

全球地热能的开发利用现状与展望

汪集暘¹, 庞忠和¹, 程远志¹, 黄永辉², 姜光政³, 陆振能⁴, 孔彦龙¹

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

2. 中国石油大学(北京)地球科学学院, 北京 102249

3. 成都理工大学能源学院, 成都 610051

4. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510651

摘要 地热能作为一种非碳基、清洁能源, 具有稳定连续输出的优势, 对实现“碳达峰”和“碳中和”的发展目标具有重要价值。地热能的利用通常分为地热发电、直接利用和地热储能。自2010年以来, 全球地热直接利用呈指数增长, 地热直接利用装机容量和年利用热量分别约为108 GWt和283580 GWh, 中国在地热直接利用方面长期保持世界第一。热泵系统呈现每年约16%的指数增长, 地源热泵系统在全球地热直接利用的装机容量和利用热量中占比分别约为72%和60%。受高温地热资源利用技术的制约, 2010—2020年地热发电的年均增长率约为4%。地热储能作为地热利用的前沿领域, 欧洲和美国分别部署“HEATSTORE”和“Geothermal Battery”储能项目。中国科学院地热团队承担的地热储能项目也已进入技术研发和示范工程建设。地热储作为巨大的天然能源储库, 最适宜在多能互补系统中承担蓄能和实现热能稳定输出的功能, 可以把其他能源跨季节储蓄起来, 实现高效规模化跨季节储能, 提高能源的利用效率, 助力实现“碳达峰”和“碳中和”目标。

关键词 地热能; 资源分布; 地热储能

来自地球内部的本土能源的地热能是一种洁净的可再生能源。与风能、太阳能等可再生能源相比较, 地热能的巨大优势在于能量的稳定连续输出, 国际可再生能源组织(IRENA)《可再生能源发电成本》报告显示, 2007—2021年, 地热发电的能源利用系数在70%~90%^[1]。“十四五”时期是中国推

动经济高质量发展和实现“双碳”阶段性目标的关键时期, 在加强大气雾霾治理力度、积极应对全球气候变暖趋势、主动承担温室气体减排责任的大环境下, 地热能已成为各地争相开发利用的重要新能源之一。

自2010年以来, 全球地热能利用快速增长, 地

收稿日期: 2022-11-02; 修回日期: 2022-12-09

基金项目: 中国科学院学部咨询评议项目(2020-DX03-B-007); 中国科学院学部前沿交叉研判项目(XK2022DXA002)

作者简介: 汪集暘, 中国科学院院士, 研究员, 研究方向为地热学, 电子信箱: jywlpx@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 汪集暘, 庞忠和, 程远志, 等. 全球地热能的开发利用现状与展望[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 5-11; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.001

热直接利用装机容量和年利用热量分别约为 108 GWt 和 283580 GWh, 中国在地热直接利用方面长期保持世界第一^[2]。地源热泵系统在全球地热直接利用的装机容量和利用热量中占比分别约为 72% 和 60%。1995—2020 年, 热泵系统呈现每年约 16% 增长率的指数增长趋势, 预计这一趋势将在未来持续下去。截止到 2020 年, 全球地热发电的总装机容量为 15.9 GWe, 年发电量为 73550 GWh^[3]。2010—2020 年, 地热发电的年平均增长率约为 4%。

本文在综述全球地热能开发利用现状的基础上, 从地热资源分布、地热发电利用、地热直接利用和地热储能等方面入手, 对全球地热能开发利用的发展趋势和新技术研发方向进行了梳理。在总结全球地热开发利用经验的同时, 针对中国现有地热能开发利用的问题与技术水平, 提出有利于推动和促进中国地热能开发利用的政策建议和未来的发展方向。

1 地热资源分布

全球地热资源总量丰富, 但空间分布上极不平衡。高温地热资源主要分布在离散板块边界和汇聚板块边界, 高温地热资源分布总体受地球的构造—热背景控制, 空间分布上与全球板块边界、地震带、火山带具有相关性^[4], 最为显著的特征是热流高、高温水热活动强烈、活火山与地震活动频繁。4

