

doi: 10.12029/gc20210606

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.

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).

世界地热能开发利用现状与展望

马冰, 贾凌霄, 于洋, 王欢

(中国地质调查局地学文献中心, 中国地质图书馆, 北京 100083)

摘要:地热能作为一种零碳、清洁能源,其开发利用对于碳中和具有重要价值。2015—2020年,全球新增地热发电约3649 GW,增长约27%;地热直接利用总装机容量增长52.0%。两者之和,所用热能比2015年增长72.3%。全球每年地热直接利用可防止7810万t碳和2.526亿t CO₂排放到大气中。世界地热能发展呈现五大趋势:(1)发展非常规地热系统;(2)向海上地热资源开发进军;(3)降低钻探成本与石油热能协同生产;(4)加大浅层地热能开发利用;(5)加强含水层热能储存技术研发。

关键词:地热能;地热发电;地热能直接利用;非常规地热系统;热能储存;碳达峰;碳中和
中图分类号:F426.1;TD98 **文献标志码:**A **文章编号:**1000-3657(2021)06-1734-14

The development and utilization of geothermal energy in the world

MA Bing, JIA Lingxiao, YU Yang, WANG Huan

(Geoscience Documentation Center, CGS, National Geological Library of China, Beijing 100083, China)

Abstract: As a kind of zero carbon and clean energy, the development and utilization of geothermal energy is of great value for carbon neutralization. From 2015 to 2020, the global geothermal power generation increased by about 3649 GW, an increase of about 27%. Total installed capacity of geothermal utilization increased by 52.0%. The sum of the two, the used heat energy increased by 72.3% over 2015. The direct utilization of geothermal energy in the world can prevent 78.1 million tons of carbon and 252.6 million tons of CO₂ from being emitted into the atmosphere every year. The world geothermal energy development presents the following five trends: development of unconventional geothermal system, development of offshore geothermal resources, reduction of drilling cost and cooperation of thermal energy production with petroleum, increase of the development and utilization of shallow geothermal energy, strengthening of the research and development of aquifer thermal energy storage technology.

Key words: geothermal energy; geothermal power generation; direct utilization of geothermal energy; unconventional geothermal system; thermal energy storage; carbon peaking; carbon neutralization

About the first author: MA Bing, female, born in 1967, professor, engaged in the research of mineral resources management; E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn.

Fund support: Supported by the project of China Geological Survey (No. DD20190414).

收稿日期:2021-04-19;改回日期:2021-05-28

基金项目:中国地质调查局项目(DD20190414)资助。

作者简介:马冰,女,1967年生,研究员,主要从事矿产资源管理研究;E-mail: mabing@mail.cgs.gov.cn。

1 引言

地热能是一种储量丰富、稳定可靠的零碳、清洁能源。大力开发利用地热能,对于推动CO₂等温室气体减排,实现气候目标和经济可持续发展具有重要意义(蔺文静等,2013;张薇等,2019)。目前,地热资源已成为全球新能源利用的热点。本文重点介绍世界各国地热能发电、地热直接利用的现状,并对地热能开发利用的趋势进行展望。其中世界范围内地热能开发利用数据主要是基于2020年在冰岛召开的世界地热大会。世界地热大会由国际地热协会(International Geothermal Association, IGA)主办,是全球地热资源领域政、产、学、研各方面交流最新研究成果、最新进展的重要平台(中国科学报,2019)。

2 世界2015—2020年地热发电概况

2015—2020年,全球用于电力项目的地热钻井总数为1159口,用于电力项目的地热总投资为103.67亿美元。表1列出了目前正在生产地热发电和几个被认为近期内有潜力进行地热发电的国家(Beardsmore et al., 2020; Boissavy et al., 2020; Carey et al., 2020; Goldbrunner, 2020; Lahan et al., 2020)。

图1显示了自2010年以来世界总地热发电装机容量的趋势;图2表示在2015年之前已经投产一个或多个地热发电站的国家,和过去5年间新增的装机容量数(MW);图3是每5年的百分比变化。要注意的是,到2025年预测的地热发电装机容量增长幅度略有下降,这主要是由于来自太阳能、风能和天然气等与价格相关的竞争,以及许多国家对促进新的地热开发犹豫不决(Bertani, 2015)。

值得注意的是,世界能源理事会(WEC)预测,在乐观、基准和悲观三种情景下,2015至2060年间地热的复合年增长率将分别约为5.4%、4.6%和3.4%。即使是乐观的情景,也远低于图2中2020—2025年预测的19.0%的增长率。这个增长率可能过于乐观,但这是基于各国更新报告中的规划和估计值。

尽管与许多将地热资源用于区域或空间供暖、农业和水产养殖和/或轻工业目的国家相比,现在使用地热能发电的国家或地区数量仍然很少。但令人欣慰的是,有新的国家加入了地热发电行列。自

2015年以来,这些国家包括比利时、智利、克罗地亚、洪都拉斯和匈牙利(Hoes et al., 2020)。此外,从2020年开始的十年内,阿根廷、澳大利亚、加拿大、中国、多米尼加、厄瓜多尔、希腊、伊朗、蒙特塞拉特、尼维斯、圣卢西亚、圣文森特可能会有新的地热发电或装机容量大幅增加。此外,一些非洲国家毗邻东非裂谷带,如坦桑尼亚,乌干达,卢旺达和马拉维,目前正在探索地热发电潜力。尽管这些国家对地热发电的初步探索可能规模相对较小(小于20 MW),但这种可再生能源可能占这些国家电力需求的很大一部分,并突出了国际上日益增长的绿色能源趋势。

地热总装机容量最大的国家(按降序排列)分别是:美国、印度尼西亚、菲律宾、土耳其、新西兰、墨西哥、意大利、肯尼亚、日本和哥斯达黎加。印尼拥有四座世界上最大的地热发电厂,其中Gunung Salak发电站最大,装机容量为375 MW。按照印尼计划开发更多地热资源的速度,到2027年左右,印尼有可能超越美国,成为全球地热发电市场的领导者(Gutiérrez-Negrín et al., 2020)。表2列出了截至2020年地热发电量最多的10个国家。

土耳其(1074 MW)、印度尼西亚(998 MW)、肯尼亚(599 MW)、美国(234 MW)、冰岛(73 MW)、新西兰(59 MW)、中国(19.5 MW)和德国(16 MW)这几年地热发电总装机容量显著增长。在过去5年,各国也越来越重视开发工程地热系统(Engineered Geothermal Systems, EGS)的可能性,以便开发目前困在天然渗透率较低岩石中的大量热能资源。正在进行这项工作的国家,包括美国、冰岛、英国、德国、中国、葡萄牙和荷兰(Darma et al., 2020; Ragnarsson et al., 2020.; Robertson-Tait and Harvey, 2020; Tingshan et al., 2020)。

总的看,地热资源新的和扩大利用能力的初始高风险阶段,一般由联邦政府机构、准联邦实体和国际多边贷款银行提供资金,而不是由私营企业提供资金。土耳其、菲律宾和美国是这一趋势的唯一例外。公共基金的早期介入是减轻私人投资者风险的一种方式。一旦发现了潜在资源,对其进行特征描述,并初步圈定其范围,就可以将其移交给私营部门进行确认、开发、生产和注水井钻探,发电厂设计和建设,以及将新发电量送入国家电网。由于全球经济和政治不确定性对大多数私人投资者成

表1 2015—2020年世界各国地热发电和能源生产统计
Table 1 Statistics of world geothermal power and energy generation in 2015—2020

