

doi: 10.12029/gc20221019002

崔俊艳, 李胜涛, 姚亚辉, 刘东林, 刘伟朋, 王君照. 2023. 土耳其地热能源产业发展对中国的启示[J]. 中国地质, 50(5): 1375–1386.

Cui Junyan, Li Shengtao, Yao Yahui, Liu Donglin, Liu Weipeng, Wang Junzhao. 2023. Development of geothermal energy industry in Türkiye and its enlightenment to China[J]. Geology in China, 50(5): 1375–1386(in Chinese with English abstract).

土耳其地热能源产业发展对中国的启示

崔俊艳^{1,2}, 李胜涛^{1,2,3}, 姚亚辉^{2,3}, 刘东林^{2,3}, 刘伟朋^{2,3}, 王君照^{1,2}

(1. 中国地质科学院, 北京 100037; 2. 中国地质调查局水文地质环境地质调查中心, 天津 300304; 3. 天津市地热资源勘查开发工程研究中心, 天津 300304)

摘要:【研究目的】地热能源作为一种清洁高效的可再生能源,在能源紧缺与气候变化的双重驱动下,正逐渐受到各国重视。开发地热资源,成为加快能源结构调整以及“双碳”目标实现的重要途径。近年来,土耳其地热能源产业高速发展,截至 2021 年,地热发电总装机容量约为中国的 30 多倍,地热能源直接利用则由 2005 年的 1177 MW 增加到 2022 年的 4000 MW,取得了举世瞩目的成绩。土耳其与中国共处于地中海—喜马拉雅地热带上,地热资源丰富,土耳其地热能源产业发展对于中国具有重要借鉴意义。【研究方法】本文采用文献综述的方法,分析土耳其地热资源条件,研究地热能源产业发展现状,总结其快速发展的原因。结合中国地热资源条件与发展现状,借鉴土耳其经验,剖析影响中国地热发展的主要问题,提出对策与建议。【研究结果】研究表明,21 世纪以来,土耳其政府大力支持地热能源产业发展,其快速发展的原因和主要经验有:(1)政府承担前期勘探工作,有效降低企业开发风险;(2)政策引导、立法补贴,有效提高开发企业积极性,降低投资成本;(3)融资支持,为地热能源发展提供资金保障;(4)国际合作、技术引领,有力促进地热能源高效开发利用。【结论】借鉴土耳其地热能源产业快速发展经验,结合中国实际,提出以下建议:(1)立法先行,完善管理机制,明确地热开发利用规程;(2)政策激励、补贴支持,充分调动企业积极性;(3)科学布局,实现地热能源产业高效发展;(4)加强国际交流,助力技术进步;(5)增强公众意识,提高地热能源认知度。

关键词: 地热能源; 地热发电; 直接利用; 启示; 地震带; 地热地质调查工程; 土耳其

创 新 点: (1)分析土耳其地热资源条件,研究地热能源产业发展现状,总结其快速发展的原因。(2)总结中国地热资源条件与发展现状,剖析影响中国地热发展的主要问题,提出对策与建议。

中图分类号: F437.4; TK521; F426.2

文献标志码: A

文章编号: 1000-3657(2023)05-1375-12

Development of geothermal energy industry in Türkiye and its enlightenment to China

CUI Junyan^{1,2}, LI Shengtao^{1,2,3}, YAO Yahui^{2,3}, LIU Donglin^{2,3}, LIU Weipeng^{2,3}, WANG Junzhao^{1,2}

(1. Chinese Academy of Geological Sciences, Beijing 100037, China; 2. Center for Hydrogeology and Environmental Geology Survey,

收稿日期: 2022-10-19; 改回日期: 2023-02-19

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB1507404)和中国地质调查局项目“东部地区干热岩资源调查评价(DD20221680)”、“天津东丽区-河北牛驼镇地热资源调查与试验(DD20190127)”联合资助。

作者简介: 崔俊艳, 女, 1998 年生, 博士生, 主要从事深部地热、干热岩探测评价方面的研究; E-mail: aurora198808@163.com。

通讯作者: 李胜涛, 男, 1982 年生, 正高级工程师, 博士, 主要从事地热、干热岩地质及热储工程方面的研究; E-mail: list07@mails.jlu.edu.cn。

China Geology Survey, Tianjin 300304, China; 3. Tianjin Geothermal Resources Exploration and Development Engineering Research Center, Tianjin 300304, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

[Objective] Geothermal energy, as a kind of clean and efficient renewable energy, is gradually attracting the attention of all countries under the dual drive of energy shortage and climate change. The development of geothermal resources has become an important way to accelerate the adjustment of energy structure and achieve the goal of "double carbon". In recent years, Türkiye's geothermal energy industry has developed at a high speed. By 2021, the total installed capacity of geothermal power generation will be about 30 times that of China, and the direct utilization of geothermal energy will increase from 1177 MW in 2005 to 4000 MW in 2022, making these remarkable achievements. Türkiye and China are both located in the Mediterranean Himalayan geotropics, where geothermal resources are abundant. The development of Türkiye's geothermal energy industry is of great significance to China. **[Method]** This paper uses the method of literature review to analyze the conditions of geothermal resources in Türkiye, study the development status of geothermal energy industry, and summarize the reasons for its rapid development. Combined with the conditions and development status of China's geothermal resources, and drawing on Türkiye's experience, this paper analyzes the main problems affecting China's geothermal development, and puts forward countermeasures and suggestions. **[Results]** The research shows that Türkiye's government has vigorously supported the development of geothermal energy industry since the 21st century. The reasons and main experiences of its rapid development include: (1) The government undertakes the preliminary exploration work, effectively reducing the development risk of enterprises; (2) Policy guidance and legislative subsidies can effectively improve the enthusiasm of development enterprises and reduce investment costs; (3) Financing support to provide financial guarantee for geothermal energy development; (4) International cooperation and technology guidance will effectively promote the efficient development and utilization of geothermal energy. **[Conclusion]** Drawing on the rapid development experience of Türkiye's geothermal energy industry and combining with China's actual conditions, the following suggestions are put forward: (1) Improve geothermal energy management mechanism and define the process of geothermal development and utilization; (2) Effectively improve the enthusiasm of enterprises development and reduce investment costs through policy guidance and subsidies; (3) Realize efficient development of geothermal industry through reasonable spatial planning; (4) Strengthen international exchanges and help technological progress; (5) Improve social awareness of geothermal energy.