个全球性的高温地热带是: 环太平洋带、大西洋中脊带、东非裂谷带、地中海—喜马拉雅带(图 1); 而中—低温地热资源则广泛分布在板块内部, 主要分布于造山带及山间盆地和中—新生代沉积盆地^[5], 图 1 为全球地热带分布图^[6-7]。

环太平洋地热带是全球分布范围最广的一个地热带, 沿太平洋板块与美洲板块、欧亚板块的俯冲/碰撞边界展布。最为显著的特征是高热流、年轻造山活动和频繁活火山活动。按照地理分布进一步分为东太平洋中脊、西太平洋岛弧和东南太平洋缝合线 3 个地热亚带。储层温度一般在 250~300℃, 代表性的地热田有美国盖瑟斯(288℃)、墨西哥塞罗普列托(388℃)、中国台湾大屯(293℃)、日本松川(250℃)以及菲律宾巴克曼(300℃)等。但需要特别指出的是, 中国大陆东部地区并不属于环太平洋地热带, 因此, 中国大陆东部高温地热勘探应该遵循板内地热成因理论, 而非板缘地热成因理论。

地中海—喜马拉雅地热带由特提斯缝合带组成, 位于欧亚板块与非洲板块及印度洋板块碰撞的接合地带, 以地壳增厚、年轻造山运动、现代火山作用、岩浆侵入以及高热流等为特征。热储温度一般在 150~300℃, 代表性的地热田有中国羊八井(262℃)、羊易(192℃)、腾冲(250℃)、康定(180℃)、意大利拉德瑞罗(245℃)以及土耳其克泽尔代尔(200℃)等。

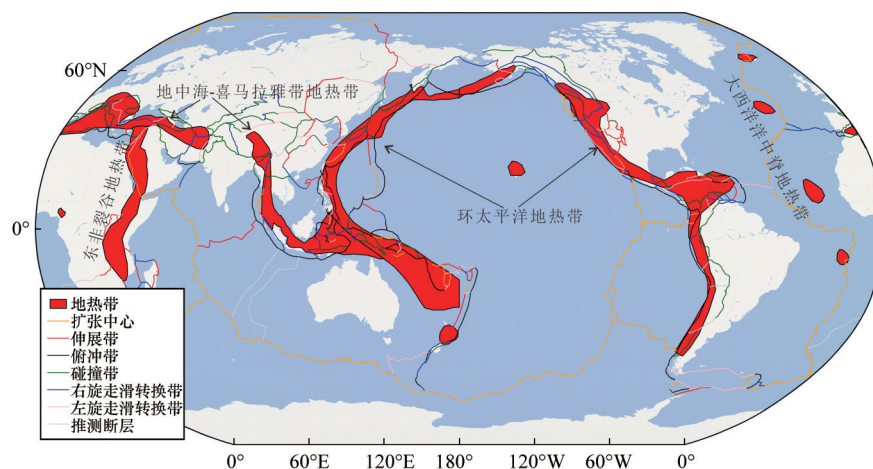


图 1 全球地热带分布

大西洋中脊地热带大部分在洋底,出露海面的部分呈南北向展布。热储温度一般为200~300℃,代表性的地热田有冰岛亨伊尔(230℃)、雷克雅未克(286℃)、纳马菲雅尔(280℃)等。

东非裂谷地热带主体位于非洲板块内,沿大陆裂谷系展布,北端为红海-亚丁湾洋中脊扩张带。以高热流、强烈现代火山作用以及广泛断裂活动为特征。热储温度多高于200℃,代表性的地热田有埃塞俄比亚达洛尔(>200℃)和肯尼亚奥尔卡利亚(287℃)。