国家	2015		2020		2025年预测值/MW	自2015年增加量/MW
	装机容量/MW	能量/(GWh/a)	装机容量/MW	能量/(GWh/a)		
阿根廷	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
澳大利亚	1.10	0.50	0.62	1.70	0.31	-0.48
奥地利	1.40	3.80	1.25	2.20	2.20	-0.15
比利时	0.00	0.00	0.80	2.00	0.20	0.80
智利	0.00	0.00	48.00	400.00	81.00	48.00
中国	27.00	150.00	34.89	174.60	386.00	7.89
哥斯达黎加	207.00	1511.00	262.00	1559.00	262.00	55.00
克罗地亚	0.00	0.00	16.50	76.00	24.00	16.50
萨尔瓦多	204.00	1442.00	204.00	1442.00	284.00	0.00
埃塞俄比亚	7.30	10.00	7.30	58.00	31.30	0.00
法国	16.00	115.00	17.00	136.00	~25	1.00
德国	27.00	35.00	43.00	165.00	43.00	16.00
危地马拉	52.00	237.00	52.00	237.00	95.00	0.00
洪都拉斯	0.00	0.00	35.00	297.00	35.00	35.00
匈牙利	0.00	0.00	3.00	5.30	3.00	3.00
冰岛	665.00	5245.00	755.00	6010.00	755.00	90.00
印度尼西亚	1340.00	9600.00	2289.00	15315.00	4362.00	949.00
意大利	916.00	5660.00	916.00	6100.00	936.00	0.00
日本	519.00	2687.00	550.00	2409.00	554.00	31.00
肯尼亚	594.00	2848.00	1193.00	9930.00	600.00	599.00
墨西哥	1017.00	6071.00	1005.80	5375.00	1061.00	-11.20
尼加拉瓜	159.00	492.00	159.00	492.00	159.00	0.00
新西兰	1005.00	7000.00	1064.00	7728.00	200.00	59.00
巴布亚新几内亚	50.00	432.00	11.00	97.00	50.00	-39.00
菲律宾	1870.00	9646.00	1918.00	9893.00	2009.00	48.00
葡萄牙	29.00	196.00	33.00	216.00	43.00	4.00
俄罗斯	82.00	441.00	82.00	441.00	96.00	0.00
土耳其	397.00	3127.00	1549.00	8168.00	2600.00	1152.00
美国	3098.00	16600.00	3700.00	18366.00	4313.00	602.00
近期有地热发电潜力的国家						
多米尼加	0.00				7.00	
蒙特塞拉特	0.00				3.00	
尼维斯	0.00				9.00	
圣卢西亚	0.00				30.00	
圣文森特	0.00				10.00	
加拿大	0.00				10.00	
希腊	0.00				30.00	
伊朗	0.00				5.00	
厄瓜多尔	0.00				50.00	
世界总计	12283.80	73549.30	15950.16	95095.80	19139.01	3666.36

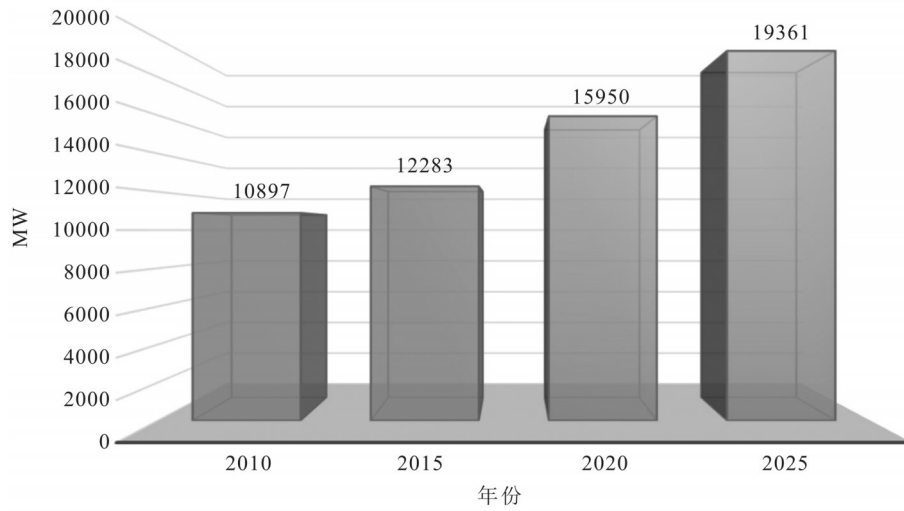


图1 2010—2025年世界地热发电总装机容量
Fig.1 World total install capacity of geothermal power generation in 2010–2025

为先驱投资者的意愿产生了负面影响,这种地热开发顺序/范式可能会持续到下一个10年(Frona et al., 2020)。

从图3可以明显看出,2020—2025年世界地热发电增长率预计为18.5%,低于过去10年间约25%的增长率。这一下降的原因可能主要是:(1)相对于地热发电,由风能、太阳能和天然气压裂供能的发电装置竞争优势较为明显,这些装置具有较低的感知风险、较短的回款期和较低的发电成本;(2)一些国家针对地热的专门政策、法律、规则和条例,出台速度缓慢;(3)由于管理制度不完善,官僚作风的拖延,大幅增加了获得土地使用权、环境保护权必须的许可证,以及最终实现勘探、开发、建造和调试地热田、发电厂和输电设施的各个环节所需的时间和成本。这可能将完成地热项目所需的时间

延长到数年,而建造和运营风力和太阳能发电站通常需要一年甚至仅需数月。

预期上述情况能够在一定程度上得到克服或至少得到改善,使国际地热发电的增长率能够恢复到过去的水平。

3 世界地热能直接利用2020年回顾

地热能直接利用是最古老、最通用和最常见热能利用形式之一。表3~表6对数据进行了汇总。

表3按地区和大陆总结了2019年世界装机容量(MW)、年能源使用量(TJ/a和GWh/a)和容量系数。截至2019年底,全球地热直接利用的总装机容量为107727 MW,比2015年增加52.0%,年复合增长率为8.7%。年总能源使用量为1020887 TJ (283580 GWh),比2015年增长72.3%,年复合增长

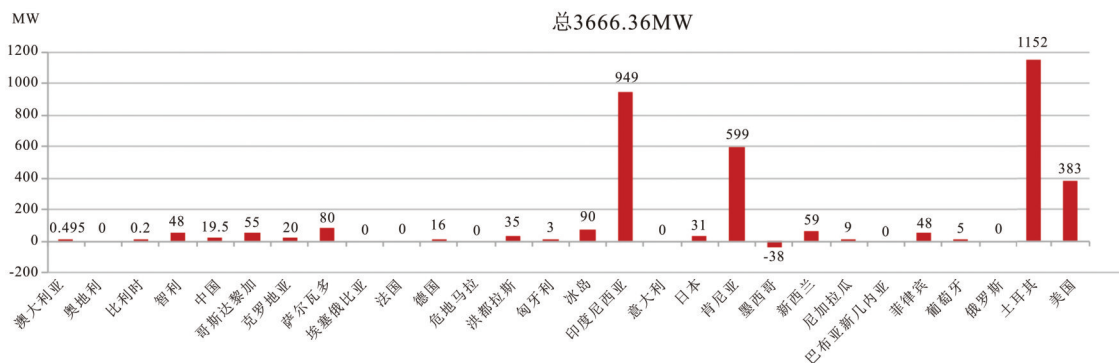


图2 以前拥有地热发电装机容量的国家自2015年以来的增量
Fig.2 MW Growth since 2015 by nations previously having installed power plants

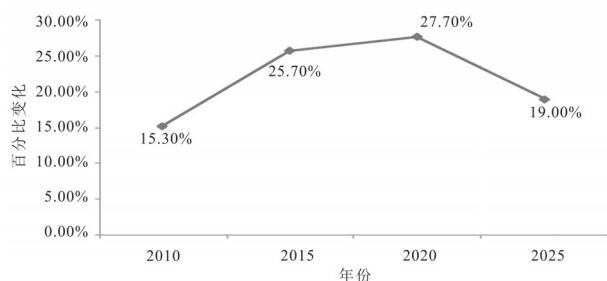


图3 2010—2025年世界地热发电总装机容量兆瓦数的百分比变化

Fig.3 changes total install capacity MW percentage of geothermal power generation in 2010—2025

率为11.5%。全球容量系数为0.300(相当于每年2628个满载运行小时),比2015年的0.265和2010年的0.28有所增加,但与2005年的0.31和2000年的0.40相比有所下降。图4总结了过去30年地热直接利用装机容量和年能源使用量的增长率(Huttrer and Gerald, 2020)。

