

长三角地区地热能发展路线图

庞忠和^{1,2}, 孔彦龙^{1,2}, 龚宇烈³, 汪集暘^{1,2}

1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029
2. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049
3. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510651

摘要 简述了中国地热产业发展现状, 梳理了长江三角洲地区地热资源潜力和分布特征、地热利用现状与市场需求、地热开发利用中的创新技术、地热产业发展的新模式。面向国家“双碳”目标, 提出了该地区地热产业发展的框架性路线图。研究认为, 在经济发达的长江三角洲地区, 人口密度较大, 建筑用能占比高, 居民供暖和制冷需求大, 而化石能源供暖导致空气质量下降, 碳排放量增加。与此同时, 长三角地区地热资源, 尤其是浅层地热能资源比较丰富、开发利用基础好、技术比较先进。如果做好顶层设计, 将地热能开发利用纳入能源产业发展规划, 加以积极的政策引导和必要的扶持, 加大科技研发和示范支持力度, 那么地热能综合开发利用有望为地方能源转型和实现“双碳”目标做出更大的贡献。

关键词 路线图; 地热直接利用; 碳中和; 区域供暖; 长江三角洲; 地热储能

长三角地处中国东部沿海, 由江苏省、安徽省、浙江省和上海市(三省一市)的主要区域构成。2018年11月5日, 习近平总书记在首届“中国国际进口博览会”上宣布“支持长江三角洲区域一体化发展并上升为国家战略”。2019年5月13日, 中央政治局会议审议了《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》。2019年12月1日, 《长江三角洲区域一体化发展规划纲要》正式公开发布。2020年4月, 中国科学院学部批准设立了院士咨询评议项目“长三角地区地热资源及其综合利用研究”, 并于2020

年7月28日正式启动。该项目旨在系统厘清长江三角洲地区地热资源家底、开发利用现状与需求、梳理存在的问题、探索长三角地区地热综合利用模式和发展路线图, 是支撑长三角地区一体化高质量发展的国家战略。

“长三角地区地热资源及其综合利用研究”项目汇集了中国科学院地质与地球物理研究所、中国科学院广州能源研究所、中国科学院武汉岩土力学研究所、南京大学、河海大学、上海市地矿工程勘察院、浙江省工程勘察院、三省一市的地质调查研究

收稿日期: 2023-02-05; 修回日期: 2023-06-05

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); 国家自然科学基金专项(42042038)

作者简介: 庞忠和, 研究员, 研究方向为水文地质与地热地质, 电子信箱: z.pang@mail.iggcas.ac.cn

引用格式: 庞忠和, 孔彦龙, 龚宇烈, 等. 长三角地区地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2023, 41(12): 12-19; doi: 10.3981/j.issn.1000-7857.2023.12.002

院以及地热企业等 18 个单位 60 余位专家参加。项目调研的内容主要包括地热资源分布特征与潜力、地热利用现状、地热开发利用创新技术、地热产业发展创新模式和发展战略等几个方面。

为了实现“碳中和”目标,必须在能源的生产中逐步采用非碳基能源替代化石能源^[1]。在长三角这样的经济高度发达地区(图 1),气候冬冷夏热,合理利用的地热方式是什么? 地热能潜力有多大? 减碳的贡献如何? 地热能产业的发展路径是什么样的? 未来技术研发的重点在哪些方面? 本文基于对长三角地区 10 多年的地热研究工作积累,特别是近期开展的深度调研工作,兼顾对国内外地热能产业发展和技术进步的总体趋势分析,针对长三角地区的实际情况,尝试提出该地区面向“碳中和”目标的地热能技术和产业发展框架路线图。

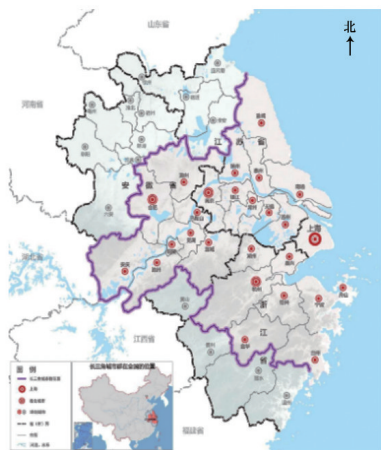


图 1 长江三角洲经济区范围示意

1 地热能产业现状和发展态势

“碳中和”目标是当今世界人类应对气候变化的共同愿景和努力方向。实现“碳中和”的路径是三端发力^[1-2],即:在能源生产端大力发展非碳基能源,主要有太阳能、风能、地热能、水能和核能;在能源消费端努力实现非碳基能源替代和节能;在固碳端,通过人为努力,提高生态系统固碳能力,同时,实施二氧化碳地质利用和封存^[3]。地热能作为一种非碳基清洁能源,因为稳定、连续的优势,对实现“碳达峰”和“碳中和”的发展目标具有不可替代的