随着近些年地热资源勘探的进行,除了以上在板块边界部位形成的高温地热田外,在板块内部也新发现了诸多的地热田,代表性的有青藏高原东北缘的共和盆地(>200℃)、德国兰道(>160℃)和澳大利库珀盆地(>200℃)等。

2 地热发电利用

地热发电是地热能最主要的利用方式之一。目前,主流的地热发电技术包括背压式发电、凝汽式发电、闪蒸发电、双工质发电、全流发电、闪蒸-双工质发电等,采用何种发电方式主要取决于当地地热资源的禀赋^[8]。地热发电已有百年历史,1904年,在意大利托斯卡纳德拉德瑞罗第一次利用地热驱动小型发电机发电,发电功率为0.55 kW,可提供5个100 W的电灯照明用电。1913年,在该地热田建成了全球第一座地热电站,装机容量250 kW。1958年,新西兰建成了怀拉基地热发电厂,为第一个热水型扩容闪蒸式地热电站。1960年,美国第一座装机量11 MW的地热电站在加利福尼亚州盖瑟斯地热田建成,顺利运行长达30年之久。根据国际可再生能源组织(IRNEA)的统计数据,截至2021年底,全球地热能发电总装机容量15644 MW,较2015年新增装机容量3832 MW(图2^[9]),全球用于地热发电的主要是中高温地热资源^[1]。

中国高温地热资源主要分布在西藏地区。1977年,中国第一座兆瓦级高温地热电站在西藏羊八井发电成功,羊八井地热电站的装机容量最高时达到了27.18 MW。2018年底,西藏羊易地热电

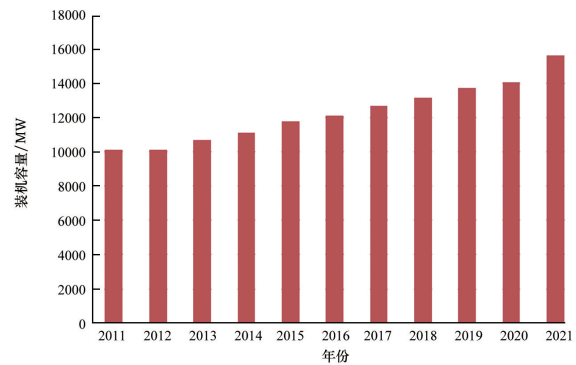


图2 全球地热发电装机容量趋势

站完成一期16 MW建设,2019年2月底完成满负荷并网发电。截至目前,中国累计建成的地热发电装机容量约为59.6 MW,然而,由于各种原因目前实际运行的不足20 MW。

由于可开采高温地热资源需进一步探明以及干热岩发电的关键技术仍有待突破,中低温地热发电有望成为未来地热发电发展的一个重要方向,但中低温地热发电应与其他地热利用方式相结合,以提高能源的利用效率和经济性^[9]。冰岛将116℃的地热用于发电,装机容量0.6 MW,发电后产生的76℃的尾水再用于供暖,实现地热资源的梯级利用。美国在阿拉斯加建成的切纳地热电站,利用74℃的地热水进行发电,地热水流入有机朗肯循环发电机组的蒸发器,与蒸发器中的有机工质换热,降低至54℃流入回灌井,机组可以提供250 kW的电力。日本利用中低温地热建成了装机规模在100 kW~5 MW的ORC电站。20世纪70年代,在中国广东丰顺县建成的国内首座地热电站,其利用的地热水温度为92℃,其3号机组连续运行了近40年,江西宜春曾经创造了利用67℃地热水进行发电的先例。

3 地热直接利用

地热能直接利用包括地热供暖、地热制冷、地热干燥、温泉洗浴和地源热泵等。经过长期的发展,地热资源的直接利用已经从小范围单一用途利用,逐步演化为大规模综合利用工程。目前,全球