地源热泵的日益普及对地热能的直接利用产生了最显著的影响,据报道,2020年58个国家或地区直接利用地热能,高于2015年的48个国家或地区。年装机容量增长1.54倍,复合增长率9.06%。这些机组的年能源利用量比2015年增长1.84倍,复合增长率为12.92%。这在一定程度上是由于报告数据更全面和地源热泵利用地下水或地面耦合温度的能力有所增强。地源热泵利用的前5个国家,按装机容量(MW和年能源使用量(TJ/a)),依次是:中国、美国、瑞典、德国、芬兰(表6)。据估计,全球安装了646万台热泵设备,其中这5个国家占77.4%。

直接利用(地源热泵)装机容量最大的5个国家是:中国、美国、瑞典、德国和土耳其,占世界装机容量的71.1%;地源热泵年能源利用最多的5个国家是:中国、美国、瑞典、土耳其和日本,占世界能源使用量的73.4%。然而,从土地面积或人口角度对数

表2 2020年地热发电装机容量最多的10个国家
Table 2 Top 10 countries with the most installed geothermal power capacity in 2020

国家	2020年装机容量/MW	国家	2020年装机容量/MW
美国	3700	墨西哥	1105
印度尼西亚	2289	新西兰	1064
菲律宾	1918	意大利	916
土耳其	1549	日本	550
肯尼亚	1193	冰岛	755

据进行的分析表明,国土面积较小或人口较少的国家占主导地位,尤其是北欧国家。装机容量若按照MW/千人计,前5名将依次为冰岛、瑞典、芬兰、瑞士和挪威;若按照年能源使用量(TJ/a/千人)计,前5名则为冰岛、瑞典、芬兰、挪威和新西兰(表4)。按100 km²面积的装机容量计(MW/100 km²),前5名是瑞士、荷兰、冰岛、瑞典和奥地利;按单位面积的年能源使用量(TJ/a/100 km²)计,排名靠前的国家是:冰岛、瑞士、瑞典、匈牙利和奥地利(表5)。在过去5年,地热装机容量(MW)增幅最大的前5个国家是冰岛、匈牙利、法国、埃及和澳大利亚;在过去5年地热年能源使用量(TJ/a)增幅最大的前5个国家是西班牙、也门、澳大利亚、肯尼亚和格鲁吉亚(表5)。这些增长大多是由于地源热泵的安装或更完善地报告了温泉和游泳使用。1985年报告装机容量超过100MW的国家或地区只有11个;到1995年这一数字增至14个,2000年15个,2005年23个,2010年33个,2015年36个,2020年38个国家或地区(Kallin, 2019)。

中国、土耳其、日本、冰岛和匈牙利这5个直接使用量最大国家(除地源热泵)的装机容量占世界总量的76.0%。年能源使用量(TJ/a)最大的5个国家(除地源热泵)是:中国、土耳其、日本、冰岛和新西兰,占世界总量的76.5%(表6)。

据1995至2020年世界地热大会公布的数据,世界地热直接利用显示,1995年冰岛居世界第一,但自2000年开始中国一直稳居第一位,且中国在世

表3 2019年全球地热能直接利用数据汇总
Table 3 Summary of global geothermal energy directly-used data by region and continent in 2019

地区/大陆(国家数)	MW	TJ/a	GWh/a	容量因子
非洲(11)	198	3730	1036	0.597
美洲(17)	23330	180414	50115	0.245
其中:中美洲和加勒比(5)	9	195	54	0.687
北美(4)	22700	171510	47642	0.240
南美洲(8)	621	8709	2419	0.445
亚洲(18)	49079	545019	151394	0.352
独联体(5)	2121	15907	4419	0.238
欧洲(34)	32386	264843	73568	0.259
其中:中欧和东欧(17)	3439	28098	7805	0.259
西欧和北欧(17)	28947	236745	65762	0.259
大洋洲(3)	613	10974	3048	0.568
合计(88)	107727	1020887	283580	0.300

表4 直接利用地热能(包括地源热泵,按总量和按照人口计算的全球前5个国家)

Table 4 Directly-used geothermal energy (including ground source heat pump, top five countries by total and population)

直接利用地热能(包括地源热泵)总量	
MW	TJ/a
中国(40610)	中国(443492)
美国(20713)	美国(152810)
瑞典(6680)	瑞典(62400)
德国(4806)	土耳其(54584)
土耳其(3488)	日本(30723)
按每千人计算	
MW/千人	TJ/a/千人
冰岛(7.00)	冰岛(99.10)
瑞典(0.67)	瑞典(6.22)
芬兰(0.42)	芬兰(4.23)
瑞士(0.26)	挪威(2.34)
挪威(0.21)	新西兰(2.12)

表5 直接利用地热能全球排名前5的国家(按单位土地面积和按照增幅最快计算)

Table 5 Top five countries in the world for direct use of geothermal energy (calculated by unit land area and the fastest growth rate)

按每 100 km ²	
MW	TJ/a
瑞士(5.32)	冰岛(32.62)
荷兰(4.14)	瑞士(32.18)
冰岛(1.93)	瑞典(13.86)
瑞典(1.48)	匈牙利(11.94)
奥地利(1.31)	奥地利(10.30)
增幅最快	
MW/千人	TJ/千人
乌克兰(18642)	乌克兰(4181)
西班牙(748)	西班牙(1040)
澳大利亚(487)	也门(567)
也门(400)	澳大利亚(339)
中国(127)	肯尼亚(330)

界所占的份额越来越大;2020年,中国地热直接利用的能量占世界总量的47.2%(郑克棧,2020)。

4 地热直接利用形式

表7、表8和表9对1995年、2000年、2005年、2010年、2015年和2020年的容量(MW)、能源利用(TJ/a)和容量或负荷因子(CF)数据,按地热的不同用途进行了划分。其中前6种地热能直接利用用途情况见图5。曾试图区分具体空间供暖和区域供暖,但这往往很困难,因为具体国家的报告没有作出这种区分。尽最大可能的估计结果是,区域供热占地热供热装机容量的91%,占年能源使用的59%。融雪在融雪/空调类别中占大多数(>90%)。“其他”是一个涵盖各种用途的类别,各国并未提供详细情况,但已知包括畜牧业、螺旋藻养殖和软饮料碳酸化等

方面(Lund and Freeston, 2001; Lund et al., 2006; Lund et al., 2011; Lund and Freeston, 2016)。

4.1 地源热泵

地源热泵是世界上地热利用最广泛的形式之一,按装机容量计算占总量的71.6%,按年能源使用量计算占总量的59.2%。装机容量为77547 MW,能源使用量为599981 TJ/a,供热模式下的容量系数为0.245。尽管大多数热泵安装在北美、欧洲和中国,但安装热泵的国家或地区数量已从2000年的26个增加到2005年的33个,2010年的43个,2015年的48个,2020年的54个。所安装的12 kW机组当量(美国和西欧的典型家庭)的热泵数量约为646万台。这比2015年的装机数量增加了54%,是2010年的两倍多。然而,单个单元的装机容量从住宅用的5.5 kW到商业和机构设施用大型单元的150 kW以上不等。

在美国,除北部各州外,大多数机组的规模都是针对峰值冷负荷的,并且对于供暖来说规模过大;因此,估计平均每年只有2000个等效的满载供暖小时(容量系数为0.23)。在欧洲,大多数机组都是按热负荷来设计的,并且通常按化石燃料的峰值来提供基本负荷。然而,其中一些机组的运行时间可能达到每年3000个等效满载供热小时(容量系数为0.34),例如在北欧国家(特别是芬兰)。