重要作用。在生产端既可以发电,也可以供热,还可以配合电网提供储能服务,平抑其他可再生能源电力的不稳定性;在利用端,可以替代电力供应热力,也可以与热泵结合实现节电。因此,地热能的开发利用受到各国政府的高度重视。

世界地热能产业已经初具规模。根据 2020 年世界地热大会公布的数据,中深层水热型地热能利用的发电装机已经超过 16 GWe,浅层地源热泵和中深层水热型地热直接利用装机达 60 GWth。中国地热能产业在刚刚过去的 10 年取得了前所未有的新进展,主要体现在地热直接利用上。东北、华北浅层地源热泵规模化应用,华北京津冀鲁豫地区以及陕西等地区中深层地热供暖规模化应用,特别是华北大型岩溶热储中深层水热型地热能的规模化供暖;长江中下游城市地表水体的地源热泵空调等。这些进展使中国在地热能直接利用方面发挥了引领性的作用。地热直接利用总量持续保持世界第一的位置,年用量相当于供暖面积 14 亿 m^2 ,占世界总量的 38%,成为名副其实的世界地热能大国。

在地热能产业发展战略上,全球地热界发生了重大的观念性转变。2021 年在冰岛召开的世界地热大会 WGC2020 结束时发表了《雷克雅未克宣言》,提出了重视直接利用的地热能产业发展战略,应受到各国高度关注,这是前所未有的现象^[4]。

在关键技术研发上,欧美国家依然十分重视深层地热能开发利用关键技术研发,重点发展增强地热系统(enhanced geothermal system, EGS)技术。目前已经实现了兆瓦级的发电示范工程,全球试验性发电装机达到 12 MW。美国把 EGS 技术应用到已经开发的中深层高温地热系统开发利用中,取得了很好的商业化效果。例如,在世界上最大的盖尔瑟斯(Geysers)地热田,发电量增加了 38%。中深层高温水热型地热系统技术研发的另外一个方向是超临界流体地热能的开发利用技术。冰岛钻成了一口试验井,井口温度 450℃,堪称世界地热井之王,只是目前还没有发出电来。

中国在深层地热能开发利用的技术研发上也取得了可喜的进展,在共和盆地找到了干热岩体。

最近几年也开展了压裂和开采试验。但是,与国外类似,离实现商业化利用的距离仍然很遥远。

中国在中深层地热的深井换热技术方面开展了新的探索,包括超长重力热管技术、U型井换热技术等,在世界上是不多见的。但限于技术本身的局限性,未来在换热效率上取得突破的难度较大。

21世纪以来,中深层地热储能成为世界地热开发利用研究前沿^[5-7]。2019年,欧盟实施了“Heat-store”(地热储能)研究项目,美国实施了“Geothermal Battery”(地热电池)研究项目。在中国,中国科学院2019年启动了中深层地热储能课题“基于消纳风电的储能式地热供暖系统关键技术突破与示范”,支持地热储能技术研发,2022年,在雄安新区的容城开展了10万m²规模的试验性地热储能项目,初步验证了在复杂碳酸盐岩储层中开展地热储能也是可控的。

综上所述,地热储能从资源和开发利用技术都与过去差别很大。为了体现地热储能的重要性,本文把它单列为一类新的地热资源类型。在国家能源行业地热标准基础上汇总补充的地热能类型及其利用方向见表1。

表1 地热资源类型及其利用方向

资源类型	埋藏深度/m	赋存介质	利用方向
浅层地热能	<200	土体或水体	空调
中深层地热能	200~3000	岩石和水	供暖、康养
深层地热能	>3000	岩石和水	发电、供暖
地热储能	0~3000	土体或水体	发电、供暖