约有 80 多个国家直接将地热能用于建筑供暖(或制冷),或用于工农业。其中,冰岛是众所周知的地热能高效开发利用的典范。虽然紧临北极圈、全年低温,但凭借丰富的地热资源,全国有 90% 以上的家庭用地热供暖。冰岛首都雷克雅未克市的地热供暖已有百年的历史,市区主要采用地热供暖,具有“无烟城”的美誉。据 2020 年世界低热大会统计,2019 年底,世界范围内 88 个国家的地热资源直接利用总装机容量为 107727 MWt(图 3^[2]),能量使用约为 1020887 TJ/年(283580 GWh/年)^[2]。各种地热直接利用方式的装机容量变化趋势及分布情况,如表 1^[2]所示,可以看出,各种地热资源直接利用方式的装机容量均有显著的增长,尤其是地源热泵增长十分迅速。随着地源热泵受到越来越多的重视,地热资源应用的区域和规模不断扩大。

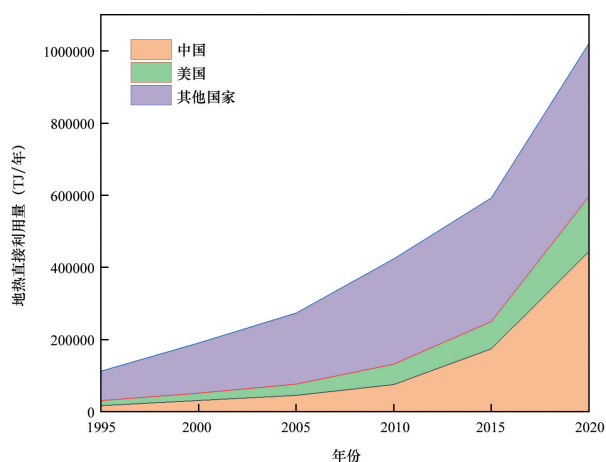


图3 地热直接利用能量对比图

表1 各种地热直接利用方式的装机容量(单位:MWt)

利用方式	2000年	2005年	2010年	2015年	2020年
地源热泵	5275	15384	33134	49898	77547
采暖	3263	4366	5391	7556	12768
温室加热	1246	1404	1544	1830	2459
水产养殖	605	616	653	695	950
农业干燥	74	157	125	161	257
工业用途	474	484	533	610	852
洗浴和游泳池	3957	5401	6700	9140	12253
制冷和融雪	114	371	368	360	435
其他	137	86	42	79	106
总计	15145	28269	48493	70329	107727

地热综合梯级利用无疑提高了地热资源的利用率和经济效益,许多国家已经开始纷纷采用这一技术,肯尼亚近年来在地热发电方面发展很快,而在地热直接利用上也很有特色,肯尼亚 Eburru 项目利用 2 口浅层井中产出的地热资源依次用于干燥农产品、温室加热、家禽孵化等^[10],另外,冰岛、奥地利、德国等也有相关的地热梯级利用项目。1995 年首次世界地热大会以来,中国地热直接利用的热量一直稳居世界第 1 位。2014 年底,中国地热直接利用发生了可喜的变化,地热供暖比例首次超过温泉洗浴。2019 年底,中国地热直接利用装机规模 40610 MW,占世界总装机的 37.7%,年利用能量 443492 TJ/年,占世界总利用能量的 43.4%^[2]。地热供暖是除地源热泵之外中国最重要的地热利用方式,年利用热量约占世界总量的 55.6%。1990 年,全国地热供暖面积仅 190 万 m²,2000 年为 1100 万 m²,2019 年达到了 4.78 亿 m²。2019 年,河北省水热型地热供暖面积达到 1.6 亿 m²,而雄县也被打造成地热供暖的“无烟城”。在“双碳”目标的引领下,可以预见地热资源开发利用的速度将不断加快。

4 地热储能利用

地热储能是一种利用地下含水层作为介质以存储热能的储能系统。它通过地下水井从含水层中注入和抽取地下水,实现热能储存和回收(图 4^[11])。地热储能可以弥补能源供需在时间/空间分布的不平衡,能够综合利用多种可再生能源形式,减少对矿物燃料的依赖,为节能减排和环境保护提

