温地热田优快钻井技术缺少工程实践经验。基于上述情况,需从资源勘查、技术改进、装备研发、运营管理等各环节完善地热利用的产业链,实现西藏地区地热资源科学开发和高效利用。

2.3 应用研究进展

针对西藏高寒高海拔地区气候特征,除了适用于中低温地热田的单级闪蒸和单级 ORC 发电系统,现已开发适用于高温地热资源的两级闪蒸和闪蒸-ORC 技术。闪蒸和双工质循环联合地热发电,是由闪蒸器中生成的水蒸气直接进行发电,而生成的饱和水则加热低沸点有机工质使其变为蒸汽推动汽轮机发电,其最大功率比单一工质系统的最大功率提高 20%^[19]。为改变 ORC 系统输入热量分配特性,将蒸发器出口工质改变为两相状态,集成了闪蒸系统和 ORC 系统的优点,提出了有机朗肯-闪蒸循环 (binary-flashing cycle, BFC) 发电系统^[20]。相对于 ORC 系统, BFC 发电系统仅增加了闪蒸器和工质泵,同时利用有机工质的两级膨胀做功提升系统的发电能力,还可以通过控制蒸发器出口有机工质的干度实现系统的变工况稳定运行,从而实现了地热资源的充分利用^[21]。这一技术的开发为西藏地区发展建设高温地热电站提供了技术支撑。

我国干热岩勘查研究工作虽起步较晚,在青海共和盆地等地开展了初步的干热岩调查和评价工作。现已证实,藏南地区存在深部热储,具有搭建

增强型地热系统 (enhanced geothermal system, EGS) 实验平台和科学开发深层地热能的前景^[22]。滇藏高温地热带的热储层主要为花岗岩,目前存在水力压裂形成的裂缝扩展具有差异性和不确定性的问题。由于天然裂缝的存在,增加了裂缝扩展和水力连通道道的复杂性,可能导致开采井的回收效率降低。启动 EGS 示范区建设,以示范项目的点带动高质量地热能开发利用的面规模化发展,并结合中高温 EGS 开发示范支撑剂、辅助酸化、分层(段)压裂等技术,分析温度降低和诱发地震的资源 and 环境影响,可为实现干热岩经济性可持续开发利用提供技术保障。

现在地热回灌已经被地热界普遍接受,因 90% 以上的热能储存在热储的岩石骨架中,只有少量热能储存在地热水中,需通过维持热储水位来稳定地热田的开采条件。在各种规模地热水开发-回灌系统工程中,因地理条件等差异,回灌系统之间存在着独特性,但热储相同的系统之间仍存在着许多共同点^[23]。西藏大多数地热田属性、热储岩性和地质构造条件比较适宜实施尾水回灌,回灌的技术难度较中东部地区砂岩热储小。

3 西藏地热利用典型案例

3.1 羊八井地热综合利用

1977 年羊八井建设了我国第一个利用水热型地热资源的试验电站。所在地海拔为 4 300 m,具有严寒、高地震烈度的特点。地热蒸汽温度为 137 °C,压力为 0.3~0.5 MPa,地热发电运行参数和热效率低,但由于不消耗燃料,运行成本较低。

羊八井地热电站 3 期 9 台汽轮发电机组总装机容量为 25.18 MW (其中包含 1985 年停运的 1 号试验机组); 1993 年,最高发电量占拉萨电网的 63.45%; 次年,装机容量占拉萨电网的 40.94%,极大地缓解了当时拉萨用电紧张状况,改善了藏中电网电源结构,是世界上首座利用第四系浅层热储进行发电的电站,被称为“世界屋脊明珠”。西藏地热产业协会调查的数据显示,羊八井地热电站截至 2020 年 9 月累计发电量达 33.9 亿 kW·h,其 9 台汽轮发电机组发电量以及机组年利用小时数见表 1。

羊八井地热电站所用设备中有 88% 为国产设备。经过 40 余年的生产运行,羊八井电站在建设、运行及成套装备的开发设计方面都积累了大量的经验,对西藏及全国地热能开发利用都有着示范指导作用。