Key words: geothermal energy; geothermal power generation; direct utilization; enlightenment; seismic zone; geothermal geological survey engineering; Türkiye

Highlights: (1) Analyze the conditions of geothermal resources in Türkiye, study the development status of geothermal energy industry, and summarize the reasons for its rapid development. (2) Summarize the conditions and development status of geothermal resources in China, analyze the main problems affecting the development of geothermal resources in China, and propose countermeasures and suggestions.

About the first author: CUI Junyan, female, born in 1998, Ph.D. candidate, mainly engaged in the research of geothermal geology; E-mail: aurora198808@163.com.

About the corresponding author: LI Shengtao, male, born in 1982, senior engineer, Ph.D., mainly engaged in the research of hydraulic environmental geology, geothermal geology and thermal storage engineering; E-mail: list07@mails.jlu.edu.cn.

Fund support: Supported by the National Key R&D Plan (No.2021YFB1507404) and the project of China Geological Survey (No.DD20221680, No.DD20190127).

1 引 言

土耳其与中国共处于地中海—喜马拉雅地热带上(图1),地热资源丰富。自1950年以来,土耳其的城市人口从14%增加到53%,工业化进程加快,用

电量也急剧增加。作为一个化石能源依赖型国家,近年来土耳其一直在寻找一条摆脱化石能源的新道路,大力发展可再生能源,如风能、水电、太阳能、地热能和生物质能。在此背景下,土耳其利用其境内丰富的中高温地热资源建设发电项目,中低温地

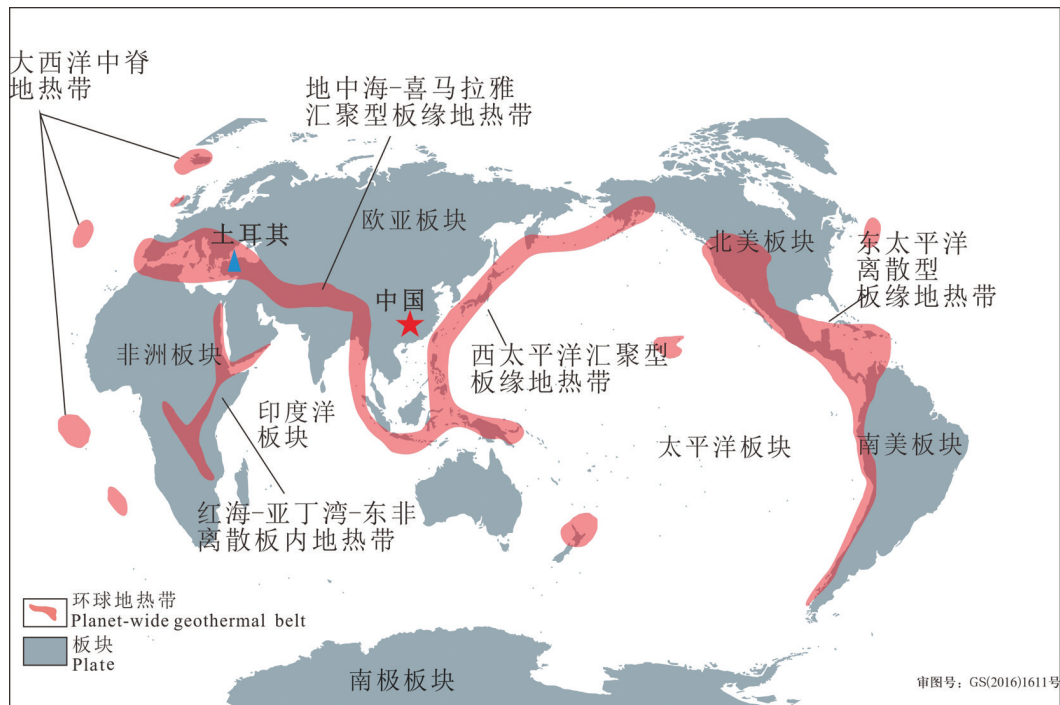


图1 全球高温地热带分布(据何治亮等,2017)

Fig.1 Distribution of global high temperature geotopics (after He Zhiliang et al., 2017)

热资源进行住宅供暖、农业养殖与烘干、温泉旅游等,充分发挥地热能清洁安全、等效利用系数高、输出稳定等特点。至2021年底土耳其地热发电装机容量达1.7 GW,占全国发电总装机容量的3%,世界排名仅次于美国、印度尼西亚和菲律宾(Richter, 2022),直接利用量总计4 GW。地热能显然已经成为土耳其可再生能源的重要组成部分。

中国和土耳其在地热资源特征与开发利用方面具有一定的相似性,土耳其地热能利用快速发展经验对于中国具有重要的借鉴意义。本文通过分析土耳其地热资源条件,研究地热能产业发展现状,总结其快速发展的原因。结合中国地热资源条件与发展现状,借鉴土耳其经验,剖析影响中国地热发展的主要问题,提出对策与建议。

2 土耳其地热资源概况

2.1 人口分布与能源需求

土耳其面积785350 km²,人口8400万,是欧洲和中东最大的国家之一,境内划分为七个区域。由于自然环境的差异,沿海平原人口稠密,内陆高原人口稀疏。据2021年土耳其人口统计数据,人口依次集中在马尔马拉、爱琴海、地中海、安纳托利亚

东南部等地区(图2)(Tuik, 2021)。

土耳其日益增长的经济表现也反映在其能源需求上,2020年土耳其消耗约3840亿kW·h的电力(仅来自化石燃料),人均能源消耗量约为4659 kW·h(Difiglio et al., 2020)。2015—2019年煤炭和褐煤消费量以每年8%的速度增长。天然气消费量以每年9%的速度增长,2021年飙升至60亿m³,比2020年水平高出24%。自1989年以来,电力部门一直是政府优先发展项。尽管近年电厂建设快速增长,当前总装机容量已增至103 GW(MENR, 2021),但仍赶不上日益增长的民用和工业需要,土耳其被迫从邻国进口电力。土耳其人口分布、经济发展、能源需求与地热资源分布呈现良好的匹配关系,西部人口集中,高温地热发电后就地利用,极大节约了成本。目前几乎所有的地热发电厂都位于土耳其第三大城市伊兹密尔的南部或东部,大约有1000 MW的地热发电装机容量。

2.2 地热资源禀赋

土耳其位于欧亚板块南缘,受阿拉伯板块和非洲板块的北向俯冲,处于弧后伸展的构造应力区,地壳持续拉张减薄使土耳其成为地震活动最强烈、构造断层最发育、地热资源最丰富的国家之一