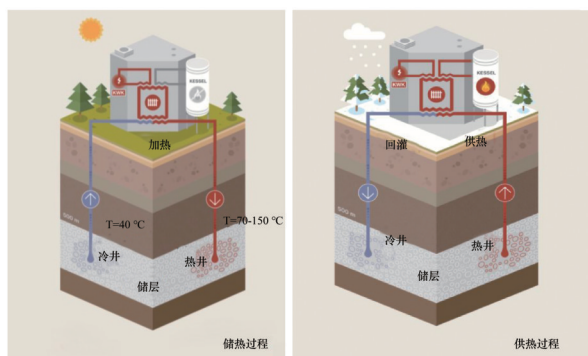


图4 地热储能模式概念

供了一个很好的解决途径,也是助力中国实现“双碳”目标的有力手段^[12]。

根据含水层深度,可将地热储能系统分为如下2类^[11]:(1) 浅部地热储能,含水层深度在500 m以浅,存储热水温度一般低于50℃;(2) 深部地热储能,含水层深度通常在500 m以深,存储热水温度一般在50~150℃。

浅部地热储能因温度较低,其最主要的利用方式是建筑的供暖和制冷。国际上对浅部地热储能系统的实际利用始于20世纪中叶。中国在利用浅部地下含水层进行储热方面的实践开展较早,20世纪60年代,上海开展了“冬灌夏用”和“夏灌冬用”的地下含水层储热技术。截至目前,中国共有6座浅层地热储能系统已建成并投入使用。近年来,随着新兴产业的发展,浅部地热储能的利用方式也更加多元化。目前在温室农业^[13]和大型数据中心^[14],都有利用浅部地热储能的实际案例。

深部地热储能可储温度较高,有的甚至超过100℃,主要可用于发电和供暖。深部地热储能研究和利用始于20世纪80年代,近年来,随着能源需求日益增长,深部地热储能技术又重新受到重视,关于深部地热储能技术的研究和工程实践也越来越多。2018年,欧盟资助了地下储热项目HEATSTORE^[15],总投资达到5000万欧元,9个国家参与(德国、法国、荷兰、瑞士、比利时、丹麦、冰岛等),项目为期5年(2018—2022年),共资助6个地下储热示范项目,其中包括3个深部地热储能项目。另外,美国国家科学基金会(NSF)资助的储热项目Geothermal Battery,总投资1000万美元,由犹他大学牵头,爱达荷国家实验室联合多家企业参与其中^[16]。中国在深部地热储能方向的研究开展较晚,当前以中国科学院地热团队为主体承担的深层含水层地下储热研究已从理论模型研究进入到技术研发和示范工程建设^[12,17]阶段。

地热储作为巨大的天然能源储库,最适宜在多元互补系统中承担蓄能和实现热能稳定输出的功能,可以把风能、太阳能等可再生能源储蓄起来,实现高效规模化跨季节储能利用,提高可再生能源的利用效率并克服可再生能源的间歇性和不稳定性

等缺点,可以加快中国能源结构的调整,助力实现“碳达峰”和“碳中和”发展目标。据研究表明,通过对荷兰74个浅部地热储能系统的调查显示,从系统中每开采1 m³的地下水,可以实现平均CO₂减排量为0.46 kg。这对于一个小规模地热储能系统(功率在0.1~3 MW)来说相当于每年可以减少150 t/a的CO₂排放,而对于一个大规模系统(功率达到5~30 MW)来说每年碳减排多达1500 t/a^[18]。相比之下,地源热泵(GSHP)系统的平均CO₂减排量在1.8~4.0 t/a^[19]。据报道,埃因霍温(荷兰)科技大学校园内全球最大的浅部地热储能系统每年可减排超过13000 t的CO₂,这相当于800名美国公民或1300名德国公民的年平均碳排放^[20]。