根据平均绩效系数(COP)3.5,用装机容量推断热泵的能量使用量(若未报告),这允许一个单位的

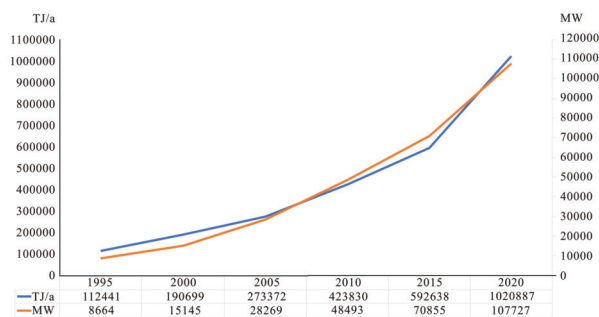


图4 1995—2020年地热直接利用装机容量及年利用量
Fig.4 The install directly-used geothermal capacity and annual utilization in 1995—2020

表6 不用热泵直接利用地热能/使用热泵装机容量的全球前5个国家

Table 6 Top five countries in the world using geothermal energy without heat pump

不用热泵直接利用地热能	
MW	TJ/a
中国(14160)	中国(197281)
土耳其(3480)	土耳其(54413)
日本(2407)	冰岛(33590)
冰岛(2368)	日本(29958)
匈牙利(952)	新西兰(9729)
使用热泵装机容量	
MW	TJ/a
中国(26450)	中国(246212)
美国(20230)	美国(145460)
瑞典(6680)	瑞典(62400)
德国(4400)	德国(23760)
芬兰(2300)	芬兰(23400)

能量输入(通常是电)产生2.5个单位的能量输出,地热组件的额定容量为71%(即 $(COP-1)/COP=0.71$)。在这种情况下,冷负荷不被视为是地热,因为热量被排放到地下或地下水中。然而,冷却在替代化石燃料和减少温室气体排放方面有着重要作用,因此将在后文加以讨论。装机容量(MW)最大的国家是:中国、美国、瑞典、德国和芬兰,占世界总量的77.4%;所生产能源(TJ/a)的主要国家也是这5个国家,占世界总量的83.5%(表6)。

4.2 空间供暖

空间供暖,包括分户供暖和区域供暖,装机容量比2015年增长68.0%,年能源使用量增长83.8%。目前总装机容量为12768 MW,年能源使用量为162979 TJ/a。相比之下,91%的装机容量和91%的年能源使用量用于区域供热(29个国家或地区)。区域供热在容量和年能源使用量方面的主要国家是中国、冰岛、土耳其、法国和德国,而在具体空间供热部门装机容量(按MW计)方面的主要国家是土耳其、俄罗斯、日本、美国和匈牙利。在年能源使用量(TJ/a)方面,领先的国家是土耳其、日本、俄罗斯、美国和瑞士,共有29个国家或地区。这些前五位主要国家约占全球区域供暖总使用量的90%,约占全球分户空间供暖的75%。

4.3 温室和地暖

全球温室地热能和地面覆盖供暖的装机容量增加了24%,年能源使用量增加了23%。装机容量

为2459 MW,能源使用量为35826 TJ/a。共有32个国家或地区报告了地热温室供暖(2015年为31个),年能源使用量(TJ/a)领先的国家是土耳其、中国、荷兰、俄罗斯和匈牙利,约占世界总量的83%。大多数国家或地区不区分温室和露天地面供暖,只有少数国家或地区报告了实际供暖面积。温室里种植的主要作物是蔬菜和花卉;然而,树苗、仙人掌和池塘里的鱼(美国)以及香蕉等水果(冰岛)也在温室生长。冰岛(蔬菜)和希腊(芦笋)使用地源热泵进行地面覆盖供暖。由于劳动力是这一部门的主要成本之一,发展中国家与较发达国家相比具有竞争优势。使用2000年世界地热大会确定的温室供暖平均20 TJ/a/hm²的能源需求标准,35826 TJ/a的能源使用量相当于全球约1791 hm²的温室供暖面积,比2015年增加了23.4%。

4.4 养殖池和电缆管道加热

水产养殖对地热的利用比2015年有所增加,装机容量增加36.5%,年能源使用量增加13.5%。装机容量为950 MW,能源使用量为13573 TJ/a。21个国家或地区报告了这种类型的地热能源使用,就年能源使用量而言,主要国家是中国、美国、冰岛、意大利和以色列——与2015年报告的国家相同,占世界年能源使用量的92%(Bargiacchi et al., 2020)。像温室一样,这些设施是劳动密集型的,需要训练有素的人员。由于这在经济上往往难以证明,因此增长缓慢。罗非鱼、鲑鱼、鲈鱼和鳟鱼似乎是最常见的养殖品种,但热带鱼、龙虾、虾和对虾以及鳄鱼也在养殖中。美国有两个主要的短吻鳄饲养设施:在爱达荷州饲养短吻鳄是为了获取其肉和皮,在科罗拉多州是一个旅游景点。基于美国的工作,估计在未覆盖池塘中使用地热水的量是0.242 TJ/a/t鱼(鲈鱼和罗非鱼)。因此,报告的这类地热能源使用量为13573 TJ/a,估计相当于56087 t年鱼类产量,比2015年增长13.5%。应该注意的是,如果鱼是在有盖池塘里养的,比如说在温室里,所需的能量大约只是这个数字的一半。然而,已知使用的有盖池塘很少。

4.5 农作物烘干

15个国家报告说,使用地热能干燥/烘干各种谷物、蔬菜和水果作物,与2015年的数字相同。实例包括海藻(冰岛)、洋葱(美国)、小麦和谷物(塞尔维亚)、水果(萨尔瓦多、危地马拉和墨西哥)、苜蓿(新西兰)、

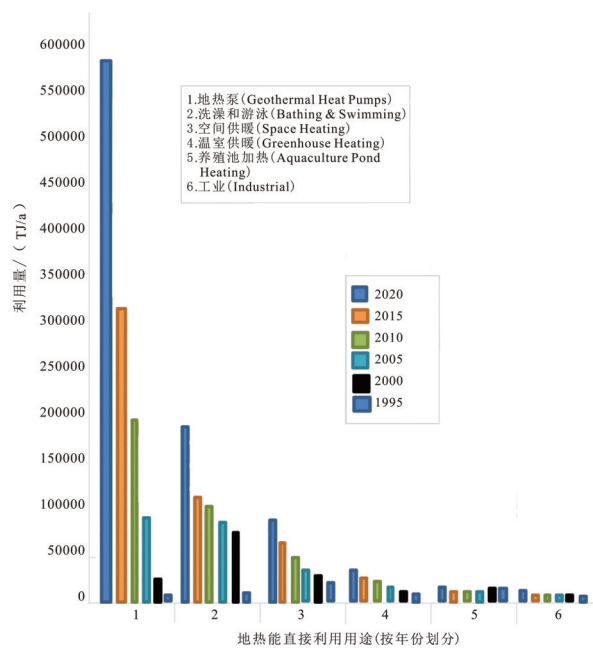


图5 1995、2000、2005、2010、2015和2020年全球地热直接利用(TJ/a)比较

Fig. 5 Comparison of worldwide directly-used geothermal energy in TJ/a in 1995, 2000, 2005, 2010, 2015 and 2020

椰肉(菲律宾)和木材(墨西哥、新西兰和罗马尼亚)。最大的用户是中国、法国、匈牙利、美国和日本,占世界使用量的94%。总利用量为257 MW和3529 TJ/a,分别比2015年增长59.6%和73.8%。

4.6 工业工艺热

14个国家或地区有这类地热的利用方式,比2015年少一个。这些作业往往规模大,能耗高,经常全年作业。例如:混凝土养护(危地马拉和斯洛文尼亚)、瓶装水和碳酸饮料(保加利亚、塞尔维亚和美国)、牛奶巴氏杀菌(罗马尼亚和新西兰)、皮革工业(塞尔维亚和斯洛文尼亚)、化学提取(保加利亚、波兰和俄罗斯)、CO₂提取(冰岛和土耳其)、纸浆和纸张加工(新西兰),碘和盐提取(越南),以及硼酸盐和硼酸生产(意大利)(Gavriliuc et al., 2020)。

装机容量852 MW,能源使用量16390 TJ/a,分别比2015年增长38.8%和56.8%。由于几乎全年都在运行,工业工艺热是所有直接用途中容量系数最高的一个,为0.610,高于2015年的0.540,但低于2010年的0.699和2005年的0.712。容量因数下降的原因尚不清楚;但是,这可能是由于更有效的运行和能源使用,或者每年的运行小时数更少。这类