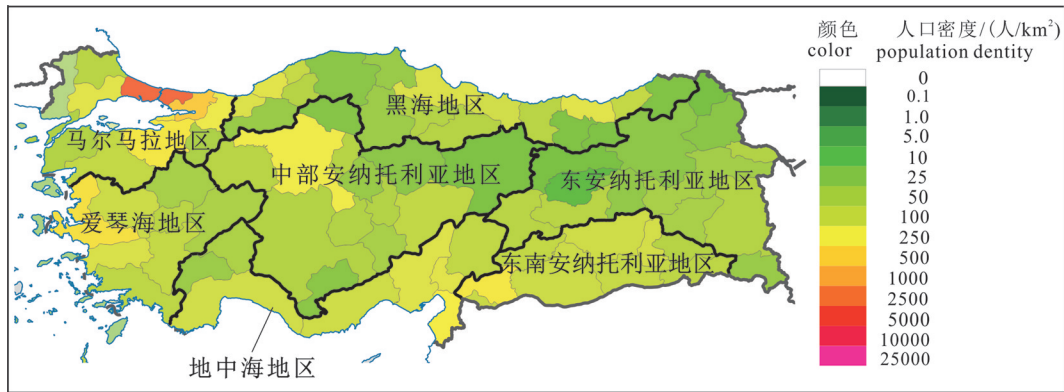


图2 土耳其人口密度及区域划分(据 Tuik, 2022)

Fig.2 Population density and regional division of Türkiye(after Tuik, 2022)

(Bertani, 2016)(图3)。其内部广泛分布火山活动、喷气孔及超过600个温泉,温泉温度最高可达100℃以上。据估土耳其的水热型地热资源潜力(0~4 km)为60000 MW,这些资源有78%左右集中在安纳托利亚西部,9%在安纳托利亚中部,7%在马尔马拉地区,5%在安纳托利亚东部,1%在其他地区(Bilgin, 2018)。低焓或中焓地热资源约占90%,适合直接利用,地热发电潜力(0~4 km)为4500 MW(Mertoglu et al., 2020)。

2.3 地热能产业发展历程及现状

土耳其对地热资源的研究利用有很长的历史,

地热水从公元前2世纪开始在海罗波利斯的水疗中心使用。近年来,地热资源的应用尤其是地热发电发展迅速,大致可归纳为3个阶段:起步阶段、研究积累阶段和快速发展阶段。

2.3.1 起步阶段

20世纪初期至20世纪50年代为土耳其地热研究的起步阶段,对于地热的利用尚处于温泉旅游等方向,地热资源探明程度较低,勘探靶区也尚不明确。

2.3.2 积累阶段

20世纪60年代至20世纪末为地热研究的积累阶段,这一阶段土耳其开始对国内地热田进行勘探



图3 土耳其断裂活动带以及地热资源分布(据 Dagistan et al., 2010)

Fig.3 Distribution of geothermal resources and the active faults of Türkiye(after Dagistan et al., 2010)

和初步开发,积累了大量的地热开发利用经验,为后来的快速发展奠定了基础。

1961年是一个关键的转折点,联合国新能源会议的召开引起了人们对于土耳其地热资源的兴趣与关注。之后五年间,土耳其开始在全国范围内进行地质、地球物理和地球化学等研究工作,其中大部分集中在安纳托利亚西部(Simsek,1985)。1967年,在联合国技术援助计划下,土耳其矿产研究与勘查总局(MTA)开展了第一个地热勘查项目并初步确定了安纳托利亚西部的九个地热勘探区。1968年在克孜勒代尔钻探了第一个地热深井,揭示了湿蒸汽田并于1975年成功发电,容量为500 kW。国有发电公司于1984年扩建了该厂,装机容量增加到17.4 MW(Serpen and DiPippo, 2022),后将经营权私有化给佐碌能源公司(Kaya et al., 2009),截至今日累计装机容量260 MW,为土耳其经济发展和节能减排作出重要贡献。

在此后的几十年间,土耳其都没有再新建地热发电站。但在此期间MTA从未停止对地热资源的勘探和研究工作,探明了全国范围内多处高温地热田。同时一些私营部门和各地政府开始积极探索中低热场的直接利用。1987年,第一个区域供热系统运行于戈南低温地热田,总装机容量为 1.4×10^7 kcal/h(Mertoglu and Mertoglu,1993)。此后温泉旅游、农业种植等地热能直接利用形式也开始逐步投入使用。

2.3.3 快速发展阶段

2005年世界地热大会于土耳其召开,议会与政府开始重视地热能开发利用,地热能产业进入快速发展阶段阶段。

据2005年国际地热能协会土耳其国家地热报告显示,全球地热发电装机总量合计为9169.2 MW,土耳其装机容量仅占0.21%(Simsek et al., 2005)。2005年之后私人开发商纷纷涌入地热市场,以佐碌能源公司为例,其承担了克孜勒代尔发电厂项目,总投资达5.7亿美元,其中克孜勒代尔Ⅲ地热发电厂的总装机容量为165 MW,已成为土耳其最大的地热发电厂。该公司名下共有4座地热发电厂,总装机容量为305 MW,占国内地热装机容量的19%以上。

2017年土耳其地热发电总装机容量首次突破1 GW,世界排名第四,在地热发电的新设施方面已

经处于领先地位。2005—2021年,地热发电厂的数量从1个增加至63个(MENR,2021),地热发电装机容量新增1628 MW,增速1985.36%,位于世界第一(Mertoglu et al., 2020)(图4)。并且还有望继续增加,预计到2025年可能增加至2000 MW,总装机容量排名上升至世界第三。

土耳其在地热能发电世界排名经历了巨大的飞跃,其在直接利用方面的进展也不可忽视。据2005年全球直接利用地热能报告,土耳其地热能直接利用装机容量为1177 MW,排名世界第五,近65万 m^2 的温室空间通过地热能进行加热。2015年,这一数字增加到393.1万 m^2 。住宅地热能供暖从65000套住宅增加到114567套(Mertoglu, 2005;Melikoglu, 2017)。2022年全球可再生能源状况报告显示土耳其的直接利用量仅次于中国(不包含地源热泵),约为4 GW(UNEP, 2022)。

3 土耳其地热能产业快速发展原因分析

土耳其地热能利用虽然起步较晚,但在20多年间实现了地热能利用的快速飞跃,这无疑是一个巨大的发展和成功。经分析以下因素起到了重要的推动作用。

3.1 政府承担前期勘探工作

在全球范围内,与地热项目的勘探和开发阶段相关的成本和风险使寻找早期融资成为一项挑战。与勘探相关的成本可达项目总成本的15%,本阶段钻井的成功率为50%~59%,平均需要2~3年才