注:浅层地热能包括地表水体的热量,一般温度<25℃;温度>150℃为高温资源,90~150℃为中温资源;<90℃为低温资源。

根据中国地质调查局2018年的数据,全国地级市以上城市浅层地热能可采资源量为7亿t标准煤当量;中深层地热能可采资源量约为19亿t标准煤当量,两者之和为26亿t标准煤当量^[8]。这其中不包括地表水体地热能。26亿t标准煤超过2020年全国一次能耗(48亿t)的1/2,可见有很强的替代能力。当然,其中还没有包括地表水体所代表的浅层地热能。

最近20年来,中国地热直接利用产业发展迅速,增长速度和热利用总量远远超过其他国家,实

现了指数增长。浅层地热能供暖面积呈现每年16%的增长,中深层地热能供暖也持续增长,图2展示了中国目前非碳基能源的贡献比例。根据统计,地热能贡献占比5%,跟其他几类能源相比,虽占比最小,但是处在同一个数量级上。

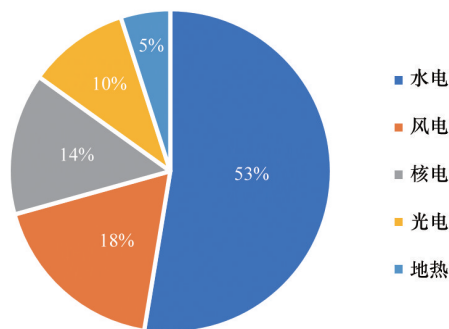


图2 2021年中国地热能在非碳基能源的相对贡献比例

在国家“十四五”地热能产业发展规划中,明确了重视规模化有效益、因地制宜开发利用地热能的方向。实现地热能产业高质量和可持续发展,使中国在从地热大国走向地热强国的道路上不断前进,为“碳中和”做出更大贡献,是地热界的使命。到“十四五”末,中国地热能供暖面积比2020年(14亿m²)增加50%,达到21亿m²,到2035年末,达到42亿m²。2035年也是深层地热能工程化技术达到成熟和逐步走向商业化应用的阶段,预计地热能开发利用产业将会以更快的速度发展。

在国家“十四五”地热能科技发展规划中,对于需解决的关键科技问题,聚焦在复杂地质体中流体可持续循环及其传热效率提升上。本文梳理出来的技术发展重点方向主要有以下4点。

1) 浅层地热能注重规模化技术能力的提升。未来重点方向是复杂地质条件下土壤回热与多能互补技术。地埋管在周期性冷热负荷作用下的热-流-力多场耦合理论。

2) 中深层开发注重规模化技术能力的提升。未来方向是提高水热型地热资源勘查评价精度、改进钻井的钻完井技术与工艺、地热尾水回灌技术等关键技术装备制造研究。采-灌技术优化;攻关中低温地热能发电关键技术;开展中深层含水层储

能和浅层岩土储能关键技术研究,实现余热废热、地热储能;建立地埋管换热器与岩土多物理场耦合传热优化模型。

3) 深层地热能勘查取得突破,开发利用技术取得初步成效。未来方向是资源预测与钻探靶区优选、钻井工艺技术、岩体压裂及水-岩高效换热等关键技术研究、用于评价深部岩体联通性及其换热面积的新型示踪剂研发、储层裂隙网络中多场耦合的能量传递与转换机理的揭示等。突破高温钻井技术与装备瓶颈,支撑高温地热能开发。突破高温岩体探测、压裂及效果评价等关键技术,研发单井采热技术与装备,增强地热系统以及地面综合梯级热利用技术,开发高温岩体压裂-采热-用热一体化优化设计平台,开展高温地热能开发利用工程示范。

4) 中深层地热储能技术正在受到业界重视。未来方向是通过人工改造储层以及与其他可再生能源相融合,实现多能互补集成技术的提升与应用。推广含水层储能、岩土储能等跨季节地下储热技术利用,因地制宜推广集地热能发电、供热(冷)、热泵于一体的地热综合梯级利用技术。

2 长三角地区地热产业发展战略

2.1 地热资源特点

长三角地区的浅层地热能和中深层地热能资源的勘查取得了显著进展^[9-15]。近年来,深层地热能勘查工作也已开展。

利用地表水源作为热泵的热源对建筑物进行供暖和制冷的技术,称为地表水源热泵。这个技术在长三角地区得到了初步应用。其中,利用城市中水的技术开展较早,而利用长江水热能的项目正在向规模化发展,俗称长江“水空调”^[16]。为此,针对长江水热能资源及其利用潜力开展了初步研究。