地热用途按能源使用量(TJ/a)计的主要国家是:中国、新西兰、冰岛、俄罗斯和匈牙利,占世界能源使用总量的98%。

4.7 洗浴和游泳

这方面数据最难收集和量化。几乎每个国家(88个国家中有53个国家)都有温泉和度假村,设有由地热水加热的游泳池,包括用于治疗疾病的水疗馆,但许多国家从不调节水流,即使在夜间游泳池关闭时也是如此。一些国家没有记录游泳池的使用情况。因此,实际使用量和容量数字可能会减少20%。在没有流量或温度下降报告的情况下,容量和能源使用量的估计值为0.35 MW和7.0 TJ/a。在其他情况下,根据与各国相关作者的沟通,5 L/s和10℃的温度变化用于0.21 MW的装机容量,3 L/s和10℃的温度变化用于4.0 TJ/a的年使用量。未开发的天然温泉不包括在内。

除53个国家或地区(2015年有70个,2010年有67个,2005年有60个)报告了洗浴和游泳池的地热使用情况外,丹麦、法国、莫桑比克、尼加拉瓜、新加坡和赞比亚也有已知的设施,但没有相关信息。总装机容量为12253 MW,能源使用量为184070 TJ/a,分别比2015年增长35.1%和53.9%。还包括了使用温泉水洗澡的日式酒店的热水池。据报道,中国、日本、土耳其、巴西和墨西哥每年用于洗浴和游泳的这类地热能源使用量最大,占全年能源使用量的79.5%。

4.8 融雪与空间降温

这一领域的应用很少,主要是路面融雪工程。在冰岛、日本、阿根廷、美国和斯洛文尼亚,街道和人行道的融雪都在用地热处理,波兰和挪威的情况也如此。据估计,全球有250 km²的路面被加热,其中大部分在冰岛(74%)。阿根廷的一个项目利用地热蒸汽融化安第斯山脉的公路积雪,使一个度假社区在冬季保持开放。在美国,大部分路面融雪用于俄勒冈州理工学院校园和克拉马斯瀑布市,是区域供热系统的一部分,利用热交换器中的低温回水与乙二醇-水混合物来融化人行道和桥面上的积雪。所需功率从130 W/m²到180 W/m²不等(美国和冰岛)。融雪装机容量为415 MW,能源使用量为2389 TJ/a,比2015年略有下降。

7个国家采用了空间冷却(空调)的地热能利用,保加利亚是领先国家,其次是巴西、澳大利亚、

表7 1995—2020年地热直接利用各类用途的兆瓦数汇总
Table 7 Summary of MW for various categories of directly-used geothermal energy in 1995–2020

用途	容量/MW					
	2020	2015	2010	2005	2000	1995
地源热泵	77547	50258	33134	15384	5275	1854
空间供暖	12768	7602	5394	4366	3263	2579
温室供暖	2459	1972	1544	1404	1246	1085
养殖塘加热	950	696	653	616	605	1097
农业干燥	257	161	125	157	74	67
工业用途	852	614	533	484	474	544
沐浴和游泳	12253	9143	6700	5401	3957	1085
冷却/融雪	435	360	368	371	114	115
其他	106	79	42	86	137	238
总计	107727	70885	48493	28269	15145	8664
五年增长率/%	52.0	46.2	71.5	86.7	74.8	

表8 1995—2020年地热直接利用各类用途的TJ/a数汇总
Table 8 Summary of TJ/a for various categories of directly-used geothermal energy in 1995–2020

用途	能源使用量/(TJ/a)					
	2020	2015	2010	2005	2000	1995
地源热泵	599981	326848	200149	87503	23275	14617
空间供暖	162979	88668	63025	55256	42926	38230
温室供暖	35826	29038	23264	20661	17864	15742
养殖塘加热	13573	11953	11521	10976	11733	13493
农业干燥	3529	2030	1635	2013	1038	1124
工业用途	16390	10454	11745	10868	10220	10120
沐浴和游泳	184070	119611	109410	83018	79546	15742
冷却/融雪	2589	2596	2126	2032	1063	1124
其他	1950	1440	955	1045	3034	2249
总计	1020887	592638	423830	273372	190699	112441
五年增长率/%	72.3	39.8	55.0	43.4	69.6	

斯洛文尼亚、阿尔及利亚、阿尔巴尼亚和印度,总计19.9 MW和200.1 TJ/a。冷却模式中的热泵不包括在内,因为它们只将热量返回地下,因此不使用地热能。两种用途的总量分别为:434.9 MW和2589.1 TJ/a。

4.9 其他用途

这类地热用途106 MW和1950 TJ/a,分别比2015年高34.2%和35.4%。14个国家报告了这些数值,其中包括畜牧业、螺旋藻养殖、海水淡化和消毒。使用量最大的是新西兰,用于灌溉、防冻和地热旅游公园,其次是日本(烹饪)和肯尼亚(沸水)。

确定了每个国家和每个用途类别(表4)的平均容量因子。不同国家的标准值在0.07~1.00,不同使用类别的标准值在0.189~0.610。较低的值通常指地源热泵使用占主导地位的国家(比利时、丹麦、埃

表9 1995—2020年地热直接利用各类用途的容量因子
Table 9 Summary of capacity factors for various categories of geothermal energy direct-use in 1995–2020

用途	容量因子					
	2020	2015	2010	2005	2000	1995
地源热泵	0.245	0.206	0.192	0.180	0.140	0.250
空间供暖	0.405	0.370	0.371	0.401	0.417	0.470
温室供暖	0.462	0.467	0.478	0.467	0.455	0.460
养殖塘加热	0.463	0.545	0.559	0.565	0.615	0.390
农业干燥	0.435	0.400	0.415	0.407	0.445	0.532
工业用途	0.610	0.540	0.699	0.712	0.684	0.590
沐浴和游泳	0.473	0.415	0.518	0.487	0.637	0.310
冷却/融雪	0.189	0.229	0.183	0.174	0.296	0.310
其他	0.584	0.578	0.721	0.385	0.702	0.300
总计	0.300	0.265	0.277	0.307	0.399	0.412

及、荷兰、沙特阿拉伯和乌克兰)(Hoes et al., 2020; Lashin, 2020),而较高的值则指工业使用量较高的国家(新西兰)或游泳池持续运行的国家(阿尔及利亚、东加勒比群岛、伊朗、肯尼亚、马达加斯加和墨西哥)。由于使用量少,融雪/冷却的容量因子也很低,为0.189。

全球容量因子从2015年的0.265增加到2020年的0.300,但和2010年几乎相同,比2005、2000和1995年有所下降。这些变化是各种因素造成的,但主要是地源热泵、空间供暖以及洗浴和游泳用途的增加。

容量因子(CF)计算公式如下:[(能源使用量, TJ/a)/(装机容量, MW)] × 0.0317。该数字反映了每年等效满载运行小时数的等效百分比(即,如果CF=0.70,则相当于每年6132个满载运行小时数(8760 × 0.70))。

5 利用地热节省了多少化石能源?