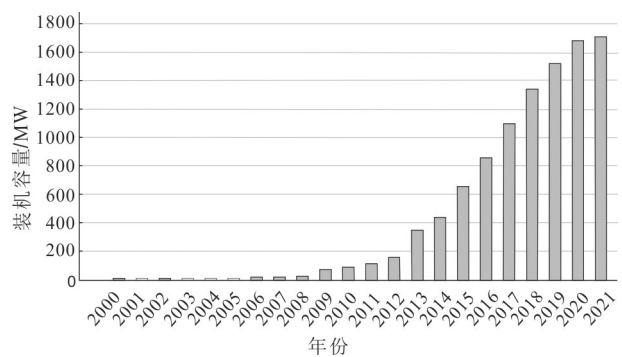


图4 土耳其国家地热发电装机容量(据 Bertani, 2005, 2016; Richter, 2022)

Fig.4 Installed capacity of geothermal power generation in Türkiye (after Bertani, 2005, 2016; Richter, 2022)

能确认地热资源适合发电,巨大的投资风险成为地热开发的阻碍(Oliver et al.,2015)。对此土耳其政府于2009年启动新的地热开发体系:由MTA承担前期的探勘项目,确定合适的地热有利开发区后通过招标发放许可证,由私人生产商进行后续的地热开发工作。截至2013年,在土耳其开发的12个项目中,有11个是政府已经证实该资源适合发电,然后将其投入招标(Oliver and Stadelmann, 2015)。2010—2019年间,土耳其由MTA和私营企业开发的用于地热利用的钻井总计约950口,总深度达1472 km(表1)(Mertoglu et al., 2015, 2020)。由此可见,政府承担前期的探勘活动不仅为更好的探明地热资源提供了保障,并且为后续地热利用的快速发展做好了铺垫。

3.2 积极的政策引导

2005年世界地热大会于土耳其召开的契机,议会和政府认识到了发展地热事业的重要性以及开发本地地热资源的重要意义,并且紧接着就议会立法、出台相关政策。2007年发行的《地热和矿泉水法》(No.5686)是土耳其地热发展的重要里程碑,该法阐明了地热和天然矿泉水资源有效勘探、开发、生产和保护的原则,并允许地热田私有化和地热资

表1 2010—2019年土耳其用于地热能利用的钻井(包含热泵井)(据Mertoglu et al., 2015; Mertoglu et al., 2020)

用途	井温/°C	数量/个				总深度/km
		发电	直接利用	联合	其他	
	>150	370			50	858
生产	150~100			60	25	105
	<100		180		35	294
回灌		170	60			215
总计		540	240	60	110	1472

源租赁竞标,这为其地热资源的合理有序开发提供了有利的法律保障(Government of Turkey, 2007)。

其次,土耳其地热发电装机容量的发展比预期中要快很多,主要是因为上网电价优惠制度的颁布和实施。2001年土耳其政府发布《电力市场法》(No.4628),制定了促进可再生能源发电的法律框架,并提到了诸如上网电价和购买义务、免除小型发电机的许可证义务、减少项目准备费用和土地征用费用等激励措施。2005年颁布了《可再生能源发电法案》(No.5346),针对不同可再生能源分别制定了补贴电价,地热发电为10.5美分/kW·h,采用土耳其本土生产的设备将获得额外的补贴。上网电价优惠政策的实施使地热发电电价比当前市场电价高28%,并确保项目在8年内可实现投资盈利。股本回报率(IRR)由原来的10%提高至11%~14%(Oliver and Stadelmann, 2015)。这一系列激励性措施为地热能投资创造了一个良好的环境,吸引了大量私人投资商进入地热开发市场。

3.3 融资支持

土耳其银行及金融机构对可再生能源的发展及发电应用给予积极的资金扶持,自2005年以来,土耳其在地热领域的投资成倍增加。2000—2004年期间总投资仅2.3亿美元,2015—2019年期间用于地热利用的投资高达54亿美元(Mertoglu et al., 2015)(表2),其本土银行为能源公司提供了约510亿美元的贷款,占总贷款的86%。

土耳其政府还积极寻求国外资金支持,自2010年以来,欧洲复兴开发银行(EBRD)及其融资合作伙伴已向土耳其的14家金融机构提供约25亿欧元贷款,同时提供了近8000万美元的清洁技术基金优惠资金和欧盟的2300万欧元赠款支持(AA, 2022)。通过EBRD资助的中型可持续能源融资设施将获得长期、低成本债务,将股本回报率在电价补贴的基础上

表2 土耳其地热开发利用投资情况(据Mertoglu et al., 2015)

时间/年	研究与开发 /百万美元	区域开发 /百万美元	利用/百万美元		资金类型/%	
			直接利用	发电	私人	公共
1995—1999	6	18		40	80	20
2000—2004	13	40	64	120	80	20
2005—2009	245	80	190	245	70	30
2010—2014	1100	320	200	540	90	10
2015—2019	2330	1210	60	1760	90	10

进一步提高到12%~15%(Oliver and Stadelmann, 2015)。这些融资支持为土耳其包括地热能在内的可再生能源的发展提供了良好的资金保障。

3.4 国际合作与技术引领

过去二三十年的地热快速发展过程中,土耳其在很大程度上依靠国际技术和经验来推动建设地热发电厂并发展其热能产业。土耳其作为欧盟成员国参与了国际能源署的5个扩大技术合作计划,并与德国、丹麦、墨西哥等国家建立能源协作伙伴关系,有力促进了土耳其地热能的高效开发和利用(Lewis et al., 2021)。

此外,土耳其私人企业与高等院校、科研部门等保持良好的合作关系,组织联合研发团队,持续推动地热能勘探开发利用颠覆性技术攻关,加强地热产业装备。在区域供暖方面,建立了变速泵、深井泵、热交换器以及流体管道系统的全流程体系,正确的设计、应用以及合适的技术使得供暖投资在5~8年内实现盈利(Mertoglu et al., 2000)。在地热发电方面,土耳其自20世纪80年代第一个双循环地热发电厂被引入后,其中低温发电技术日趋成熟。截至2021年底,土耳其大约有70个独立的双循环系统单元在运行(图5)。