同时,在一定条件下,地热储能系统与普通地热系统相比,具有更为显著的经济效益优势。典型地热储能系统的投资回报时间仅为2~10 a^[21]。用于制冷的地热储能系统投资回报时间甚至更短,因为储存的冷量可以直接使用,不需要借助热泵。据报道表明,地热储能系统平均使用寿命可达到25~50 a^[20]。

5 结论

目前,全球的浅层地热资源均通过热泵技术进行开发利用,该技术是全球发展最快的可再生能源技术之一,也是地热利用技术中发展最快的部分。它们的增长速度惊人,呈指数级增长。深部地热资源可以直接利用,例如区域供暖、沐浴和游泳/保健、工业、农业(尤其是温室)和水产养殖。深部地热能的高效规模化开发利用已经在北方地区冬季清洁供暖以及缓解大气雾霾中发挥了重要作用,地热供暖技术已趋于成熟。深部高温水热系统只存在特定的地质构造环境中,相对稀缺,严重制约高温地热发电的增长。因此,在有条件的地区发展各种地热直接利用技术,采用综合梯级利用提高地热资源利用效率。

虽然地球是一个庞大的热库,但地热资源分布极不均匀。往往在有需求的地区没有足够的可开采的地热资源,在需求量较小的地区地热资源非常

丰富。另外,中国西北、东北、华北的部分地区均见有弃风、弃光现象,有些地区弃风率高达50%以上,除此以外,工业余热、核能余热等其他形式的热量均可以存储在地球介质中,实现高效规模化跨季节储能。因此,如何将这些废弃的能量储存起来并加以充分利用,是摆在地热界以至整个新能源和可再生能源界的大问题。事实上,规模化跨季节储能是能源行业的重大科学问题,当前可利用方式主要为抽水蓄能,但抽水蓄能面临能源利用效率低、场地要求高等难题,亟需探索新的规模化储能技术,而地热储能提供了极大的可能性。

参考文献(References)

- [1] International Renewable Energy Agency. Renewable power generation costs in 2021[R]. Abu Dhabi: IRENA, 2022.
- [2] Lund J W, Toth A N. Direct utilization of geothermal energy 2020 worldwide review[J]. *Geothermics*, 2021, 90: 101915.
- [3] Hutterer G W. Geothermal power generation in the world 2015–2020 update report[C]//Proceedings World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland: WGC, 2020.
- [4] 汪集暘, 等. 地热学及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2015: 258–261.
- [5] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟. 沉积盆地地热学[M]. 东营: 中国石油大学出版社, 2019.
- [6] Hasterok D, Halpin J A, Collins A S, et al. New maps of global geological provinces and tectonic plates[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 231: 104069.
- [7] O’Gorman E J, Benstead J P, Cross W F, et al. Climate change and geothermal ecosystems: Natural laboratories, sentinel systems, and future refugia[J]. *Global change biology*, 2014, 20(11): 3291–3299.
- [8] Hammons T J. Geothermal power generation worldwide: Global perspective, technology, field experience, and research and development[J]. *Electric Power Components and Systems*, 2004, 32(5): 529–553.
- [9] 马伟斌, 龚宇烈, 赵黛青, 等. 我国地热能开发利用现状与发展[J]. *中国科学院院刊*, 2016, 31(2): 199–207.
- [10] John N, Jalilinasrabady S. Considering future feasible agricultural projects for direct use of geothermal energy at Eburru geothermal field[C]//Geothermal Resources Council Virtual Annual Meeting and Expo: Clean, Renewable and Always on, GRC 2020. Geothermal Resources Council, 2020: 268–283.
- [11] 汪集暘.“地球充电/热宝”:一种地热开发利用的新途径[J]. *科技导报*, 2018, 36(24): 1.
- [12] 黄永辉, 庞忠和, 程远志, 等. 深层含水层地下储热技术的发展现状与展望[J]. *地学前缘*, 2020, 27(1): 17–24.
- [13] Paksoy H Ö, Beyhan B. Thermal energy storage (TES) systems for greenhouse technology[C]//Advances in thermal energy storage systems. Duxford, United Kingdom: Woodhead Publishing, 2015: 533–548.
- [14] Drenkelfort G, Kieseler S, Pasemann A, et al. Aquifer thermal energy storages as a cooling option for German data centers[J]. *Energy Efficiency*, 2015, 8(2): 385–402.
- [15] Mindel J, Driesner T. Heatstore: Preliminary design of a high temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) system in Geneva based on TH simulations[C]//World Geothermal Congress. Reykjavik, Iceland: WGC, 2020.
- [16] Green S, McLennan J, Panja P, et al. Geothermal battery energy storage[J]. *Renewable Energy*, 2021, 164: 777–790.
- [17] Huang Y, Pang Z, Kong Y, et al. Assessment of the high-temperature aquifer thermal energy storage (HT-ATES) potential in naturally fractured geothermal reservoirs with a stochastic discrete fracture network model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 603: 127188.
- [18] Fleuchaus P, Godschalk B, Stober I, et al. Worldwide application of aquifer thermal energy storage—A review[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 861–876.
- [19] Blum P, Campillo G, Münch W, et al. CO₂ savings of ground source heat pump systems: A regional analysis[J]. *Renewable Energy*, 2010, 35(1): 122–127.
- [20] Paul F, Bas G, Ingrid S, et al. Worldwide application of aquifer thermal energy storage: A review[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2018, 94: 861–876.
- [21] Ghaebi H, Bahadori M N, Saidi M H. Economic and environmental evaluation of different operation alternatives to aquifer thermal energy storage in Tehran, Iran[J]. *Scientia Iranica. Transaction B, Mechanical Engineering*, 2017, 24(2): 610.