地热是一种可持续和可再生能源的无碳“国产”能源,可以替代其他形式的能源使用,特别是化石燃料。对许多国家来说,地热能减少了其对进口燃料的依赖,对所有国家来说,地热能意味着消除碳颗粒和温室气体等污染物。本文试图量化使用地热能对化石燃料的节省,如果用于发电,则效率系数为0.35,如果直接用于产生热量,如在熔炉中,则效率系数为0.70。

使用2020年地热直接应用消耗的1020887 TJ/a能源,每桶燃料油为61.5亿焦,燃料用于发电,则每年可节省4.74亿桶或6440万t石油。4.74亿桶相当于1.6 d的全球石油消费量。

利用美国能源部劳伦斯利弗莫尔国家实验室等的数据,碳、CO₂、SO_x、NO_x将实现以下能源节省(表10)。与用电相比,天然气、石油和煤炭的碳排放量分别为20.32 t/TJ、86.81 t/TJ、100.82 t/TJ,总碳排放量分别减少约1481万t、6338万t和7362万t。同样,在用天然气、石油和煤炭发电时,分别用193 kg/MW时(53.6 t/J)、817 kg/MW时(227.0 t/J)和953 kg/MW时(264.7 t/J)排放CO₂,可减少CO₂排放量5427万t、2.2988亿t和2.6807亿t。利用天然气、石油和煤炭发电的SO_x的减排量分别为33万t、139万t和151万t,NO_x减排量分别为1406万t、4222万t和4576万t。如果通过燃烧这些燃料产生热量,那么碳、CO₂、SO_x、NO_x的排放量将是这些数值的一半。同样,由于用于取暖和发电的是混合化石燃料,因此实际减少的排放量将介于这些数值之间。

如果考虑地源热泵冷却方式的减排,这不是地热,那么这相当于每年额外减少约1.22亿桶(1810万t)燃料油,以及燃烧燃料油发电产生的1550万t碳污染。这假设每年用于冷却的能量大约是用于加热模式的一半。表10汇总了上述数字。

6 2015—2019年间钻探的地热井数

据报道,2015—2019年,42个国家或地区钻探约2647口地热井用于地热发电和直接使用。这些数字不包括浅层热泵井,但可能有大约20000口井深达100 m。这一数字比2010—2014年增长3.6%(也是42个国家或地区),平均63口井。超过100多口地热井的国家包括中国、土耳其、肯尼亚、印度尼西亚和哥斯达黎加(按降序排列)。从井的类型来看,发电井占43.2%,直接利用井占40.5%,热电联产井占8.7%,研究井或梯度井占7.6%。42个国家或地区的地热钻井总深度为4464 km,平均1.69 km,而2010—2014年每口井的平均钻井深度为4.30 km;然而,直接利用地热井的平均深度将更小。在此期间地热井钻探超过100 km以上的国家包括:中国、肯尼亚、土耳其和印度尼西亚(按降序排列);中国钻进总进尺1624 km。以下是各大洲的情况:非洲4个国家或地区占15.0%(396口地热井);美洲9个国家或地区占10.5%(278口井);亚洲9个国家或地区占58.0%(1537口井);欧洲18个国家或地区占12.2%(322口井);大洋洲2个国家或地区占4.3%(114口井)。

7 2015—2019年世界地热发电和直接利用的总投资

据报道,2015—2019年,53个国家或地区对地热能的总投资约为222.62亿美元,分别用于电力(64%)和直接利用(36%),比2010—2014年(49个国家或地区)的投资额高出约11.1%。平均每个国家4.2亿美元,投资超过5亿美元的国家是印度尼西亚、土耳其、中国、肯尼亚、韩国、墨西哥、智利和意大利(按降序排列,Chandrasekharam and Chandrasekha, 2020)。投资类别:16个国家或地区27.9%用于发电,30个国家或地区15.4%直接利用,33个国家或地区32.4%用于地热田开发,包括生产钻井和地面设备,47个国家或地区24.3%用于研发,包括地表勘探和勘探钻井。表11列出了地热直接利用对一些国家经济的重大贡献。以下是各大陆的地热投资情况:非洲7个国家或地区占6.3%(14.12亿美元);美洲11个国家或地区占10.2%(22.75亿美元);亚洲11个国家或地区占74.2%(165.06亿美元);欧洲22个国家或地区占8.7%(19.26亿美元);大洋洲2个国家或地区0.6%(1.43亿美元)。

一些国家是直接使用地热流体的主要生产国和消费国(中国、美国、瑞典、土耳其、日本、德国、冰岛、芬兰、法国和加拿大);然而,在大多数国家,这项工作却发展缓慢。这并不奇怪,因为化石燃料是其主要的竞争对手。另一个障碍是地热项目初期的投资成本很高。然而,许多国家一直在做必要的基础工作,进行清查并量化其资源,以便在经济形势好转,政府和私人投资者能够看到开发国内可再生能源的好处之后,为重新发展做好准备。许多东非国家,如吉布提、厄立特里亚、马拉维、莫桑比克、卢旺达、坦桑尼亚、乌干达、赞比亚和津巴布韦,都有与非洲裂谷有关的潜在地热资源。表12显示了各大洲地热利用的分布情况,表明亚洲和欧洲居领先地位,88个国家或地区中,57个国家或地区占全球装机容量(MW)的77.0%和直接利用(TJ/a)能力的80.6%。

随着人们对地源热泵越来越感兴趣,现在很明显的是,地热能可以在任何地方开发,用于供热和制冷。热泵目前占装机容量(MW)的72.0%和年能源使用量(TJ/a)的58.8%。自2015年以来,这一用途有所增加。中低温地热资源也被用于热电联产

发电(CHP),通常温度低于100℃的热水首先流经二元(有机朗肯循环)发电厂,然后级联用于空间供暖、游泳池、温室、工业应用和/或养殖池加热,然后再注入含水层。热电联产项目当然可以最大限度地利用资源,同时提高投资回报率。在冰岛、奥地利和德国以及美国俄勒冈州理工学院校园中的相关项目都印证了这一点。

8 世界地热能开发利用展望

8.1 发展非常规地热系统(UGS)

非常规地热系统(UGS)有3种主要类型:干热岩系统(HDR)、增强型地热系统(EGS)和超临界地热系统(SGS)。

干热岩系统是通过向热的渗透性岩石中钻孔形成的人造地热系统(关键等,2021):由高压水力压裂获得必要的渗透性。在20世纪的最后25年间,对于干热岩中地热能进行了多次尝试,包括在美国新墨西哥州的Fenton Hill、英国的Rosemanowes和日本的Ogachi地区开展的试验。但这些都还不够成功,不足以维持继续研究的投资。目前,中国地质调查局在青海共和盆地开展干热岩勘探开发工作,取得较大进展(张森琦等,2018; Wang et al., 2018; Feng et al., 2018)。

最近几年,提出了增强型地热系统(EGS)理论,并且,对其关注开始增加。增强型地热系统(EGS)是一种地热储层,通过水力、热力或化学刺激在最初的低渗透岩石中形成流体连通性,从而实现低渗透传导岩石的经济利用(Huenges, 2016)。与干热岩HDR系统不同,EGS系统不仅在地壳中呈异常高温,而且具有一些原生渗透性,需要增强方可生产。EGS制造或使用裂缝网络,利用通过这些网络的地表循环水来回收地下热能。注入的水通过与地下的热岩石接触

而被加热,并通过生产井在地表回采。

EGS技术的商业化可以释放数千兆瓦的电力(Bronicki, 2016)。例如,美国EGS的技术潜力估计为100 GW,是美国现有地热发电装机容量的30多倍。EGS技术没有大规模运行,但是有少数成功的工厂正在运行中。例如,在法国Soulz-sous-Forêts,一个3 MW的工厂在200℃的温度下从5km深的花岗岩基底岩石中进行生产。澳大利亚的Cooper盆地项目引发了各界的兴趣,因为许多公司正在试图对一个埋藏在热源(花岗岩巨大块体)下巨大沉积盆地中4~5 km、超过200℃的地热储层进行增强。如果成功的话,地热能将可以迅速成为澳大利亚的主要电力来源。英国正在其康沃尔的雷德鲁斯(Redruth)开发EGS,有潜力产生10 MW的电力和55 MW的热能(用于当地配电)。美国正在积极开展EGS技术的研究项目。FORGE项目位于犹他州米尔福德郊外,是美国旨在推进EGS技术的最重要项目之一。该项目由美国能源部提供高达1.4亿美元的资金。