4 中国地热资源及其利用现状

4.1 人口分布特征与能源需求

中国人口分布非常不平衡,呈现出“西部稀疏、

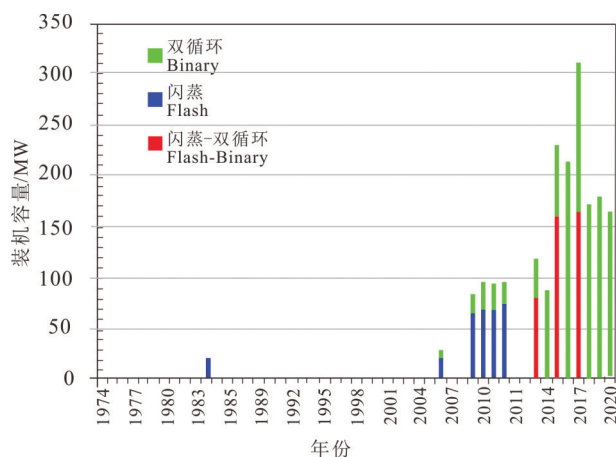


图5 按工厂类型每年增加的地热发电装机容量(Serpén and DiPippo, 2022)

Fig.5 Geothermal MW added each year by type of plant (Serpén and DiPippo, 2022)

东部密集”的态势。改革开放以来,随着经济持续快速发展、人民生活水平日益提高,中国能源需求不断增长,2017年中国能源消费总量44.9亿t标准煤,比1978年增长6.9倍,年均增长5.4%。2021年全年中国能源消费总量52.4亿t标准煤,比2020年增长5.2%。煤炭消费量增长4.6%,原油消费量增长4.1%,天然气消费量增长12.5%,电力消费量增长10.3%。2021年人均用电量达到5500 kW·h。

4.2 中国地热资源特征

中国东部以及西南部分别受中生代以来太平洋板块俯冲效应以及新生代欧亚—印度板块碰撞影响,表现为东部地区的拉张减薄,西部地壳挤压增厚,压扭走滑。在以上板块构造作用机制下,中国大陆地区热流分布总体表现为东高、中低,西南高、西北低的构造格局(姜光政等,2016)。在这样的大地构造背景和区域地热背景下,东部形成了环太平洋台湾地热带,西南形成喜马拉雅地热带(汪集暘等,2019)。除此之外,中国各地遍布中低温地热系统,根据其所属的地质环境与传导方式,分为沉积盆地传导型与隆起山地对流型,均属于板内地热带(陈墨香等,1994)。

据估中国水热型地热资源量折合标准煤12500亿t,每年可开采量折合标准煤18.65亿t,336个地级以上城市浅层地热资源每年可开采量折合标准煤7亿t。传统水热型地热资源潜力巨大且开发程度不高,具有很大的开发空间。干热岩远景资源量折合标准煤856万亿t,开发前景广阔(王贵玲等,2017)。

4.3 中国地热产业发展历程及现状

4.3.1 地热发电历程及现状

20世纪70—90年代中国先后建成7座中低温地热发电站。1970年在广东省丰顺县邓屋村利用92℃湿蒸汽建成中国第一座地热发电站,装机容量72 kW,使中国成为全球第八个利用地热发电的国家。第一座高温蒸汽发电站1976年在西藏羊八井建成,并于1977年成功发电,后来羊八井发电站又装配了8台机组扩充产能,建成了 2.518×10^4 kW的总装机容量,持续运行至今。此后三十年中国地热发电发展几乎陷入停滞,中低温地热电厂仅广东丰顺的300 kW迄今仍在运行,其余6处都因“高成本,低效率”在完成试验几年后陆续关停。2007年、

2009年江西华电电力有限公司江西华电在羊八井电站各新增1 MW机组(Zheng, 2012)。2017年初中国首个地热专项规划《地热能开发利用“十三五”规划》发布,提出地热发电的指标是新增500 MW,仅西藏羊易地热电厂建成一期工程16 MW,另外分别实现了四川康定0.2 MW、河北献县0.28 MW和云南瑞丽1.6 MW的地热发电。“十三五”期间共完成新增18.08 MW装机容量,只实现了规划指标的3.6%。(表3)。截至2020年末,国内地热发电装机容量约为54.43 MW,世界排名第19名(Huttrer, 2020)。近两年干热岩发电研究有所进展,2021年青海共和盆地干热岩勘查试采示范工程实现中国首次发电试验,取得一系列重大技术突破。完成了青海共和干热岩试采井组三井连通试验,初步建立了HDR勘探和生产的全流程工艺体系(Zhang et al., 2022)。此外,山西大同、河北马头营、江苏兴化等多地也相继开展了不同地质背

景条件下的试验性发电探索(文冬光等, 2023)。

4.3.2 直接利用发展历程及现状

早在公元前5、6世纪中国就已有利用温泉治病的医疗记载,以利用温泉洗浴、疗养为主。20世纪70年代以后地热能产业开始扩展到温泉洗浴、地热供暖、地热发电等综合性利用阶段。21世纪以来由于政策引导、能源与环境需求,地热能开发利用进程加快。近十年来,中国水热型地热能直接利用以年均10%的速度增长。截至2020年底,全球地热直接利用折合装机量为108 GW,中国地热直接利用装机容量达40.6 GW,占全球的38%。其中地热供暖装机容量7.0 GW,地热热泵装机容量26.5 GW,分别比2015年增长138%、125%(陈钦强, 2021)。1990年全国水热型地热能供暖建筑面积仅为190万m²,2000年增至1100万m²。据国家地热能中心统计,截至2020年底,供热面积达5.8亿m²。2000年之后中国地热能直接利用量连续多年位居世界首位(马冰等, 2021)。

表3 中国地热发电情况(据王贵玲和陆川, 2022)

Table 3 Geothermal Power Generation in China (after Wang Guiling and Lu Chuan, 2022)

地区	名称	建成时间	类型	总装机容量/MW
西藏	羊八井	1977—1991	分离蒸汽	1
	羊八井	1981—2010	全流式/两级闪蒸发电	26.18
	羊易	2018	双工质发电	16
	羊易	2012	全流式发电	0.9
	那曲	1993	双工质发电	1
	郎久	1988	单级闪蒸发电	1
	羊八试验	1977	两级闪蒸发电	1
河北	华北油田	2011	双工质发电	0.4
	献县	2017		0.28
	怀来试验	1971	双工质循环	0.2
广东	丰顺试验	1970/1978/1984	单级闪蒸/双工质循环发电	0.586
湖南	灰汤试验	1975—2008	单机闪蒸	0.3
中国台湾	清水	1981	单机闪蒸发电	3
	土场试验	1985	双工质发电	0.3
云南	地美特	2018	全流双螺杆发电	1.6
江西	温汤试验	1971	双工质	0.2
辽宁	熊岳试验	1977	双工质循环	0.2
广西	象州试验	1979	单机闪蒸	0.2
山东	招远试验	1973	单机闪蒸	0.2
青海	共和	2014	双工质螺杆膨胀	0.114
天津	天津	2015	双工质螺杆膨胀	0.09
四川	康定	2017	双工质	0.2
山西	科研试验	2021	双工质循环	0.58
总计				54.43