大通水文站位于安徽省池州市,是长江下游干流的起点,是一个重要的水文站点。以大通水文站断面为例,开展了长江水地热资源评价研究。基于丰富的大通水文站水文资料,利用数理统计方法,探讨了近年来水文情势以及水温及水质的变化规

律。基于该断面多年平均径流量、气温及水温观测数据,依据气温与水温之间的温差以及下游断面水温变化控制阈值,计算出供暖与制冷可采地热资源量分别为 1.28×10^{17} J 和 6.11×10^{17} J。综合估算,供暖面积为 25 亿 m^2 ,减排二氧化碳 1.6 亿 t。

根据区域城市群分布情况,按照大通水文站多年平均径流量估计长江下游的地表水热资源利用潜力,估计在 100 倍以上,即总供暖面积可达 2500 亿 m^2 ,减排二氧化碳的潜力为 160 亿 t。

长三角地区地表水资源丰富,长三角地区水系发达,有长江、淮河、钱塘江主要河流,江、河、湖、海相连,水资源十分丰沛(图3)。

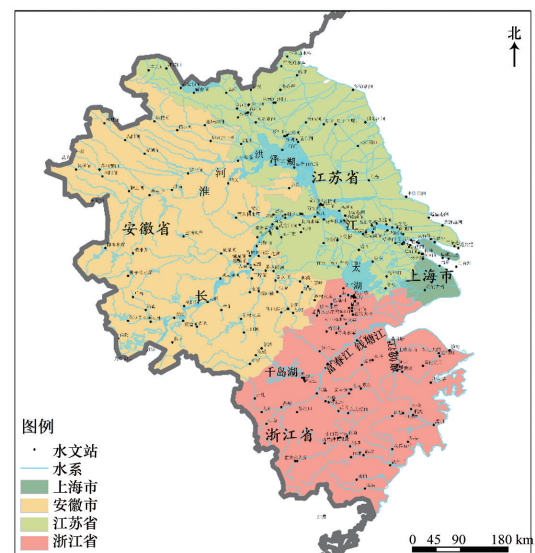


图3 长三角地区地表水系和水文站点分布

浅层地热能利用中地下水保护受到广泛关注。根据《中国地下水监测工程年度报告 2021》,长江下游地下水水位总体呈上升趋势。国家地下水监测工程 469 个监测站点数据显示,与上年同期相比,长江三角洲地区 66.8% 的地下水监测站点水位上升,平均上升 0.3 m。同样,根据上述报告的评价结果,长三角地区大部分地下水,是经过处理后可作为饮用水源的 IV 类地下水。因此,长三角地区的地下水的热能开发利用的条件显著优于中国其他地区,特别是北方地区^[17]。

根据现有资料对中深层地热能资源进行估算,得到该地区 3 km 以浅的地热资源总量相当于 782

亿 t 标准煤热当量,其中可采资源量为每年 1.6 亿 t 标煤。按照当地建筑能耗标准,这些资源可实现建筑物冬季供暖面积 24.8 亿 m^2 ,夏季制冷面积 14.5 亿 m^2 。据统计,目前长三角地区利用地热供暖和制冷的建筑面积的 0.57 亿 m^2 ,表明只利用了可采资源的 4%,剩余的资源潜力很大。

从中深层地热能的现有勘查结果来看,江苏和安徽条件好,拥有碳酸盐储层等有利条件,出水量比较大。浙江条件比较差,上海条件最差。浙江地热勘查方面缺乏系统研究,成功率较低。浙江省在地热资源分类分级和解剖典型案例方面也取得了进展,有助于未来地热勘查和评价。

中深层地热资源勘查技术方法,在长三角地区都进行了应用尝试。其中有:重力和磁法勘探探测沉积盆地基底、断裂构造、岩浆岩分布等信息;可控源音频大地电磁法(CSAMT)和广域电磁法(WFEM)探测隐伏基岩岩性和富水断裂位置;MSM 方法分辨深部低速层;地温测量和氦气测量在浅覆盖区勘查对流型地热资源;CSAMT、WFEM、微动勘查方法(MSM)、重力、磁法组合探测深埋地热资源;CSAMT、测温、测氦组合探测对流型地热资源;CSAMT、大极距电测深、微动组合探测沉积盆地地区勘查传导型孔隙地热资源;CSAMT、MSM、高精度重力、测温组合勘查复合型地热资源。采用多种方法相结合,因地制宜勘查评价地热资源。