Current state, utilization and prospective of global geothermal energy

WANG Jiyang¹, PANG Zhonghe¹, CHENG Yuanzhi¹, HUANG Yonghui², JIANG Guangzheng³, LU Zhenheng⁴, KONG Yanlong¹

1. Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China

2. College of Geosciences, China University of Petroleum, Beijing 102249, China

3. College of Energy, Chengdu University of Technology, Chengdu 610051, China

4. Guangzhou Institute of Energy Conversion, Chinese Academy of Sciences, Guangzhou 510651, China

Abstract As a non-carbon clean energy, geothermal energy plays an important role in promoting the development goals of carbon peak and carbon neutrality due to its advantages of stable and continuous supply. The utilization of geothermal energy is generally divided into geothermal power generation, geothermal direct utilization and geothermal energy storage. Since 2010, global geothermal direct utilization has grown exponentially, with the installed capacity of geothermal direct utilization and annual heat utilization of about 108 GWt and 283,580 GWh, respectively. China has long ranked first in the world in terms of geothermal direct utilization. The geothermal heat pump system shows an exponential growth of about 16% every year, and the geothermal heat pump system accounts for about 72% and 60% of the installed capacity and heat utilization of the global direct utilization of geothermal heat, respectively. The average annual growth rate of geothermal power generation from 2010 to 2020 is about 4% restricted by high-temperature geothermal resources. Geothermal energy storage is the frontier field of geothermal utilization. Europe and the United States have deployed the "HEATSTORE" and "Geothermal Battery" energy storage projects respectively. The geothermal energy storage project deployed by the Geothermal Team of the Chinese Academy of Sciences has also entered the stage of key technology research and demonstration projects construction. As a huge natural energy storage, geothermal storage is the most suitable basis for storing energy and realizing a stable supply of thermal energy in a multi-energy complementary system. It can save other energy sources across seasons, realize efficient and large-scale energy storage across seasons, and improve energy utilization efficiency. Therefore, it can help achieve the development goals of carbon peak and carbon neutrality.

Keywords geothermal energy; distribution of resources; geothermal storage energy ●



(责任编辑 祝叶华)