5 土耳其经验对中国地热能发展的启示

面对2023年世界地热大会于中国举办的契机,我们与2005年第一次举办世界地热大会的土耳其站在了同一个路口。尽管比土耳其晚了十几年,但于中国而言无疑是一个很好的机遇。本文参考土耳其发展经验,结合中国地热资源特征,对中国地热能发展提出几点建议。

5.1 立法先行,完善管理机制,明确地热开发利用规制

近年来,中国地热能开发利用相关政策措施陆续完善,管理制度初步形成。在中国现行法律体系下,“地热”受三部法律管控。《中华人民共和国矿产资源法》规定“地热”属于能源矿产,但传统的矿产资源具有不可再生性,在实际应用中不能满足地热能大规模勘探开发利用的需要。《中华人民共和国可再生能源法》虽然强调地热能属于可再生能源,但只有原则性规定,缺乏如风能、太阳能具体可落地的管理手段和措施(自然资源部,2018)。

此外《中华人民共和国水法》规定“地下热水”属于水资源。各省对于地热资源与水资源的划分尚存在争议。《天津市地热资源管理规定》中明确“热水型地热系指流温在40℃(含40℃)以上的地下热水”、“取用40℃以下地下热水的,按有关规定申办《取水许可证》并交纳地下水资源费”。河北省、北京市、辽宁省丹东市等地都将浅层地下热水作为水资源进行管理。而重庆市、山东省东营市等地却将其作为矿产资源进行规制,甚至同一省份不同市、不同部门对于浅层地热资源属性划分持截然不同的观点。地热定义的模糊性导致的相关管理条例的复杂性,增加了政府的管理成本和企业的行政负担,因此急需国家部门对地热资源开发管理章程作出统一规定,出台专门的地热法。2007年土耳其政府颁布了《地热资源与天然矿泉水管理法案》

及其实施细则,涵盖了包括勘探、钻井、生产和利用在内的地热开发利用的各个方面,对土耳其地热资源的勘探开发利用进行了规范,使地热资源开发利用有章可循、有法可依。中国也需要建立全面系统、完善的资源勘查与评价、环境监测与管理体制,制定地热能开发管理办法。明确取水与取热边界,加强市场监管。

5.2 政策激励、补贴支持,充分调动企业积极性

地热资源开发具有初期投资大、开发周期长、回收成本慢等特点,严重制约地热能开发。因此中国在大力提倡发展清洁能源的同时,也应当充分借鉴土耳其经验,出台具有针对性的激励措施。

对于地热发电产业而言,目前我国不仅没有明确的电价激励措施,还面临被征收资源税。2020年9月1日实施的《中华人民共和国资源税法》中规定,“地热”和“矿泉水”应当依法缴纳资源税和矿产资源补偿费。按照1%~20%或每立方米1~30元的税率,西藏羊易地热电站发电项目甚至每年还要缴520万元的地热资源税(郑克棣和郑帆,2020)。

在地热能开发投资方面,中国对于地热能开发利用的投资要小于土耳其,并且投资分配不均衡(表4)。按照土耳其经验,中国需要脱离矿产资源法、取消地热资源税,对地热发电实施电价补贴。对于利用地热资源进行供暖、农业种植、烘干等产业的企业或者单位加大优惠政策倾斜,给予一定的补贴支持,充分调动各方积极性,加快地热产业发展。

5.3 因地制宜、科学布局,合理开发利用

中国西南部与土耳其西部同属于地中海—喜马拉雅地热带,不同之处在于土耳其西部人口密集,工业产业发达,用电量,高温地热发电后就地利用,极大节约了成本。中国地热资源分布不均衡,高温地热资源主要分布在藏南—川西—滇西地区和中国台湾地区,人口相对较少,用电需求相对较低。在地热开发利用过程中应当充分考虑地域

表4 2010—2019年间中国与土耳其地热开发利用投资对比(据 Mertoglu et al., 2020; Tian et al., 2020)

Table 4 Comparison of geothermal development and utilization investment between China and Türkiye from 2010 to 2019 (after Mertoglu et al., 2020; Tian et al., 2020)

国家	研究与开发(包括勘探 钻井)/百万美元	区域开发(包括生产钻井和 地表设备)/百万美元	利用/百万美元	
			直接利用	发电
中国	319.5	1250.3	4435.9	119.1
土耳其	3688	1668	514	2705

差异与需求,做到因地制宜。

西藏、川西等地,煤、石油、天然气等资源极端匮乏,社会经济发展相对落后。在建设高温地热发电项目以及中低温地热发电试验的同时,积极开展地热在区域供暖、观光、农业等领域的应用,最大限度利用地热资源,与风能、太阳能等当地可再生资源结合,逐步满足当地生产生活需要。在京津冀等北方城镇推广中深层地热能集中供暖,长江中下游地区推广地源热泵供热、制冷应用等。

5.4 国际合作,科技创新驱动高质量发展

中国地热资源条件与土耳其类似,地热资源潜力以及发电潜力均高于土耳其,发电装机容量却远小于土耳其。除地热资源与人口分布不均衡外,主要原因之一是对中低温发电的重视程度不够。

尽管在20世纪70年代就创造了67℃最低温度地热水发电的世界纪录,但之后经历了几十年的停滞期,地热发电排名不进反退。由于长期停滞发展使中国的地热发电技术较为落后。依据土耳其经验。其从世界银行、欧洲复兴开发银行等处获得了融资贷款,并且获得了一系列技术援助。欧洲复兴开发银行还与土耳其能源和自然资源部密切合作,帮助制定了该国首个国家可再生能源行动计划。

因此我们应当充分借鉴世界先进水平国家的技术经验,加强国际交流,积极开展国际合作,进行地热发电技术与投资方面的交流与输出,助力地热资源利用发展进步。此外,中央财政和地方财政应设立地热能资源调查和科技创新重大专项资金,加大对地热能勘探开发利用核心关键技术研发的投入力度,加强地热能专用设备和特种技术的研发。