表 1 羊八井地热汽轮机发电机组运行数据
Tab.1 Operation data of Yangbajing geothermal turbine generator set

机组	容量/ MW	年运行小时 ^① /h	累计发电量 ^② /(万 kW·h)	发电 技术
1 号	1.00		1 067.15	
2 号	3.00	7 955	50 052.36	单级 闪蒸
3 号	3.00	8 067	55 377.62	
4 号	3.00	8 688	34 205.82	
5 号	3.18	6 551	26 396.94	
6 号	3.00	8 731	42 692.25	两级 闪蒸
7 号	3.00	8 016	42 438.24	
8 号	3.00	8 595	45 915.39	
9 号	3.00	8 535	40 893.98	

①: 2013 年 12 月至 2014 年 12 月; ②: 1977 年 10 月至 2020 年 9 月。

羊八井地热电站有着较高的旅游开发利用价值。当雄县羊八井镇和宁中乡已经开发了地热旅游项目,羊八井镇利用羊八井地热电站的尾水开展种养殖,推动了当地旅游产业和特色农业的发展。羊八井地热资源的综合开发利用,在促进当地经济发展方面发挥着重要作用。

3.2 羊易地热发电

羊易地热田是我国大陆目前探明的温度最高的地热田之一,其热储面积为 11.3 km²,盖层以第四系黏土岩为主,热储以火成岩基岩裂隙型为主,地热田天然热流量为 215.35 MJ/s。采用热储法计算高温地热资源区发电容量,按 30 年计为 18 MW;中、低温地热资源区发电容量按 100 年计分别为 26.7 MW 和 19.3 MW。热储最高温度为 207.0 °C,平均温度为 155.1 °C,初步估算其发电潜力超过 100.0 MW。羊易地热田深部发育岩浆囊,该区是我国大陆地区资源储量最大、温度最高、补给条件最好的高温地热田,也是开展 EGS 示范工程的有利地区。

2018 年羊易地热电站引进的奥玛特公司生产的 16 MW ORC 双工质(其中有机工质为异戊烷 C₅H₁₂)机组正式并网发电。由西藏地热产业协会调查的羊易地热电站机组 2019—2021 年运行参数见表 2。羊易地热电站是我国首个实现 100%回灌的地热电站,同时也是目前世界上海拔最高、国内单机容量最大的地热电站。该电站是中国地热能开发与利用技术的重大突破,可为未来高海拔、高压低氧环境下高参数地热电站的建设提供借鉴。

3.3 当雄县地热供暖

西藏地区化石能源匮乏,生态环境脆弱,地热供暖作为清洁供暖方式,可满足西藏迫切供暖需

求。当雄县政府曾采用“水源热泵+电辅助”供暖方式,但运行费用高且稳定性差。自 2018 年起,拉萨当雄县地热供暖工程分 2 期建设(表 3),在当雄县第一中学供暖采用了分时分区的供暖方式,实现了白天为学校教室供暖、晚上为宿舍供暖,且温度可达 18 °C 以上。截至 2020 年当雄县供暖面积累计达到 16 万 m²,年可节约 1.8 万 t 标准煤,减少 CO₂ 排放约 4.7 万 t。

表 2 羊易地热电站机组运行数据
Tab.2 Operation data of Yangyi geothermal power station

项目	2019 年	2020 年	2021 年
运行小时/h	6 820.64	8 398.52	8 795.37
平均负荷/MW	14.9	15.1	14.9
ZK203 号井口压力/MPa	0.78	0.54	0.45
ZK208 号井口压力/MPa	0.89	0.86	0.75
ZK203 号井口温度/°C	165	156	152
ZK208 号井口温度/°C	179	170	161
发电量/(万 kW·h)	10 196	12 728	13 116
厂用电率/%	14.04	13.25	14.59
供电量/(万 kW·h)	8 764	11 041	11 202

