

西藏高温地热资源分布特征与发电发展建议

周总瑛^{1,2}, 罗璐^{1,2}

¹中国石化集团新星石油公司, 北京

²国家地热能源开发利用研究及应用技术推广中心, 北京

收稿日期: 2022年1月9日; 录用日期: 2022年2月15日; 发布日期: 2022年2月22日

摘要

西藏高温地热资源主要受我国地质构造特点及其在全球构造中所处部位的控制, 集中分布在班公湖 - 怒江缝合带以南的藏南地区, 尤其在与雅鲁藏布江深大断裂相交接的NS向断陷盆地或裂谷, 资源潜力巨大。西藏地热发电产业处在起步阶段, 发电严重滞后, 装机容量规模偏小, 高温地热资源开发利用程度低。针对西藏地热发电利用存在的问题, 提出了三条促进地热发电产业发展建议: 建立多元化资金保障制度, 加大勘探投入, 开展高温地热资源的详查与评价; 加大核心技术研发, 实现关键技术重点突破; 尽快出台地热发电标杆上网电价政策, 促进地热发电健康发展。

关键词

高温地热资源, 分布, 地热发电, 发展建议

Distribution Characteristics of High-Temperature Geothermal Resources and Suggestions on Power Generation Development in Tibet

Zongying Zhou^{1,2}, Lu Luo^{1,2}

¹SINOPEC Star Petroleum Company, Beijing

²National Center for Geothermal Energy Research and Application Technology Promotion, Beijing

Received: Jan. 9th, 2022; accepted: Feb. 15th, 2022; published: Feb. 22nd, 2022

Abstract

High-temperature geothermal resources in Tibet are mainly controlled by the characteristics of

Chinese geological structures and their locations in the global structures, and are concentrated in southern Tibet, south of the Pangong Lake-Nu River suture zone, especially in the north-south direction fault basin or rift that intersects with the Yarlung Tsangpo River deep fault, the resource potential is great. The geothermal power industry in Tibet is in its initial stage, with serious lag in power generation, small installed capacity and low utilization of high-temperature geothermal resources. In view of the existing problems in the utilization of geothermal power generation in Tibet, this paper puts forward three suggestions for promoting the development of geothermal power generation industry: to establish a diversified fund guarantee system, increase exploration investment and carry out detailed survey and evaluation of high-temperature geothermal resources; to increase research and development of core technologies and make breakthroughs in key technologies; to put forward the geothermal power benchmark feed-in tariff policy to promote the healthy development of geothermal power generation.

Keywords

High-Temperature Geothermal Resources, Distribution, Geothermal Power Generation, Development Suggestion

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

地热能是一种绿色低碳、可循环利用的可再生能源。地热发电不但不排放污染物和温室气体,而且,与风能、太阳能等相比,地热能热源稳定,地热发电具有相对稳定的发电量与可靠性。大力发展地热发电,它对于未来清洁能源供应与节能减排有积极作用,受到了许多国家高度认同与重视。

全球高温地热资源基本上沿大地构造板块边缘的狭窄地带展布,形成了著名的四大环球地热带,即环太平洋地热带、地中海-喜马拉雅地热带、红海-亚丁湾-东非裂谷地热带和大西洋中脊地热带。其中,地中海-喜马拉雅地热带和环太平洋地热带贯穿为我国西南地区 and 东南沿海,我国高温地热资源分布主要集中在藏南-川西-滇西地区和台湾地区。

当前,全球已经有 26 个国家利用高温地热资源发电,2020 年全球地热发电累计装机容量达到 15,950 MW。但是,我国高温地热资源开发利用程度低,地热发电装机容量规模偏小。

西藏位于全球著名的地中海-喜马拉雅高温地热带上,高温地热资源丰富,发电潜力巨大,是实现我国“十四五”期间地热发电目标的最重要阵地。2021 年 9 月,国家能源局正式发布《关于促进地热能开发利用的若干意见》(以下简称《意见》),明确了我国“十四五”地热发电目标。《意见》指出,到 2025 年,在资源条件好的地区建设一批地热能发电示范项目,全国地热发电装机容量比 2020 年翻一番。