在深层地热能勘查方面,2020 年,江苏省在兴化县打成一眼 4700 m 深钻孔,孔底温度 155°C ,地温梯度稳定,展示了深层地热能有利的开发利用潜力。深部岩性是碳酸盐岩,对于深层水热型地热能资源开发利用,包括基于增强地热系统技术的深层水热型开发利用,是近有实效远有前景的方向。

2.2 建筑清洁热力需求

长三角地区人口密度较大,人均二氧化碳排放高,是能源转型难度较大的经济发达区域。国土面积约占全国 1/50,二氧化碳排放量却占全国 1/10,煤炭消费强度也远超京津冀和珠三角地区。长三角地区建筑用能缺口较大。据统计,建筑用能目前约占总能源消耗的 20%。根据欧美等发达国家的能源消费分析,未来建筑用能占总能耗的 40% 左

右,其中 1/2 为建筑运行期的热力需求。长三角地区冬季湿度大,体感温度低,每年有近 60 d 时间体感温度低于 13°C 。而夏季则非常炎热,在 35°C 以上,体感温度炎热难耐。每个家庭几乎都配备供暖制冷电器,以满足室温宜居的需求。目前,依赖煤炭供暖致使冬季雾霾天气增多;夏季制冷用电过多,甚至出现了“拉闸限电”的现象。为了早日实现“碳达峰”目标,火电不能因为建筑用热再扩容;因此,寻求非碳基能源势在必行。地热是稳定、连续、安全的清洁能源,资源储量大,是开发利用的有利能源。基于广泛调研及资料收集,利用数理统计方法对长三角地区地热资源的建筑应用需求进行了预测,结果表明,长三角地区地热资源的建筑需求大,在长三角地区开展地热资源综合开发利用,对于促进长三角地区“一体化”和“高质量”的发展十分有利。

2.3 地热产业和技术发展现状

长三角地区属于夏热冬冷型气候,冬季有供暖需求,夏季有制冷需求。长三角浅层地热能资源丰富,开发利用方式多样,尤其适宜于建筑供暖和制冷等。南京江北新区是个规模超大的案例,让人印象深刻(图 4)。因此,浅层地热能已经形成一定的产业规模。据不完全统计,地热利用总面积在 5000 万 m^2 以上。其中,安徽省浅层地热能建筑供暖与制冷以及设施农业的总建筑面积超过 2000 万 m^2 ,其中,合肥地区的浅层地热能利用面积约占全省的 1/2,建有多座“地热+”区域能源站。



图 4 南京市江北新区的江水空调项目规划示意

根据调研的实际案例分析,浅层地热能利用的社会、环境及经济效益均好。其中,合肥滨湖科学城“地热+”能源站及淮北矿业集团“地热+”能源站被列入了国家能源局2021年公布的“全国可再生能源供暖典型案例”,具有示范推广价值。

地热利用创新技术在长三角地区得到了推广应用。这包括浅层含水层储能、江水源热泵、冰源热泵、浅层渗滤海水源热泵、地源热泵综合能源技术等浅层地热利用技术。中深层地热综合梯级利用技术也得到了应用。从长三角地区的应用案例来看,技术先进性、经济性较强,未来在长三角地区的进一步推广应用前景看好。

浅层地埋管换热器的换热性能受地埋管换热器2支管之间的热短路影响比较大。3D数值模型研究了管间热短路对换热性能的影响,延米换热量与支管间距之间呈线性关系。

2.4 地热产业模式探讨

长三角地区地热为建筑供暖制冷是经济可行的选择。根据现有的案例计算,浅层地热能供暖和制冷项目初期投资增加10%,每年节约开支30%,5年内可以回收投资。相对于普通电空调而言,更为经济实用、减污减碳。