表 3 当雄县地热供暖工程
Tab.3 Geothermal heating project in Dangxiong

地热供暖	1 期	2 期
供暖面积/万 m ²	3.69	12.49
换热站建筑面积/m ²	1 156.80	2 067.40
混水站建筑面积/m ²	69.96	210.00
一级热力管网长/m	3 200	15 050
二级热力管网长/m	1 000	26 850
地热热源井数	3	9
供热用户	第一中学	公用建筑

3.4 浅层地热多能互补利用

西藏电网丰枯矛盾十分突出,虽然全社会总用电量并不欠缺,但受水电丰枯影响,冬季有 40 万 kW 的负荷缺口。西藏水能、太阳能、风能和地热资源丰富,水利资源理论蕴藏量达 2 亿 kW,可开发利用 1.25 亿 kW,均居全国首位,已初步形成了以水电为主,太阳能、风能、地热等多能互补的综合能源体系,实现了主电网全覆盖 74 个县区。通过将地热能、太阳能、风能、水能等可再生能源及常规能源复合利用,以用户侧需求为导向,探索“源-荷-储”相结合的智慧能源网技术,并将能源动态调节技术进行系统集成,提高能源综合利用效率。提高电网的安全稳定运行,从西藏夏季外送和冬季回购的运行模式,转变为全年向东部发达地区输送清洁

能源电力,不但能增加地方经济收入,还能把资源优势转化为经济优势。

4 西藏地热资源开发利用前景

4.1 地热发电

西藏地区中高温地热资源丰富,其中高温地热资源状况见表 4。按中远期规划,西藏地热发电装机容量总容量可达 150 MW。现已钻探出地热田北区单井发电潜力为 12 MW 的深部勘探井,证实了羊八井北区深部存在高温热储层,能够实现单井发电超过 10 MW 的目标。

表 4 高温地热资源状况
Tab.4 Status of high temperature geothermal resources

地热田	温度/℃	用途
羊八井深部热储	>275	发电及综合利用
羊易二期	>200	发电及综合利用
古堆	>200	发电及综合利用
古露	>200	发电及综合利用
巴尔	>200	发电等
查布	>180	发电等
苦玛	>150	发电等
加隆	>150	发电等
曲普	>150	发电及综合利用
卡乌	>150	发电及综合利用
朗久	>150	发电及综合利用

4.2 地热直接利用

西藏地区供暖具有热负荷高、供暖时间长、居住分散等问题。根据西藏地区各县城的中低温地热资源分布及储量情况,地热供暖规划见表 5。推进地下水源热泵和地埋管热泵等地热供暖技术为居民住宅供暖。

表 5 西藏地热供暖规划 单位: 万 m²
Tab.5 Geothermal heating planning in Tibet

地区	“十四五”新增		2025 年累计	
	浅层地热能供暖面积	中深层地热能供暖面积	浅层地热能供暖面积	中深层地热能供暖面积
拉萨	10	100~150	31	104~154
日喀则	10	30~70	10	30~70
山南		30		56
林芝	10		10	
昌都		80~100		80~100
那曲		30~50		30~50
阿里		30~50		30~50
合计	30	300~450	51	330~480

据中国地质调查局 2018 年发布的数据,拉萨浅层地热能资源适宜发展地热供暖,采用地下水源热

泵可满足 72 万 m² 冬季供暖,采用地埋管热泵可满足 8.8 万 m² 冬季供暖。

利用地热电站的低温尾水为附近居民供暖,可实现地热发电、供暖、种养殖、康养全产业链运作,推进地热资源综合利用和梯级开发利用。

“十四五”期间,通过将太阳能、风能、水能等可再生能源与地热能复合利用,采用多能源组合供热的技术,推进稳定、高效、可持续的“地热+”多能互补的清洁供暖示范项目建设。

5 结论与展望

1) 西藏地区地热存储量大、水热型地热资源丰富,为有机朗肯循环和新型地热发电循环技术在西藏的应用提供了有力支撑。藏南地区已证实存在深部热储,可搭建增强型地热系统实验平台,科学地开发深层地热能。

2) 在西藏地区地热开发利用过程中存在的勘查投入不足和成套装备国产化低等问题,制约了西藏地热资源的开发与利用。科学地开发中高温地热资源,研发西藏地区适用的发电和回灌技术,是西藏地区未来地热开发利用的主要方向。