2. 西藏高温地热资源分布特征

2.1. 西藏高温地热地质背景

青藏高原北起阿尔金山和祁连山,南至喜马拉雅山,西到喀喇昆仑山,东抵横断山脉,面积约 $260 \times 104 \text{ km}^2$,海拔平均 4000 m 以上。青藏高原是由多个地块在不同地质时期拼贴而成的,地块的拼合是北部早、南部晚,自古生代依次向南迁移,直至始新世喜马拉雅地块拼合,高原才成为一个整体[1] [2] [3]。西藏地区主体地块由北向南依次为松潘-甘孜地块、羌塘地块、拉萨-冈底斯地块及喜马拉雅地块,地

块间的缝合带相应为昆仑南缘缝合带、金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带及雅鲁藏布江缝合带(见图 1)。各块体的主构造线方向大都接近 EW 向, 但班公湖-怒江缝合带以南至雅鲁藏布江缝合带以北之间的藏南地区, 其 NS 向的构造带极其发育, 形成时代相对较晚, 往往切穿 EW 向的深大断裂, 表现为纵横相切, 活动强烈。

西藏位于全球四大环球地热带之一的地中海-喜马拉雅地热带[4] [5], 该地热带位于欧亚、非洲及印度洋等板块碰撞的接合地带, 西起地中海北岸的意大利, 向东南经土耳其、巴基斯坦进入中国西藏阿里地区, 然后向东经雅鲁藏布江流域至怒江, 至昌都后折向东南, 延伸到川西、滇西腾冲。意大利的拉德瑞罗、土耳其的克孜勒代尔、中国西藏的羊八井、羊易、云南腾冲的热海等世界著名的地热田都分布在这一地热带上, 热储温度在 $150^{\circ}\text{C}\sim 200^{\circ}\text{C}$ 以上。

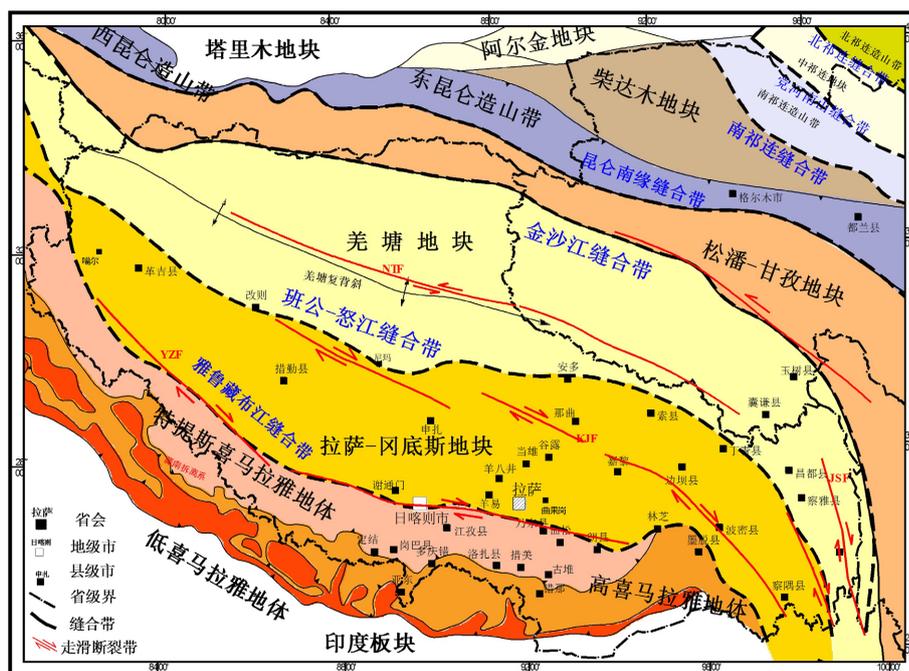


Figure 1. Division map of tectonic units in Tibet and its adjacent regions

图 1. 西藏及邻区构造单元划分图

印度板块向北飘移与欧亚板块发生碰撞, 并向其下部俯冲, 致使欧亚板块下部的边缘部分被加热熔融, 并沿上板片的构造薄弱地带上浮, 为形成青藏高原丰富多彩的地热活动提供了大地构造和热源条件[6], 西藏成为我国高温地热形成条件最为有利的地区。

在挤压背景下, 藏南地区发育许多东西向伸展的活动断裂带, 以近 SN 及 NNE-NE、NNW-NW 向的正断层为特征, 形成了一系列的地堑系[7] [8], 其由一系列第四纪小型断陷盆地组成(见图 2)。贯穿藏南地区的张性断裂带, 主要分布在雅鲁藏布江的南北侧, 其中, 申扎-定结、那曲-羊八井-亚东及日多-错那为三条控制高温地热资源分布最显著的断裂带。