长三角三省一市在地热资源勘查评价、开采利用、安全运行和环境保护等方面积累了诸多成熟的做法与经验,容易推广应用。此外,地热能连续稳定、安全可靠、清洁零碳,如果在政策措施和体制机制方面予以引导,完全可以满足建筑用能增量需求。温泉具有“热、矿、水”3种自然属性,是有能源价值也有康养价值的综合性自然资源。温泉不仅可以作为康养资源用于温泉泡浴,而且可以作为清洁能源用于发电、房屋供暖、温室大棚,还可以作为清洁水源用于农业灌溉、水产养殖,以及利用其矿物组分进行美容、保健等衍生品开发,具有较高的经济价值。

温泉利用在长三角地区历史悠久。然而,目前产业的发展现状是功能单一,有必要从产业转型角度出发,面向温泉康养重构业态,推动温泉资源的综合开发利用,从而提高吨水效益和实现综合效益,推动温泉产业健康发展。

3 地热产业发展政策建议

长三角地区地热资源开发利用的规划和实际运维管理层面与产业需求不相适应的问题,政府部门需要制定扶持政策和管理细则,保障地热开发利用产业高质量发展,服务于双碳目标的大局。基于调研结果,结合国内外地热能产业发展趋势,提出具体的发展战略和政策建议。

1) 把地热能开发利用纳入“十四五”相关规划,制定具体负责部门落实。在长三角国民经济和社会发展规划、能源产业“十四五规划”和提前“碳达峰”行动方案中,应当明确设定地热能开发利用的目标,要求到“十四五”末期地热能利用在地区总能耗中占比达到新的水准,并提出地热开发利用的规范化、规模化和高质量发展的具体措施。

2) 进一步明确地热产业优先发展的方向和重点领域。鼓励大面积推广浅层地热能开发利用,结合该地区地表水资源极其丰富的资源优势,优先发展“水空调”等规模化技术与工程应用,特别鼓励“再生水空调”技术与工程应用。探索符合长三角一体化发展要求的可复制的技术体系与盈利模式。重点尝试特许经营权以及政府和企业共同投入合作经营的新的产业发展模式。在康养方面,结合本地情况和已有实践,确定产业模式和示范项目。

3) 出台有关地热能供暖、制冷的激励性政策,在减免税收减轻负担上面下功夫。出台鼓励发展利用浅层地热能供暖和制冷产业的激励性政策。实行用热免税、提供融资便利及开放市场准入等优惠政策;做好碳排放交易权等体制机制保障;为大力推动地热供暖和制冷产业发展创造有利的政策和市场环境。将可再生能源利用率纳入绿色建筑考评指标,鼓励率先行动做得好的地方政府,扶持合法经营的龙头企业和示范工程。

4) 制定地方性地热能利用行业标准规范并加强监测和监管,为行业可持续发展保驾护航。研究制订核心技术行业标准,完善产业链条上各个环节的技术标准规范,形成覆盖全产业链的技术标准体系。加强地热行业标准的宣传和监督实施,提高地热行业标准化水平。简化地热项目审批流程,对区

域性项目,实行整体备案,理顺审批制度。加强施工监理和环境保护,建立地热能开发和环境影响的监测评价体系,严格地热能供暖(制冷)行业的监管,确保高质量发展。

5) 加强科技研发投入,发挥好本地区制造业强的有利条件,逐步形成辐射区外乃至国外地热产业的能力。地热产业从资源勘查评价、开采开发,到利用管控,再到监测环保,是很长的产业链条。设备制造是不可或缺的重要一环。建议在一体化发展思路下,优势互补,通过产学研用合作,形成地热能产业的长三角区域优势。

4 结论

长三角地区是全国经济发展的龙头,是实现2030“碳达峰”和2060“碳中和”目标的关键地区。如果能科学合理充分地用好本地地热资源和产业技术先进的优势、给以正确的政策引导和适当的产业扶持,必将推动该地区形成以地热利用为主体的新型低碳绿色产业集群,在实现“碳达峰”和“碳中和”目标方面,成为全国乃至世界的样板。

参考文献(References)