中国陆区地下3~10 km范围内干热岩资源量折合标准煤856万亿t。中国干热岩分为高热流花岗岩型、沉积盆地型、近代火山型、强烈构造活动型4种类型。中国干热岩的勘查开发利用工作起步较晚,起步于“十二五”期间,目前已初步评估了陆区干热岩资源,下一步应围绕有利靶区,开展干热岩开发试验工作,实现相关技术突破(王贵玲等, 2020)。超临界地热系统在地热能生产的未来发展中也具有重要作用。在温度超过374℃、压力超过22.1 MPa的条件下,水达到超临界状态。对于超临界流体井而言,单位体积之能量产出可以是常规高温系统能量产出的5~10倍。符合这样条件的地热系统被称为超临界地热系统(SGS)。已经发现在冷

表10 世界范围内直接利用地热能节约的能源、碳和温室气体,包括冷却模式地源热泵

Table 10 Worldwide saving energy, carbon and greenhouse gases using geothermal energy including geothermal heat pumps in the cooling mode in terms of fuel oil

	燃料油/ 百万吨石 油当量	碳/百万 吨当量	CO ₂ /百万 吨当量	SO _x /百万 吨当量	NO _x /百万 吨当量
用于电力	81.0	78.1	252.6	1.75	0.054
用于燃油	40.5	39.0	126.3	0.89	0.027

表11 地热能直接利用对一些国家经济的重大贡献

Table 11 Significant Contribution of directly-used geothermal energy to a country's economy

冰岛	为90%的建筑空间供暖
日本	2000家温泉浴场,5000家公共浴场,1500家酒店,每年接待1500万客人
瑞典	40%的建筑使用地源热泵供暖
瑞士	已安装110000台地源热泵(约3.7台/km ²)
突尼斯	244公顷供热温室
土耳其	17个城市116000套公寓/住宅供暖——接近40%的单元
美国	约有168.5万台地源热泵(每年增长4.0%)

侵入体中或附近的高温地热系统可以达到非常高的温度。例如在冰岛的几个高温系统中超过2000 m深处已经观测到达到340℃的温度。对温度-深度曲线的保守外推表明,预测在4~5 km深处地热的温度将超过400℃,并且压力(假定为静水压力)也将足够高,可以形成超临界条件。此外,由频繁地震所揭示的扩张应力场和断裂地层表明,在最新的裂缝系统中应该存在相当大的渗透性。基于这些信息,组成了一家由各利益相关者组成的名为冰岛深钻计划(IDDP)的财团,准备在冰岛高温系统中钻3个4~5 km的深井,旨在探索SGS并开发利用热流体发电的方法。IDDP由国际大陆钻探计划和美国国家科学基金会支持。2008年年底,开始在冰岛北部克拉布拉火山(Krafla)地热系统中钻第一口井。IDDP项目总体目标是查明超临界流体能否在可钻探深度获取,并证明它可以用来发电。主要科学目标是,揭示地热系统中超临界流体的物理-化学性质,找出超临界流体将地热系统与岩浆热源相联系的方式,解决超临界流体在岩浆-流体界面是怎样影响岩石的化学和矿物蚀变、裂缝延伸、渗透率和流体流动等问题,评估通过地表勘探确定超临界系统的方法。这个实验的时间表约为十几年,如果成功的话,将会有巨大潜力用于其他高温地热系统。

8.2 向海上地热资源开发进军

目前人们正在努力了解如何开发位于近海的地热资源。例如在爱尔兰海岸以北的Dunquin开展的项目通过大口径水平井每天能够生产10万桶水,这种流体在海底的温度可达100℃,发电潜力可达10 MW/井。然而,为了使该项目取得成果,必须开发可部署在海底的涡轮/发电机技术。

大洋中脊由一条5万多千米长的洋底连续山链

构成。这里是热地幔物质从地幔上涌,并在脊峰深度较浅处形成侵入体的地方。扩张构造环境引发张性断裂,并可观测到强热液循环正在海底形成热泉。在海底深处大洋中脊的热泉以“黑烟囱”著称,已经测得那里的温度超过370℃。大洋中脊下具有巨量能源储量。近年来深海石油和天然气开采技术发展迅速。因此,未来大洋中脊地热能的生产在技术上和经济上将有可能是可行的。

8.3 降低钻探成本与石油热能协同生产

据估计,钻探约占新的高温地热发电项目总成本的40%,目前正在考虑采用一系列技术来提高钻井中的钻速(缩短钻井时间),以便更容易地在较深的深度进行钻井,并降低钻井成本。这些技术包括散裂钻削、激光钻削和等离子钻削等方法。这些技术都还没有商业化。

在未来,人们还可能会越来越重视利用水中的热能,这种能源是与油井中的石油“协同生产”的。随着油井的成熟,许多油井会产生大量的水(水比油多得多)。Liu et al.(2018)提出了一种审查油气藏发电潜力的筛选方法(从流量、井口温度、含水率、储层温度、渗透率、孔隙度等方面)。Liu et al.提出了一个案例研究,这意味着 Villafortuna-Trecate 油田的单口井10年内可以生产25 GWh的电力,净现值高达100万欧元。

8.4 加大浅层地热能的开发利用

为建筑物提供供暖制冷是浅层地热能开发的主要作用(王婉丽等,2017)。在不同类型的地热能中,浅层地热能被认为是低的焓或极低的焓(因为位于500m深度的浅层土壤温度较低),与传统的空调和热水系统相比,这种地热能可节省70%的能源。因此,这是该行业的脱碳技术之一。浅层地热能是一种可再生能源,具有很大的节能和减少污染的潜力,并且相对容易开采,不需要运输。在碳中和目标和居住与供暖面积不断增加的背景下,浅层地热能可以发挥重要作用。欧盟第2010/31号指令要求,各成员国必须确保,2018年12月31日后所有被地方政府占用和拥有的新建筑几乎为零能耗,应该主要由可再生能源来提供保障。

中国浅层地热能开发利用近年来年均增长速度在28%以上,336个地级以上城市规划区范围内浅层地热能资源年可采量折合标准煤7亿t。随着

表12 各大洲地热能直接利用的分布情况

Table 12 Distribution of directly-used geothermal energy utilization by continents

大陆	直接利用国家 或地区个数	占MW的%	占TJ/a的%
非洲	11	0.2	0.4
美洲	17	21.7	17.7
亚洲	19	45.6	53.4
欧洲,包括独联体 国家的格鲁吉亚、 俄罗斯和乌克兰	38	31.9	27.4
大洋洲	3	0.6	1.1

城镇化进程的发展,浅层地热的利用空间还会进一步扩大(王贵玲等,2020)。

8.5 加强含水层热能储存技术研发

含水层储热的基本原理涉及一双井,含水层并不构成一种能量资源,相反,它仅仅是一个储存热能的手段,这些热能来自各种非CO₂排放源:从发电厂、废弃物焚烧、太阳能、热泵等中回收的热能。与其他热能储存模式如建在地表的热储库相比,储存在含水层中成本可以更低,土地占用更少,在城市地区占地少是一个关键因素。

在德国(柏林国会大厦,新勃兰登堡)和比利时(鲁汶,KBC银行)有几个项目使用了含水层储存(或冷能)热能。这两个案例都取得了成功。例如,在柏林国会大厦项目中回收了70%以上的热。在法国,一些供热系统已经开始从生活垃圾焚烧厂回收热。另一种设计是将传统的太阳能集热器夏天收集的热储存在含水层中。类似这些系统可以将完全不使用化石燃料变为可能。

含水层热能储存是一种能够确保季节性储存所需能量的手段,可供建筑业(供暖和生活热水系统)充分利用非CO₂排放能源。要想成功必须进行大量研发工作。存在众多亟待解决的问题,其中比较关键的是:井位的合理选择、储层岩石非均匀性的表征、监控存储系统演变、防止腐蚀和矿物沉淀、保持使用中的岩石渗透性,以及经济可行性和损失最小化。法国地质调查总局参与的GEOSTOCAL项目旨在克服这些科学难题,确保巴黎盆地工业尺度上热能储存方案的可行性。

9 结 论

(1)全球地热能分布广泛,地热发电与地热能直接利用呈明显上升趋势。2020年世界地热发电总装机容量为15950 MW,比2015年增加约27%。截至2019年底,全球地热直接利用的总装机容量为107727 MW,比2015年增加52.0%;年总能源使用量为1020887 TJ(283580 GWh),比2015年增长72.3%。