3) 西藏地热发电、供暖、农业与旅游业都已初具规模。羊八井地热综合利用、羊易地热发电和当雄县地热供暖等工程实践,在地热发电和供暖项目的建设、运行、成套装备研发生产等方面起到示范引领作用。

4) “十四五”期间,遵循“勘测为基、发电为主、供暖为辅、装备提升、梯级利用”的地热能利用原则,推进地热资源的科学勘探。开发羊易、羊八井等地区深部热储,研发适用于高原高寒地区的中高温热储高效发电技术,推广应用浅层地热供暖、尾水供暖等技术,发展温泉度假、水疗养生、矿物质养生等产业,有效改善西藏能源消费结构。

[参 考 文 献]

- [1] 赵小涛,付海英. 地热能开发利用现状与前景分析[J]. 环境与发展, 2019, 31(5): 233.
ZHAO Xiaotao, FU Haiying. Analysis of current status and prospects of geothermal energy development and utilization[J]. Environmental and Development, 2019, 31(5): 233.
- [2] 李健, 武江元, 杨震, 等. 地热发电技术及其关键影响因素综述[J]. 热力发电, 2022, 51(3): 1-8.
LI Jian, WU Jiangyuan, YANG Zhen, et al. Review of geothermal power generation technologies and key influencing factors[J]. Thermal Power Generation, 2022, 51(3): 1-8.

