

中国地热能发展路线图

庞忠和, 胡圣标, 汪集旸

中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100029

摘要 中国地热能潜力巨大, 可以为应对气候变化作出显著贡献。本文提出中国地热能技术发展途径是“四化”, 即多元化、规模化、精细化、绿色化; 地热能产业发展道路是“三步走”, 即近期——中低温利用与高温水热发电、中期——中低温水热发电、远期——干热发电与利用。政府的政策引导与产、学、研、用相结合是实现地热能技术与产业发展目标之关键。

关键词 地热能; 路线图; 发展愿景

中图分类号 P314

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.32.002

A Roadmap to Geothermal Energy Development in China

PANG Zhonghe, HU Shengbiao, WANG Jiyang

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

Abstract China possesses a high potential of geothermal energy. A suitable roadmap for technology and industry development is required in order to realize the vision meeting demand on global climate change mitigation. It is proposed that the future geothermal technology development in China will be characterized by the diversification of resources and utilizations, the scale enlargement of development projects, the refinement of advanced technologies, and sustainability guarantee. The geothermal industry development will be focused on low-medium temperature direct use and high-temperature geothermal power generation in the near future, power generation from low-medium temperature in middle period, and Hot Dry Rock (HDR) energy combined heat and power in the long term. The leading role played by government, supplemented by the coordination among researchers, educators, producers, and consumers will be the key to successful geothermal technology and industry development in China.

Keywords geothermal energy; roadmap; vision

0 引言

在可再生能源大家族中, 地热是唯一的来自地球内部的能量。因为地球处于壮年期, 地心温度高达 4500°C, 所以能量巨大。由于人类利用的热量很小, 地温一般可以在相同的时间尺度上恢复, 因而地热能是可再生能源。只要设定合理的利用上限, 地热田的寿命可以达到 100—300a^[1]。地热能是一种清洁的能源, 基本上不污染大气, 也不排放温室气体。地热能具有来源稳定的特征, 平均利用系数高达 73%, 地热电站的利用系数可达 95%, 也易于调峰和实施热电联供。而且, 电站建设与运行费用也不算高, 地热直接利用的成本更低。采用地热泵技术开采浅层地热能也比其他热源更为有利, 主要在于它可以把夏季回收的热量用于冬天供热, 从而降低了能耗。

尽管地热能具有巨大潜力和显著的优势, 但是, 由于技术发展水平及政策等因素的制约, 目前它在能源结构中发挥

的作用仍然较小, 不过, 未来地热能可望发挥很大作用。为了确定未来地热能的发展战略, 技术路线图的研制是一项重要工作。路线图可以帮助政府制定能源发展规划与相关政策。它的具体作用还在于: (1) 预测能源发展趋势; (2) 找出发展瓶颈与障碍; (3) 确立新技术研发的投资方向; (4) 引导能源产业发展; (5) 突出政府主导作用; (6) 促进国家间的技术转移与知识共享。

近年来, 国际能源署 (IEA) 牵头制定了世界地热能技术路线图^[2], 政府间气候变化组织 (IPCC) 牵头编写了地热能特别报告^[3]。美国能源部领导完成了关于美国地热能的著名的三大报告, 即《地热能的未来》、《地热能技术评估》、《地热能市场评估》。报告充分肯定了地热能在未来美国能源构成中的重要地位, 对美国乃至世界地热能的技术研发与产业发展发挥了重要的导向作用。

国际能源署领导了世界地热能技术路线图的制定, 自

收稿日期: 2012-10-01; 修回日期: 2012-10-31

基金项目: 中国石油化工集团公司科技部项目 (JP12023); 国家高技术研究发展计划 (863 计划) 项目 (2008AA062303, 2011AA050604, 2012AA052801)

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

2010年开始制定,并于2011年正式发布。IEA的路线图内容包括:全球地热资源的潜力,至2050年的地热能愿景,地热能开发利用技术现状,不同时间节点上的发展目标和相应的行动方案、配套政策措施等内容。这个路线图仅涉及了水热型和干热型地热能的发电与直接利用。另外一项工作是由政府间气候变化组织完成的地热能特别报告(IPCC SRREN)^[1]。该报告涉及的地热能类型更多,与IEA的路线图不同的是,它对于浅层地热能也给出了发展愿景。

此外,中国科学院组织编制了中国能源技术路线图,其中包括地热能部分。中国地球物理学会地热专业委员会也多次组织国内相关专家研讨地热能发展战略。路线图的制定实际上是一次科技界与企业界对于能源发展取得共识的机会与表达的平台,对于技术与产业发展,对于政府能源政策的制定具有一定支撑作用。本文在借鉴国外地热能发展战略研究与技术路线图制定方法的基础上,结合多次讨论中形成的认识,探讨中国地热能技术与产业发展的路线图。

1 世界地热能技术路线图

1.1 地热资源与利用现状

地热能分为浅热、水热和干热3种主要类型。其利用方式包括发电和直接利用两个主要方面。考虑到技术上的差异,IEA的路线图仅包括水热能和干热能开发。

根据目前的评价结果,水热型地热能的电力资源量为每年45EJ,或12500TW·h,这个数字相当于2008年全世界发电量的62%。直接利用的地热资源量为每年1040EJ,相当于289000TW·h,是2008年全世界用热量的6.5倍。