2.2. 西藏水热活动和大地热流值分布特点

断裂控制的高温地热带往往伴随着强烈的水热活动和高异常大地热流值。西藏地热勘探成果表明, 班公湖-怒江缝合带(断裂带), 不仅是一条重要的大地构造界线, 也是一条重要的热水活动和大地热流值分区界线[9]。

1) 西藏水热活动特点

西藏的水热显示类型多, 包括水热爆炸、间歇喷泉、高温沸泉、沸喷泉、热泉、温泉、喷气孔、冒汽地面等。西藏的热水活动分布极不均衡, 受板块构造和活动构造控制[10] [11]。西藏已发现的水热显示区共计 600 多处, 绝大多数出露在板块构造带和活动构造带附近, 并形成相应的地热活动带。与活动构造相同, 现代热水活动呈现明显的南强北弱的特征, 大部分地热活动区、各种类型的地热显示和高温地热活动带出现在班公湖-怒江构造带以南的藏南, 藏北仅有少量低温热泉出露。但藏北火山活动比较活跃, 有大面积的古泉华沉积(包括泉华锥、泉华台地和泉华垄等), 藏南的古泉华, 则规模小而分散。这进一步说明了历史上藏北的古水热活动相当普遍, 远比藏南的古水热活动强烈, 只是随时间由强盛变为衰竭, 现代水热活动则南强北弱, 从北向南逐渐增强。藏南的水热活动在空间上与该区的活动构造关系密切, 许多水热区尤其是高温水热区的展布正是位于这些 NS 向的活动构造带中发育的断陷盆地中。

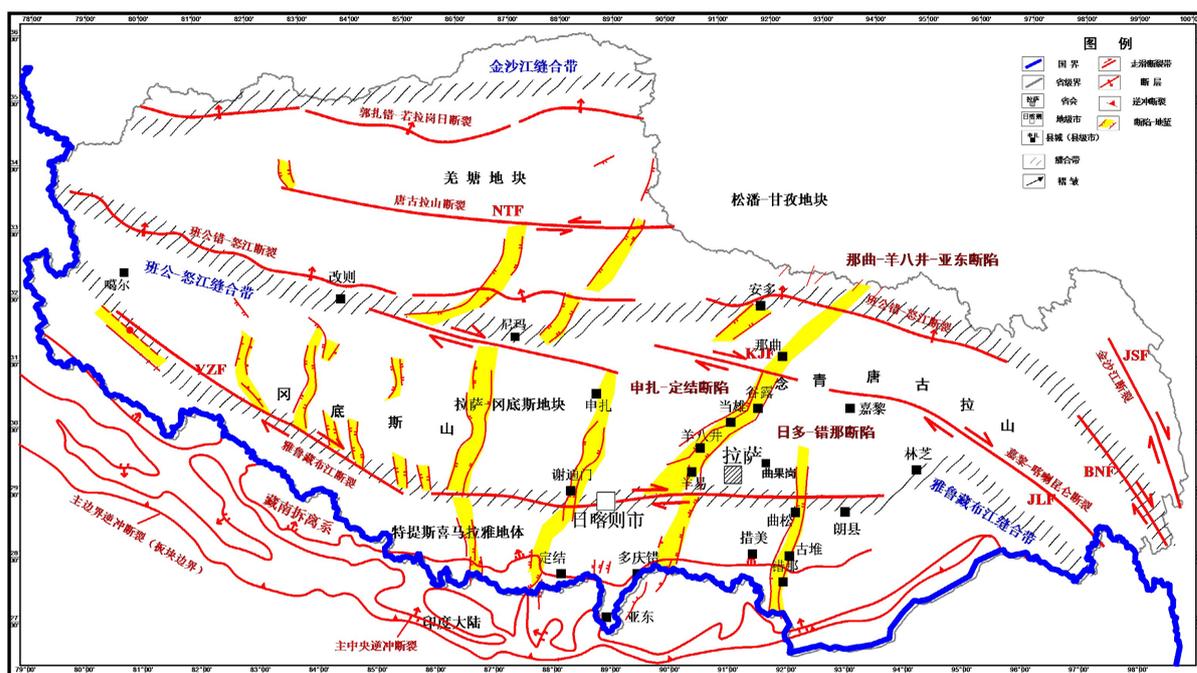


Figure 2. Distribution Map of main extensional faults and fault depressions in southern Tibet