5.5 增强公众意识,提高地热能认知度

公众因素是地热开发中最重要的社会因素。近年来,随着科技、互联网和通信的发展,公众对生活质量的关注度提高,更加重视中国政府的决策和重要战略。相比于风能与太阳能,公众对于地热能的认知度和接受度比较低(Liu et al., 2018)。土耳其政府在这方面正采取一些积极有效的措施,设法使民众参与到地热能利用相关决议中,以获得当地社区对该项目的想法、问题和建议(Sahiller et al., 2021),这对于地热能活动的开展以及推广起到了很大作用。因此应当积极开展地热能科普活动,提升公众素养,增强社会对于地热能利用的意识。

鼓励和吸引更多年轻人投身地热能利用领域,将有助于加速地热能的有效利用。

6 结 论

(1)土耳其处于地中海—喜马拉雅地热带,地热资源丰富,水热型地热资源潜力(0~4 km)为60000 MW,中低温地热资源占比达90%,用于发电、区域供暖、农业、旅游以及疗养等。地热发电潜力为4500 MW,自2005年土耳其举办世界地热大会以来,其地热能产业飞速发展,至2021年底土耳其地热发电站由1个增至63个,装机容量达1.7 GW,世界排名第四。中国高温地热资源主要分布在藏南—川西一带以及中国台湾地区,中低温地热资源则在全国范围内广泛存在。地热能直接利用量自2000年以后连续多年排名世界第一,但地热发电进展缓慢。

(2)21世纪以来,土耳其政府大力支持地热能产业发展,政府承担前期勘探工作,有效降低企业开发风险;通过政策引导、立法补贴,提高开发企业积极性,降低投资成本;给予融资支持,为地热能发展提供资金保障;开展国际合作,提升技术水平,有力促进地热能高效开发利用。

(3)分析土耳其地热能产业发展原因,结合中国实际,建议政府立法先行,完善管理机制,明确地热开发利用规程;政策激励、补贴支持,充分调动企业积极性;科学布局,实现地热产业高效发展;加强国际交流,助力技术进步;增强公众意识,提高地热能认知度。

致谢:感谢编辑部与论文审稿人在审阅编辑过程中对本文提出的宝贵意见与建议。

References

- AA. 2022. EBRD launches €500M financing facility to support green transition in Turkiye [EB/OL]. (2022-04-19) [2022-08-28]. <https://www.aa.com.tr/en/economy/ebd-launches-500m-financing-facility-to-support-green-transition-in-turkiye/2567173#>.
- Bertani R. 2005. World geothermal power generation in the period 2001–2005[J]. *Geothermics*, 34: 651–690.
- Bertani R. 2016. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report[J]. *Geothermics*, 60: 31–43.
- Bilgin O. 2018. The importance of geothermal energy resources in Turkey[J]. *Open Access Library Journal*, 5(2): 1–8.

- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994. Geothermal Resources in China ——Formation Characteristics and Potential Assessment[M]. Beijing: Science Press, 1–38 (in Chinese).
- Chen Qinqiang. 2021. Domestic geothermal resource reserves, development and utilization and technical status[N]. China Petroleum News, 4(in Chinese).
- Dagistan H, Dogu N, Karadaglar M. 2010. Geothermal explorations and investigations by MTA in Turkey[C]//Proceedings World Geothermal Congress 2010.Bali, Indonesia, 2.
- Difiglio C, Güray B E, Merdan E, Aliabadi D E. 2020. Turkey Energy Outlook 2020. International Centre for Energy and Climate[M]. Sabanci: Sabanci University Publications, 452.
- Government of Turkey. 2007. Law on Geothermal Resources and Mineral Waters[OL]. Ankara: Government of Turkey.(2007– 06– 14) [2022– 07– 18]. <http://www.lawsturkey.com/law/law-on-geothermal-resources-and-mineral-waters-5686>.
- He Zhiliang, Feng Jianyun, Zhang Ying, Li Pengwei. 2017. A tentative discussion on an evaluation on system of geothermal unit ranking and classification in China[J]. Earth Science Frontier, 24(3): 168–179 (in Chinese with English abstract).
- Huttrer G W. 2020. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report[C]//Proceedings World Geothermal Congress, 1.
- Jiang Guangzheng, Gao Peng, Rao Song, Zhang Linyou, Tang Xiaoyin, Huang Fang, Zhao Ping, Pang Zhonghe, He Lijuan, Hu Shengbiao, Wang Jiyang. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition) [J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2892–2910 (in Chinese with English abstract).
- Kaya T, Kindap A, Energy Z. 2009. Kizildere–new geothermal power plant in Turkey[C]//Presentation at International Geothermal Days Conference & Summer School. Slovakia, 1.
- Lewis J, Schneegans S, Straza T. 2021. UNESCO Science Report: The race against time for smarter development(Vol.2021) [M]. UNESCO Publishing, 17–29.
- Liu H J, Wang H W, Gou Y, Li M T. 2018. Investigation on social acceptance of the geothermal energy utilization in China[J]. Transactions—Geothermal Resources Council, 42: 812–824.
- Ma Bing, Jia Lingxiao, Yu Yang, Wang Huan. 2021. The development and utilization of geothermal energy in the world[J]. Geology in China, 48(6): 1734–1747(in Chinese with English abstract).
- Melikoglu M. 2017. Geothermal energy in Turkey and around the World: A review of the literature and an analysis based on Turkey's Vision 2023 energy targets[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 76: 485–492.
- MENR. 2021. Electricity[EB/OL].(2021–09–19)[2022–09–23] <https://enerji.gov.tr/infobank-energy-electricity>.
- Mertoglu O. 2005. Geothermal Applications in Turkey[C]// Proceedings world geothermal congress. Antalya, Turkey, 175–179.
- Mertoglu O, Canlan A, Bakir N, Dokuz I, Kaya T. 2000. Geothermal direct use applications in Turkey: Technology and economics[C]// Proceedings of the World Geothermal Congress, Kyushu–Tohoku, Japan, 1–3.
- Mertoglu O, Mertoglu M. 1993. Direct use of heating applications in Turkey[J]. Geothermal Resources Council Transactions, 17: 19–22.
- Mertoglu O, Simsek S, Basarir N. 2015. Geothermal country update report of Turkey (2010–2015)[C]//Proceedings World Geothermal Congress. Melbourne, Australia. 19: 25.
- Mertoglu O, Simsek S, Basarir N. 2020. Geothermal energy use: projections and country update for Turkey[C]// Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland, 1.
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China, Department of New and Renewable Energy, National Energy Administration, Institute of Science and Development, Chinese Academy of Sciences, Institute of Resources and Environmental Policy, Development Research Center of the State Council. 2018. China geothermal energy development report 2018[R]. Sinopec Press, 14 (in Chinese).
- Oliver P, Stadelmann M. 2015. Public Finance and Private Exploration in Geothermal: Gümüşköy Case Study Gumuskoy Turkey[R]. Turkey: [s.n], 3.
- UNEP. 2022. Renewables 2022 Global Status Report[R]. 108–120.
- Richter A. 2022. Think GeoEnergy's Top 10 Geothermal Countries 2021–installed power generation capacity(MWe)[OL].(2022–01–10) [2022– 8– 15]. <https://www.thinkgeoenergy.com/thinkgeoenergys-top-10-geothermal-countries-2021-installed-power-generation-capacity-mwe/>.
- Sahiller H A, Öner R N, Halaçoğlu U. 2021. How did Turkey succeed in raising public awareness and environmental protection along with geothermal developments?[C]//Proceedings world geothermal congress, 1.
- Serpen U, DiPippo R. 2022. Turkey – A geothermal success story: A retrospective and prospective assessment[J]. Geothermics, 101: 102370.
- Simsek S. 1985. Present status and future developments of the Denizli–Kizildere geothermal field of Turkey[C]//1985 International Symposium on Geothermal Energy International Volume, Hawaii USA, 203–210.
- Simsek S, Mertoglu O, Bakir N, Akkus I, Aydogdu O. 2005. Geothermal Energy Utilisation Development and Projections Country Update Report 2000– 2004 of Turkey[M]. Turkey: Antalya, 371–381.
- Tian T S, Dong Y, Zhang W, Wei J W, Jin H L, Liu Y M. 2020. Rapid development of China's geothermal industry—China national report of the 2020 World Geothermal Conference[C]//Proceedings of the 2020 World Geothermal Congress.
- Tuik. 2022. The Results of Address Based Population Registration System, 2021.(2022–02–04)[2022–11–20]. <https://www.tuik.gov.tr/>.
- Wang Guiling, Zhang Wei, Liang Jiyun, Lin Wenjing, Liu Zhiming,