- [3] 庞忠和, 罗霁, 龚宇烈. 国内外地热产业发展现状与展望[J]. 中国核工业, 2017, 29(12): 47-50.
PANG Zhonghe, LUO Ji, GONG Yulie. Current situation and outlook of geothermal industry development at home and abroad[J]. China Nuclear Industry, 2017, 29(12): 47-50.
- [4] 黄嘉超, 梁海军, 谷雪曦. 中国地热能发展形势及“十四五”发展建议[J]. 世界石油工业, 2021, 28(2): 41-46.
HUANG Jiachao, LIANG Haijun, GU Xuexi. Development situation of geothermal energy in China and development proposals in the 14th Five-Year Plan period[J]. World Petroleum Industry, 2021, 28(2): 41-46.
- [5] 王贵玲. 中国地热志·西南卷三[M]. 北京: 科学出版社, 2018: 3-28.
WANG Guiling. China geothermal journal-southwest volume III[M]. Beijing: Science Press, 2018: 3-28.
- [6] 王贵玲, 张薇, 梁继运, 等. 中国地热资源潜力评价[J]. 地球学报, 2017, 38(4):449-459.
WANG Guiling, ZHANG Wei, LIANG Jiyun, et al. Evaluation of geothermal resources potential in China[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2017, 38 (4): 449-459.
- [7] 戎向阳, 闵晓丹, 司鹏飞, 等. 拉萨市供暖技术的适宜性分析[J]. 暖通空调, 2013, 43(6): 23-30.
RONG Xiangyang, MIN Xiaodan, SI Pengfei, et al. Suitability analysis for Lhasa heating techniques[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2013, 43(6): 23-30.
- [8] 蔺文静, 王贵玲, 邵景力, 等. 我国干热岩资源分布及勘探: 进展与启示[J]. 地质学报, 2021, 95(5): 1366-1381.
LIN Wenjing, WANG Guiling, SHAO Jingli, et al. Distribution and exploration of hot dry rock resources in China: progress and inspiration[J]. Acta Geologica Sinica, 2021, 95(5): 1366-1381.
- [9] 王绍亭, 陈新民. 西藏地热资源及地热发电的现状与发展[J]. 中国电力, 1999, 44(10): 81-83.
WANG Shaoting, CHEN Xinmin. Present status and development of geothermal power generation and geothermal resources in Xizang[J]. Electric Power, 1999, 44(10):81-83.
- [10] 杨淼. 新时代西藏天然饮用水产业高质量发展研究[J]. 西藏民族大学学报, 2020, 41(3): 93-97.
YANG Miao. Research on high-quality development of natural drinking water industry in Tibet in the new era [J]. Journal of Xizang Minzu University, 2020, 41(3): 93-97.
- [11] 王社教, 康润林, 冯学坤, 等. 基于地热供暖项目经济评价的热泵调峰占比优化方法[J]. 天然气工业, 2021, 41(9): 152-159.
WANG Shejiao, KANG Runlin, FENG Xuekun, et al. A optimization method of heat pump peak-shaving ratio based on economic evaluation of geothermal heating project[J]. Natural Gas Industry, 2021, 41(9): 152-159.
- [12] HU H S. Analysis and discussion on the research status of geological exploration and prospecting process in Tibet[J]. World Nonferrous Metals, 2021, 36(19): 66-67.
- [13] 周大吉. 西藏羊八井地热发电站的运行、问题及对策[J]. 电力建设, 2003, 46(10): 1-3.
ZHOU Daji. Operation problems and countermeasures of Yangbajing Geothermal Power Station in Tibet[J]. Electric Power Construction, 2003, 46(10): 1-3.
- [14] ALLEN A, MILENIC D. Low-enthalpy geothermal energy resources from groundwater in fluvio-glacial gravels of buried valleys[J]. Applied Energy, 2003, 74(112): 9-19.
- [15] 刘尚贤, 邓冠云. 那曲地热示范电站建成[J]. 四川电力技术, 1994, 17(1): 34.
LIU Shangxian, DENG Guangyun. Completion of geothermal demonstration power station in Nagqu[J]. Sichuan Electric Power Technology, 1994, 17(1): 34.
- [16] 伍坤宇, 沈立成, 王香桂, 等. 西藏朗久地热田及其温泉水化学特征研究[J]. 中国岩溶, 2011, 30(1):1-8.
WU Shenyu, SHEN Licheng, WANG Xianggui, et al. Study on hydrochemical features of hot springs in Langjiu geothermal field, Tibet, China[J]. Carsologica Sinica, 2011, 30(1): 1-8.
- [17] 曹倩, 方朝合, 李云, 等. 国内外地热回灌发展现状及启示[J]. 石油钻采工艺, 2021, 43(2): 203-211.
CAO Qian, FANG Chaohe, LI Yun, et al. Development status of geothermal reinjection at home and abroad and its enlightenment[J]. Oil Drilling & Production Technology, 2021, 43(2): 203-211.
- [18] 孙苗, 王蒲伟, 韦钰芳, 等. 300 kW 功率等级 ORC 发电机组试验系统搭建与性能测试[J]. 节能技术, 2019, 37(4): 350-355.
SUN Hui, WANG Puwei, WEI Yufang, et al. Test system construction and performance test of 300 kW ORC power generator set[J]. Energy Conservation Technology, 2019, 37(4): 350-355.
- [19] 罗珂, 骆超, 龚宇烈. 闪蒸-双工质联合发电系统热力学性能比较[J]. 化工进展, 2017, 36(4): 1521-1528.
LUO Ke, LUO Chao, GONG Yulie. Thermal performance comparison of flash-binary power system[J]. Chemical Industry and Engineering Progress, 2017, 36(4): 1521-1528.
- [20] WANG L, LI H S, BU X B. Multi-objective optimization of binary flashing cycle (BFC) driven by geothermal energy[J]. Apply Thermal Engineering, 2019, 166: 114693.
- [21] WANG L B, BU X B, LI H S. Investigation on geothermal binary-flashing cycle employing zeotropic mixtures as working fluids[J]. Geothermal Energy, 2019, 7(1): 36.
- [22] 张杰, 谢经轩. 多分支井增强型地热开发系统设计及产能评价[J]. 天然气工业, 2021, 41(3): 179-188.
ZHANG Jie, XIE Jingxuan. Design and productivity evaluation of multi-lateral well enhanced geothermal development system[J]. Natural Industry, 2021, 41(3): 179-188.
- [23] DIAR A R, KAYA E, ZARROUK S J. Reinjection in geothermal fields: a worldwide review update[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2016, 53: 105-162.

(责任编辑 杨嘉蕾)