图 2. 藏南地区主要张性断裂和断陷分布图

2) 西藏大地热流值分布特点

大地热流值是一个综合参数, 是地球内部热在地表可直接测得唯一的物理量, 它是指单位时间内由地球内部通过单位地球表面积散失的热量(mW/m^2), 其中蕴含着丰富的地质、地球物理和地球动力学的信息。对全球大地热流数据统计和分析, 勾划出全球大地热量分布的基本轮廓, 成为板块构造学说建立的四大支柱之一。

西藏大地构造单元从南向北, 即喜马拉雅地块、拉萨地块、羌塘地块、松潘-甘孜地块热流值依次明显降低[12] [13], 由于在班公湖-怒江缝合带以南地壳厚度较大且发育多个壳内熔融体, 岩石圈断裂发育、地幔上涌、碰撞造山过程中的剪切生热等因素造成热流值较高, 而以北地壳厚度相对较薄且稳定, 超深断裂不发育, 致使羌塘地块热流值相对较低。

从贯穿青藏高原 NS 向的大地热流剖面看(见图 3), 区内热流背景呈不均一性, 以班公湖-怒江断裂带为界, 热流值发生南北剧变, 可分为南部年青而又活动块体和北部古老而较稳定块体两部分, 其间的

热流值可有近一个数量级的差异[14]。北部稳定块体以具有低而变化幅度小的热流值为特征(40~47 mW/m²)，南部活动块体以具有高而变化幅度大的热流值为特征(60~364 mW/m²，平均值 > 100 mW/m²)。后者与壳源花岗岩岩浆上侵至 10~20 km 深的近期岩浆活动有关，也与这一地区独特的地壳结构有关。

2.3. 西藏高温地热资源分布特征及其成因机理

西藏高温地热资源分布与强烈的水热活动分布区和热流值高异常区基本是一致的，其集中分布在与雅鲁藏布江深大断裂相交接的 NS 向断陷盆地，著名的羊八井、羊易、古堆等高温地热田便分布在其中。其主要形成机理有以下两大因素：

一是地壳增厚，壳内铀、钍、钾等放射性元素生热增强。由于印度洋不断扩张，推动着刚硬的印度板块，沿雅鲁藏布江缝合线向亚洲大陆南缘俯冲挤压，使喜马拉雅山和青藏高原大幅度抬升。在陆壳汇聚过程中，随着地壳增厚，壳内放射性元素生热也随着增加。西藏高原地壳厚度达 70 km，是大陆地壳平均厚度的两倍左右[15] [16]。其中，喜马拉雅山脉南坡(亚东以南)地壳厚度为 56 km 左右，喜马拉雅山北坡(定结) - 冈底斯山南缘，地壳厚度为 70 km，冈底斯 - 念青唐古拉地区，地壳厚度为 78 km，班公湖 - 怒江断裂以北地区，地壳厚约 75 km。