(2)地热是最重要的洁净能源之一,是未来碳中和首选能源。未来应加强非常规地热系统相关研究,采用新技术降低钻探成本并实现石油热能协同生产,加大浅层地热能开发利用,加强海上地热资源开发与含水层热能储存的技术研发,扩大地

热能开发范围,提高地热能利用水平。

(3)加强地热勘探、开发、利用技术研究,制定有效的扶持与监管政策,积极开展跨部门合作,实现产学研结合。同时要加强监测,注重节能环保,使地热产业链进入良性循环,实现可持续发展。

References

- Bargiacchi E, Conti P, Manzella A, Vaccaro M, Cerutti P, Cesari G. 2020. Thermal uses of geothermal energy, country update for Italy[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Beardsmore G, Davidson C, Payne D, Pujol M, Ricard L. 2020. Australia country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik: WGC.
- Bertani R. 2015. Geothermal power generation in the world 2010–2014 update report[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2015. Melbourne: WGC.
- Boissavy C, Schmidle-Bloch V, Pomart A, Lahlou R. 2020. Country update France[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Bronicki L Y. 2016. Geothermal power generation—Introduction to geothermal power generation[M]. Woodhead Publishing: 1–3.
- Carey B, Daysh S, Doorman P, Luketina K, White B, Zarrouk S. 2020. 2015–2020 New Zealand country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Chandrasekharam D, Chandrasekha V. 2020. Geothermal energy resources of India: Country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- China Science Daily. 2019–12–02/2021–04–25. China successfully bid for the World Geothermal Conference for the first time[EB/OL]. <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2019/12/351616.shtm> (in Chinese).
- Darma S, Imani, Y L, Shidqi N A, Dwikorianto T, Daud Y. 2020. Country update: The fast growth of geothermal energy development in Indonesia[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Energy.gov. 2021–04–20/2021–04–20. FORGE[EB/OL]. <https://www.energy.gov/eere/forge/forge-home>.
- Feng Yanfang, Zhang Xiaoxu, Zhang Bo, Liu Jiangtao, Wang Yanggang, Jia Delong, Hao Lirong, Kong Zhaoyu. 2018. The geothermal formation mechanism in the Gonghe Basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. China Geology, 1: 331–345.
- Fronza A, Lazaro V, Halcon R. 2020. Geothermal energy development: The Philippines country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Gavriliuc R, Rosca M, Bendea C, Antal C, Cucueteanu D. 2020. Geothermal energy in Romania – Country update 2015–2019[C]//

- Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Goldbrunner J E. 2020. Austria – Country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Guan Jian, Fang Shi. 2021. Concept and heat transfer mechanism of geothermal system: A review[J]. *Geology and Resources*, 30(2): 207–213,206 (in Chinese with English abstract).
- Gutiérrez–Negrín, Luis C A, Canchola Félix, Ismael, Romo–Jones, Quijano–León J M, José L. 2020. Geothermal energy in Mexico: Update and perspectives[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Hoes H, Dupont N, Lagrou D, Petitclerc E. 2020. Status and development on geothermal energy use in Belgium[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Huenges E. 2016. Geothermal Power Generation——Enhanced Geothermal Systems: Review and Status of Research and Development[M]. Woodhead Publishing: 743–761.
- Huttrer G W. 2020. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Kallin J. 2019. Geothermal energy use, Country update for Finland[C]// Proceedings European Geothermal Congress 2019. The Netherlands: EGC.
- Lahan M, Villafuerte G, Stevens L. 2020. Geothermal energy resources of Papua New Guinea: Country update[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Lashin A. 2020. Review of the geothermal resources of Egypt: 2015–2020[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 40(1): 312–321(in Chinese with English abstract).
- Liu Xiaolei, Gioia Falcone, Claudio Alimonti. 2018. A systematic study of harnessing low–temperature geothermal energy from oil and gas reservoirs[J]. *Energy*, 142(1): 346–355 (in Chinese with English abstract).
- Lund J W, Boyd T J. 2016. Direct utilization of geothermal energy 2015 worldwide review[J]. *Geothermics*, 60: 66–93.
- Lund J W, Freeston D H, Boyd T J. 2006. Direct applications of geothermal energy, 2005 Worldwide Review[J].*Geothermics*, 34: 691–727.
- Lund J W, Freeston D H, Boyd T J. 2011. Direct utilization of geothermal energy 2010 Worldwide Review[J]. *Geothermics*, 40: 159–180.
- Lund J W, Freeston D H. 2001. World–wide direct uses of geothermal energy 2000[J]. *Geothermics*, 30: 29–68.
- Lund J W, Toth A N. 2021. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. *Geothermics*, 90: 1–37.
- Ragnarsson Á, Steingrímsson, Thorhallsson S. 2020. Geothermal development in Iceland 2015– 2019[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Robertson–Tait A, Harvey W. 2020. The United States of America country update – Electric power generation[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Rosalind Archer. 2020. Future Energy (Third Edition) [M]. Elsevier, 431–445.
- Tingshan T, Wei Z, Wei J, Huali J. 2020. Geothermal country update of China[C]// Proceedings World Geothermal Congress 2020. Reykjavik: WGC.
- Wang Guiling, Liu Yanguang, Zhu Xi, Zhang Wei. 2020. The status and development trend of geothermal resources in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 27(1):1–9(in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Zhang Wei, Ma Feng, Lin Wenjing, Liang Jiyun, Zhu Xi. 2018. Overview on hydrothermal and hot dry rock researches in China[J]. *China Geology*, 1, 273–285.
- Wang Wanli, Wang Guiling, Zhu Xi, Liu Zhiming. 2017. Characteristics and potential of shallow geothermal resources in provincial capital cities of China[J]. *Geology in China*, 44(6): 1062–1073(in Chinese with English abstract).
- Zhang Senqi, Yan Weide, Li Dunpeng, Jia Xiaofeng, Zhang Shengsheng, Li Shengtao, Fu Lei, Wu Haidong, Zeng Zhaofa, Li Zhiwei, Mu Jianqiang, Cheng Zhengpu, Hu Lisha. 2018. Characteristics of geothermal geology of the Qiabuqia HDR in Gonghe Basin, Qinghai Province[J]. *Geology in China*, 45(6): 1087–1102. (in Chinese with English abstract).
- Zhang Wei, Wang Guiling, Liu Feng, Xing Linxiao, Li Man. 2019. Characteristics of geothermal resources in sedimentary basins[J]. *Geology in China*, 46(2): 255– 268 (in Chinese with English abstract).
- Zheng Keyan. 2020. Geothermal utilization in China: World famous but promising[J].*China Electric Power*, (10): 23– 25 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 关键, 方石. 2021. 地热系统的概念与传热机制综述[J]. *地质与资源*, 30(2): 207–213, 206.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312–321.
- 王贵玲, 刘彦广, 朱喜, 张薇. 2020. 中国地热资源现状及发展趋势[J]. *地学前缘*, 27(1):1–9.
- 王婉丽, 王贵玲, 朱喜, 刘志明. 2017. 中国省会城市浅层地热能开发利用条件及潜力评价[J]. *中国地质*, 44(6): 1062–1073.
- 张森琦, 严维德, 黎敦朋, 贾小丰, 张盛生, 李胜涛, 付雷, 吴海东, 曾昭发, 李志伟, 穆建强, 程正璞, 胡丽莎. 2018. 青海省共和县恰卜恰干热岩体地热地质特征[J]. *中国地质*, 45(6): 1087–1102.
- 张薇, 王贵玲, 刘峰, 邢林啸, 李曼. 2019. 中国沉积盆地型地热资源特征[J]. *中国地质*, 46(2): 255–268.
- 郑克棣. 2020. 中国地热利用: 虽已享誉世界 但仍大有可为[J]. *中国电业*, (10): 23–25.
- 中国科学报. 2019–12–02/2021–04–25. 中国首次成功申办世界地热大会 [EB/OL]. <http://news.sciencenet.cn/sbhtmlnews/2019/12/351616.shtml>.