- Wang Wanli. 2017. Evaluation of geothermal resource potential in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 38(4): 449–450 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lu Chuan. 2022. Progress of geothermal resources exploitation and utilization technology driven by neutralization target[J]. *Geology and Resources*, 31(3): 412–425 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Kong Yanlong, Cheng Yuanzhi. 2019. Distribution, Development and Utilization of Geothermal Resources in China[C]// *International Clean Energy Forum (Macau). International Clean Energy Industry Development Report (2019)*. China Yanshi Publishing House, 9 (in Chinese with English abstract).
- Wen Dongguang, Zhang Eryong, Wang Guiling, Zhang Linyou, Wang Huang, Zhang Senqi, Ye Chengming, Wang Wenshi, Jin Xianpeng, Liu Donglin, Jia Xiaofeng, Li Shengtao, Wu Haidong, Lian Sheng, Feng Qingda. 2023. Progress and prospect of hot dry rock exploration and development[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 50(4): 1–13 (in Chinese with English abstract).
- Zhang E Y, Wen D G, Wang G L, Yan W D, Wang W S, Ye C M, Li X F, Wang H, Tang X C, Weng W, Li K, Zhang C Y, Liang M X, Luo H B, Hu H Y, Zhang W, Zhang S Q, Jin X P, Wu H D, Zhang L Y, Feng Q D, Xie J Y, Wang D, He Y C, Wang Y W, Chen Z B, Cheng Z P, Luo W F, Yang Y, Zhang H, Zha E L, Gong Y L, Zheng Y, Jiang C S, Zhang S S, Niu X, Zhang H, Hu L S, Zhu G L, Xu W H, Niu Z X, Li Y. 2022. The first power generation test of hot dry rock resources exploration and production demonstration project in the Gonghe Basin, Qinghai Province, China[J]. *China Geology*, 5(3): 372–382.
- Zheng K Y. 2012. Geothermal power generation in China: Past and future[J]. *GRC Trans*, 36: 1133–1135.
- Zheng Keyan, Zheng Fan. 2020. Discussion on the prospect of China's geothermal power generation industry[J]. *Chinese and Foreign Energy*, 25(11):17–23(in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 陈墨香, 汪集暘, 邓孝. 1994. 中国地热资源——形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 1–38.
- 陈钦强. 2021. 国内地热资源储量、开发利用情况及技术现状[N]. 中国石油报. 4.
- 何治亮, 冯建赟, 张英, 李朋威. 2017. 试论中国地热单元分级分类评价体系[J]. *地学前缘*, 24(3): 168–179.
- 姜光政, 高棚, 饶松, 张林友, 唐晓音, 黄方, 赵平, 庞忠和, 何丽娟, 胡圣标, 汪集暘. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 59(8): 2892–2910.
- 马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢. 2021. 世界地热能开发利用现状与展望[J]. *中国地质*, 48(6): 1734–1747.
- 王贵玲, 张薇, 梁继运, 蔺文静, 刘志明, 王婉丽. 2017. 中国地热资源潜力评价[J]. *地球学报*, 38(4): 449–450.
- 王贵玲, 陆川. 2022. 碳中和目标驱动下地热资源开采利用技术进展[J]. *地质与资源*, 31(3): 412–425.
- 汪集暘, 孔彦龙, 程远志. 2019. 中国地热资源分布与开发利用[C]// *国际清洁能源论坛(澳门). 国际清洁能源产业发展报告(2019)*. 中国言实出版社, 72.
- 文冬光, 张二勇, 王贵玲, 张林友, 王璜, 张森琦, 叶成明, 王稳石, 金显鹏, 刘东林, 贾小丰, 李胜涛, 吴海东, 连晟, 冯庆达. 2023. 干热岩勘查开发进展及展望[J]. *水文地质工程地质*, 50(4): 1–13.
- 郑克棣, 郑帆. 2020. 中国地热发电产业前景探讨[J]. *中外能源*, 25(11): 17–23.
- 自然资源部中国地质调查局, 国家能源局新能源和可再生能源司, 中国科学院科技战略咨询研究院, 国务院发展研究中心资源与环境政策研究所. 2018. 中国地热能发展报告2018[R]. 中国石化出版社, 14.