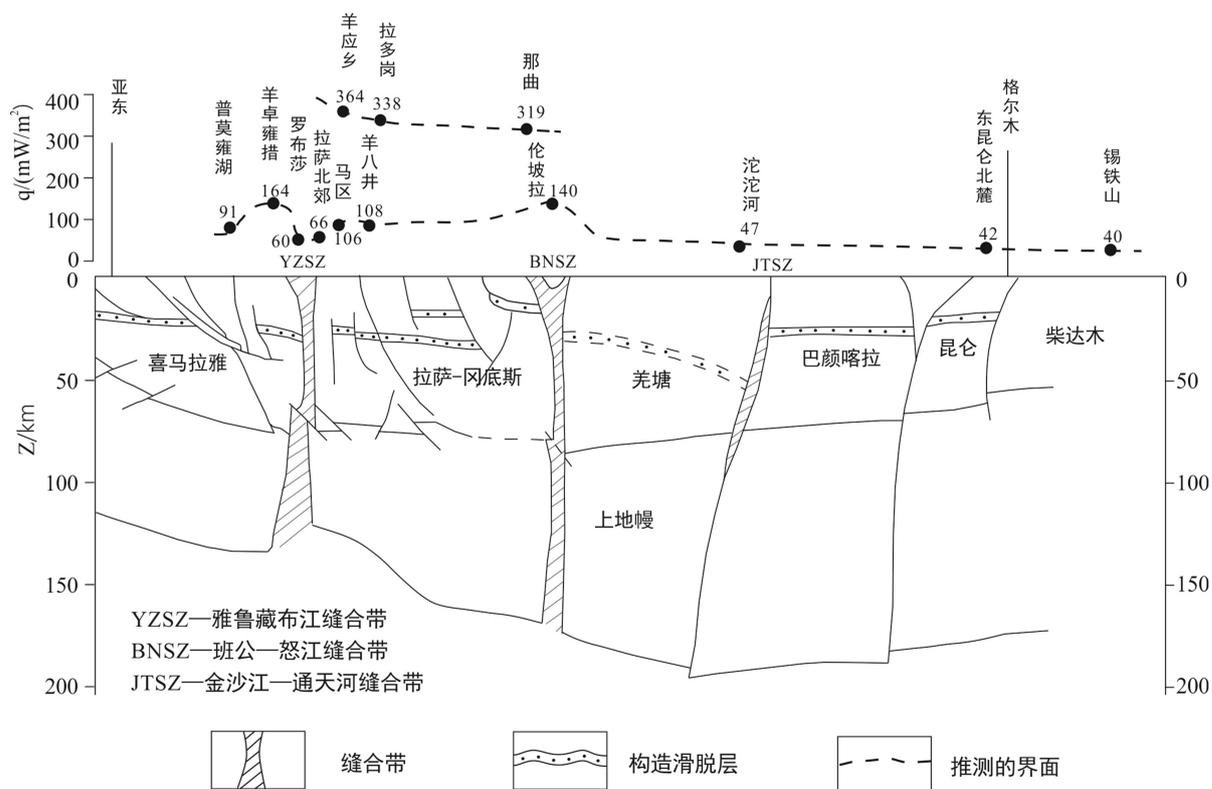


Figure 3. Heat flow profile along north-south Yadong-Golmud over the Tibetan plateau

图 3. 青藏高原南北向亚东 - 格尔木热流剖面图

二是壳内局部熔融，岩浆热或岩浆体的残余热加热围岩[17]。由于巨大板块间的相互碰撞、消亡或增长和板内的深大断裂的拉张和挤压活动，使深部的热物质或在高温高压下由岩石重熔形成的岩浆上涌和侵入，推断大概在 0.5~1.25 Ma 前，岩浆上侵至 10~20 km 的浅处形成岩浆囊或岩浆体，形成了地下高温热源体。在其影响下，岩浆热或岩浆体的残余热加热了周围地区的岩石和地下水，使地温较大幅度升高，成为高热流异常和高温地热资源形成的热源。

大气降水和冰雪融水在重力作用下沿山前深大断裂带向地下深部下渗, 在深循环过程中被地下高温岩石加热后, 在一定深度和范围内形成高温水热环境, 并在一定的地质构造条件下发生运移。由于热水产生的密度差, 在冷、热水密度差的驱动下, 沿着与山前深大断裂带相交接的 NS 向断裂带上行, 并在断陷盆地浅部、深部热储中聚集成地热资源, 还有部分热水以沸泉和热泉的形式排出。

3. 西藏高温地热资源发电利用状况

地热资源的利用一般根据温度品质的不同分为直接利用和发电两种方式。其中, 低温地热资源(温度 $< 90^{\circ}\text{C}$)主要为直接利用, 用于供暖、制冷、医疗保健、温泉洗浴、旅游、水产养殖、温室种植等方面; 中高温地热资源, 特别是高温地热资源(温度 $\geq 150^{\circ}\text{C}$)用于发电。

地热发电已有百年历史, 到现在全球已经有 26 个国家采用地热发电, 2020 年全球地热发电累计装机容量达到 15,950 MW, 年发电量约 951 亿千瓦时[18]。地热发电累计装机容量超过 1500 兆瓦的国家有 4 个, 分别为美国(3700 MW)、印尼(2289 MW)、菲律宾(1549 MW)和土耳其(1549 MW)。“十三五”期间, 全球新增地热发电累计装机容量为 3666 MW, 其中土耳其新增 1152 MW、印尼新增 949 MW、美国新增 602 MW、肯尼亚新增 599 MW, 这四个国家新增合计 3302 MW, 占全球 90.0%的比重。