- [1] 丁仲礼, 张涛, 等. 碳中和: 逻辑体系与技术需求[M]. 北京: 科学出版社, 2022: 112-114.
- [2] 庞忠和. 新书介绍:《碳中和: 逻辑体系与技术需求》[J]. 地质论评, 2023, 69(1): 410.
- [3] 李义曼, 庞忠和, 李捷, 等. 二氧化碳咸水层封存和利用[J]. 科技导报, 2012, 30(19): 70-79.
- [4] International Energy Agency(IEA). Renewable for heating and cooling[R]. Paris, France: IEA, 2007.
- [5] Kallesoe A J, Vangkilde-Pederson T. Underground thermal energy storage(UTES)-state-of-the-art, example cases and lessons learned: Heatstore project report[R]. Europe: Geothermics-Era Net Cofund Geothermal, 2019.
- [6] U. S. Department of Energy. GeoVision: Harnessing the heat beneath our feet[R]. Washington D. C.: U. S. Department of Energy, 2019.
- [7] Green S, McLennan J, Panja P, et al. Geothermal battery energy storage[J]. Renewable Energy, 2021, 164: 777-790.
- [8] 中国地质调查局, 国家能源局新能源与可再生能源司, 中国科学院战略发展研究院, 等. 中国地热发展报告[R]. 北京: 中国石化出版社, 2018.
- [9] Duan Z F, Pang Z H, Wang X Y. Sustainability evaluation of limestone geothermal reservoirs with extended production histories in Beijing and Tianjin, China[J]. Geothermics, 2011, 40(2): 125-135.
- [10] 庞忠和, 胡圣标, 汪集旻. 中国地热能发展路线图[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 18-24.
- [11] 杨峰田, 庞忠和, 王彩会, 等. 苏北盆地老子山地热田成因模式[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 2012, 42(2): 468-475.
- [12] 罗璐, 庞忠和, 杨峰田. 苏北盆地建湖隆起碳酸盐岩储层中的硫酸盐型热矿泉水成因[J]. 地学前缘, 2015, 22(2): 263-270.
- [13] 庞忠和, 孔彦龙, 庞菊梅, 等. 雄安新区地热资源与开发利用研究[J]. 中国科学院院刊, 2017, 32(11): 7.
- [14] Lv L H, Pang Z H, Kong Y L, et al. Geochemical and isotopic evidence on the recharge and circulation of geothermal water in the Tangshan Geothermal System near Nanjing, China: Implications for sustainable development[J]. Hydrogeology Journal, 2018, 26(5): 1705-1719.
- [15] Bao Y F, Pang Z H, Huang T M, et al. Chemical and isotopic evidences on evaporite dissolution as the origin of high sulfate water in a karst geothermal reservoir[J]. Applied Geochemistry, 2022, 145: 105419.
- [16] 桂树强, 杨艳, 唐玉阳. 长江中下游地区水源热泵区域功能系统关键技术与应用[M]. 武汉: 长江出版社, 2022: 215.
- [17] 中国地质调查局. 中国地下水监测工程年度报告2021[R]. 北京: 中国地质调查局, 2022.

A roadmap of geothermal energy development for the Yangtze River Delta region

PANG Zhonghe^{1,2}, KONG Yanlong^{1,2}, GONG Yulie³, WANG Jiyang^{1,2}

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

2. Innovation Academy for Earth Science, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

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

Abstract After reviewing the development of global geothermal industry as well as that in China, this paper systematically combs the key issues including the potential and the occurrence of geothermal resources in the Yangtze River Delta region, which has been mapped and announced by the central government for integrated economic development, the innovative technologies for geothermal comprehensive utilization, and the innovative models for geothermal industry development. On this basis, the paper puts forward strategic suggestions for the development of geothermal industry in the region. The main understanding is that in the economically developed Yangtze River Delta region, the population density is high, the proportion of building energy consumption is also high, and in recent years, the air temperature in the south has repeatedly set new low, and the demand for heating and cooling of residents is increasing, while relying on coal heating causes the deterioration of air quality in winter, and the shortage of clean energy is increasing, which is a difficult demand to meet in the energy sector. It can be concluded that, the Yangtze River Delta region is rich in geothermal resources, and has a large market demand and a good foundation for development and utilization, but the degree of development and utilization is still insufficient. If the top-level master plan is formulated, which is then incorporated into local social and economic planning, and guided by supportive policies, the comprehensive development and utilization of geothermal energy is expected to make greater contributions to the energy transition and meeting the goal of carbon neutrality.

Keywords roadmap; geothermal direct use; carbon neutrality; district heating; the Yangtze River Delta; heat storage ●



(责任编辑 祝叶华)