上世纪 70 年代以前, 西藏地热资源利用仅限于天然露头 and 温泉的直接利用, 且主要用于医疗和洗浴方面。1977 年 9 月, 第 1 台 1 MW 高温地热能发电机组在西藏羊八井发电成功, 使我国成为世界上第 8 个掌握高温地热能发电技术的国家。到了 1987 年, 西藏羊八井地热电站装机容量达 25.18 兆瓦, 其供电量曾占拉萨市电网的近一半。但从此以后近 30 年时间里, 地热发电停滞不前, 直到 2017 年, 西藏羊易地热电站建成投产, 新增装机容量 16 MW, 地热发电才重新起色。据统计(见表 1), 截至 2020 年底, 羊八井地热电站装机规模为 27.18 MW, 羊易地热电站装机规模达 17 MW, 两个地热电站合计 44.18 MW, 占全国近 90%的比重[19]。

与世界地热发电先进国家相比, 我国地热发电严重滞后, 全国地热发电装机容量仅为 49.18 MW, 占全球地热发电累计装机的比重仅为 0.31%, 所占比重微不足道。

Table 1. Statistical table of installed capacity of geothermal power generation in China

表 1. 我国地热发电装机容量统计表

序号	地区	装机容量(MW)	投产时间	发电技术
1	广东省丰顺县邓屋	1	1970 年 12 月	单级闪蒸
2	西藏羊八井	1	1977 年 9 月	双级闪蒸
3	西藏羊八井	24.18	1987 年	双级闪蒸
4	西藏羊八井	2	2008 年	全流螺杆膨胀
5	西藏羊易	1	2012 年	全流螺杆膨胀
6	云南瑞丽	4	2017 年	全流螺杆膨胀
7	西藏羊易	16	2017 年底	ORC 双循环工质
合计		49.18		

4. 西藏高温地热资源发电发展建议

当前, 为了实现“碳达峰、碳中和”目标, 国家大力发展可再生能源, 地热发电的发展迎来了新机遇。但是也必须看到, 当前西藏地热资源勘查程度低, 探明的地热储量规模小, 特别是已探明大型高温

地热田少,不足以支撑地热发电等规模化开发利用;地热发电规模偏小;核心技术体系有待进一步完善,裂隙型地热田勘探、尾水回灌、地热高效发电等技术有待突破;与光伏、风能发电相比,对地热发电的政策支持力度还有很大差距。针对上述存在的主要问题,提出了以下三条促进西藏高温地热发电发展建议:

4.1. 建立多元化资金保障制度,加大勘探投入,开展高温地热资源的详查与评价

由于高原地区自然条件恶劣,工作条件艰苦,地质勘探成本高,导致西藏高温地热资源勘探程度总体上很低。即使羊八井、羊易等少数地热田的勘查程度虽然相对较高,但也仅对地表及浅层有地热显示的地热资源进行早期的调查和评价,对于深层地热资源潜力未做详细的钻探及地球物理勘探,其资源/储量规模还需要进一步勘探工作才能探明。

资金投入是地质勘探工作的前提和保障条件,建立多元化资金保障制度,加大勘探投入力度,以查明断裂控制下地热田形成的地质条件、热储特征、地热资源量大小和品质,并对其开采技术经济条件做出评价,为合理开发利用提供科学依据。建议把地热资源勘查列入国家专项资金;积极争取国家地质勘查基金、国土资源大调查经费、中央财政补助资金(矿产资源补偿费、探矿权采矿权使用费及价款);鼓励支持大中型企业对资源勘查的资金投入;鼓励社会资金进入商业性资源勘查和开发利用。

4.2. 加大核心技术研发,实现关键技术重点突破

地热发电涉及技术环节繁多,我国地热发电规模小,尚处在起步阶段,在非震地球物理勘查、高温地热钻完井工艺、防腐防垢、裂隙型热储尾水回灌、地热高效发电等方面技术水平总体较落后,尚未形成核心技术体系,制约着地热发电的发展。因此,建议立足关键技术、卡脖子技术的攻关,依靠科技创新,降本增效,并依托地热发电示范项目,加快地热发电关键技术产业化进程,形成对地热发电强有力的技术支撑。

4.3. 尽快出台地热发电标杆上网电价政策,促进地热发电健康发展

由于地热资源开发要经历资源勘探、钻井,再到设计建厂,建设周期较长,还有前期勘探的风险,因此技术和资金要求较高。因此,世界上所有地热发电先进国家都是依靠政策支持和优惠政策才得以健康发展。

当前,我国地热发电企业,非但没有享受当初风电、光伏发电标杆上网电价的优惠政策,反而却要承受不合理的低价上网电价和地热资源税,地热发电企业陷入了生存的困境。2020年投产的羊易地热电站,其上网电价仅为0.25元/千瓦时,而且还征收1元/m³的资源税,企业处在亏本运营。建议借鉴我国光伏、风能发电和国际地热发电成功经验,国家尽快出台地热发电标杆上网电价政策,保障发电企业合理的投资收益率,而且完善《资源税法》对地热的收税政策,对同层全回灌的地热利用免征资源税,以调动发电企业的积极性,促进地热发电健康发展。

5. 结论

西藏高温地热资源集中分布在藏南NS向第三系断陷盆地,资源丰富且品质好,发电装机容量潜力大。但是,由于高原地区自然条件恶劣,加上勘探经费投入不足、核心技术薄弱、国家配套扶持政策缺乏等因素,造成了资源勘探和开发利用程度都很低,发电严重滞后。为此,提出了三条针对性的发展对策建议,以促进西藏高温地热发电步入正轨,不但可以把资源优势转化成经济优势,发展当地经济,而且还可以改变我国地热发电落后的面貌,使我国能在世界地热发电当中占有一席之地。

参考文献

- [1] 朱弟成, 段丽萍, 潘桂棠, 等. 对青藏地区有重大影响的构造运动与岩浆响应事件[J]. 成都理工学院学报, 2002, 29(4): 405-409.
- [2] 滕吉文, 熊绍柏, 张中杰. 青藏高原深部结构与构造地球物理研究的回顾和展望[J]. 地球物理学报, 1997, 40(增刊): 121-139.
- [3] 廖志杰, 赵平. 滇藏地热带——地热资源和典型地热系统[M]. 北京: 科学出版社, 1999: 121-139.
- [4] 周总瑛, 刘世良, 刘金侠. 中国地热资源特点与发展对策[J]. 自然资源学报, 2015, 30(7): 1210-1221.
- [5] 徐世光, 郭远生. 地热学基础[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 103-113.
- [6] 多吉. 典型高温地热系统——羊八井热田基本特征[J]. 中国工程科学, 2003, 5(1): 42-47.
- [7] 李亚林, 王成善, 伊海生, 等. 青藏高原新生代地堑构造研究中几个问题的讨论[J]. 地质论评, 2005, 51(5): 493-501.
- [8] 刘池洋, 赵红格, 张参, 等. 青藏 - 喜马拉雅构造域演化的转折时期[J]. 地学前缘(中国地质大学(北京); 北京大学), 2009, 16(4): 1-12.
- [9] 刘畅往. 青藏高原班公错 - 怒江构造带电性特征[J]. 物探化探计算技术, 2007, 29(增刊): 83-88.
- [10] 李振清. 青藏高原碰撞造山过程中的现代热水活动[D]: [博士学位论文]. 北京: 中国地质科学院, 2002: 14-21.
- [11] 鲁连仲. 西藏地热活动的地质背景分析[J]. 地球科学(中国地质大学学报), 1989, 14(增刊): 53-59.
- [12] 金春爽, 付修根, 陈文彬, 等. 藏北地区钻孔大地热流值测量[J]. 地球物理学报, 2019, 62(8): 3095-3105.
- [13] 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版) [J]. 地球物理学报, 2016, 59(8): 2892-2910.
- [14] 沈显杰, 张文仁, 杨淑贞, 等. 青藏高原南北地体地幔热结构差异的大地热流证据[J]. 中国地质科学院院报, 1990(21): 203-214.
- [15] 邢乐林, 王林海, 胡敏章, 等. 时变重力测量确定青藏高原地壳隆升与增厚速率[J]. 武汉大学学报信息科学版, 2017, 42(5): 569-574.
- [16] 张德涵. 关于青藏高原地壳的隆升与增厚[J]. 武汉测绘科技大学学报, 1993, 18(3): 34-40.
- [17] 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 中国地热资源——形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 1994: 40-69.
- [18] Huttner, G.W. (2020) Geothermal Power Generation in the World 2015-2020 Update Report. *World Geothermal Congress, Reykjavik, 26 April-2 May 2020*, 1-17.
- [19] 国家“十三五”地热发展规划实施评述及“十四五”规划预研究[R]. 北京: 中石化新星新能源研究院, 2020.