干热岩地热资源潜力巨大。尽管目前尚未作出全球总量的评价结果,但是,美国和中国的数据已经表明,这个量是巨大的。据美国麻省理工学院(MIT)的评估报告^[4],美国在深度3.5—7.5km之间、温度150—250℃范围内具有约1330×10⁴EJ的巨大基础资源,只开发这些资源的2%,就相当于2006年美国一次能源消耗量的2600倍^[5]。

目前,全球共有78个国家利用地热能^[6],其中27个国家拥有地热发电厂^[7-14]。截止2010年,全球地热发电的装机容量为10.7GWe。全球地热直接利用的装机容量达到50.1GWt,约为地热发电的5倍。1995—2010年,世界地热直接利用的增长率达到13%,其中浅层地热能的贡献比较大。

1.2 发展愿景

基于增强地热系统技术的发展前景和应对气候变化的需求,IEA提出到2050年世界地热能发展愿景为地热发电量达到每年1400TW·h,约占全球总发电量的3.5%(图1),地热能直接利用的量将达到每年5.8EJ,相当于1600TW·h热量,占总供热需求的3.9%。这些愿景的提出与IEA预测的2050年全球二氧化碳减排目标(ETP2010)相关,同时,假定干热岩发电将在2030年达到商业利用的水平,并将逐步占据重要地位,到2050年占据地热发电及直接利用总量的50%。

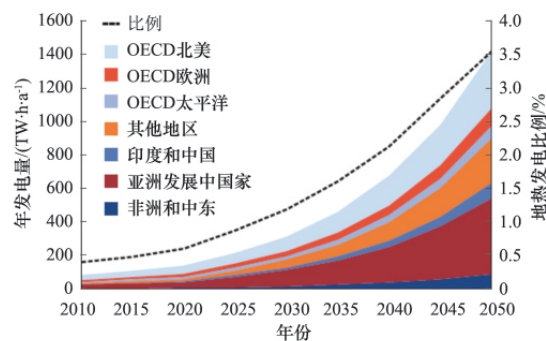


图1 世界不同国家和地区的地热发电量预测(IEA,2011)

Fig. 1 Forecast of geothermal generating capacity in the different countries and regions of the world (IEA, 2011)

1.3 地热能利用技术

1974—2000年,美国Los Alamos国家实验室(LANL)在位于新墨西哥州Fenton Hill的干热岩(EGS)试验场开展了两期试验研究。在4390m深井中获得的最高井底温度为327℃。注水试验表明,在冷水注入流量为12.5—15kg/s时,产生的热水温度在180℃以上,但该试验规模较小,发电容量小于0.5MW^[15]。尽管如此,该试验表明EGS技术已非常接近于商业示范。

目前许多国家开展了EGS试验研究,如德国、英国、法国、澳大利亚、日本、瑞典等。预计到2030年,干热岩地热发电将达到商业规模。

同时,各国也在积极探索超临界流体地热能、岩浆地热能、海域地热能等“非常规”地热能。但是,这些技术何时能够商业化尚无明确的时间表。

在发电技术和热电联供技术方面,也取得了可喜的进展,大大拓展了地热能的利用空间^[16]。

2 中国地热能技术路线图

2.1 地热资源与利用现状

2.1.1 干热岩地热能

根据国土资源部最近发布的评价数据,中国浅层地热能资源量相当于95亿t标准煤。每年可利用量相当于3.5亿t标准煤。全国水热型地热能资源储量折合标准煤8530亿t;每年可利用量相当于6.4亿t标准煤。中国大陆3000—10000m深度范围内干热岩地热能资源量相当于860万亿t标准煤,相当于中国大陆2010年度能源消耗总量的26万倍。

汪集旻等^[17]根据最近更新的大地热流数据和深部地温资料,给出了中国陆域干热岩地热能资源评价,圈定了优势区域(图2),按照2%的可开采比例,其能量相当于2010年中国总能耗的4400倍。

2.1.2 大型岩溶热储及开发利用

中国几大主要沉积盆地均有丰富的水热型地热资源,包括华北平原、苏北盆地、松辽盆地、鄂尔多斯盆地、四川盆地、

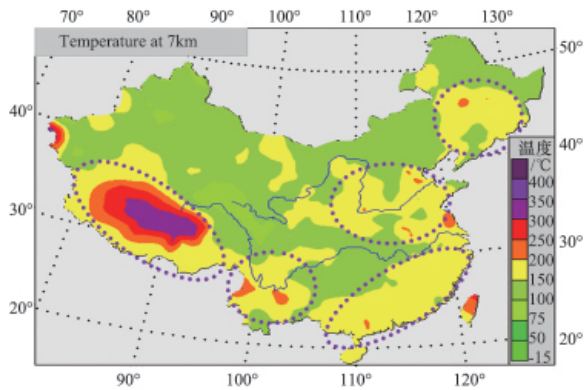


图2 中国大陆地区深部(7km)地温与干热岩地热利用优势区域

Fig. 2 Deep (7km) temperatures and advantage regions of the HDR geothermal energy in the continental area of China

江汉盆地等。王贵玲^[8]估算了全国主要平原(盆地)地热资源量,约为 2.5×10^{23} J,折合标准煤 8531.9 亿 t。但是,其计算的热储大部分为中生代和新生代地层,深部的古生代,甚至元古代地层未做计算。

经勘探发现和研究证实,某些盆地在沉积盖层下游深部基岩热水储层系统发育,最典型的是华北平原北段^[9]。该基岩热储层由岩溶卡斯特的中、上元古界和下古生界碳酸盐岩地层组成,在隐伏的基岩隆起带(或凸起带)这一系统具有重要经济价值。

从已知的基岩热储发育和形成特点可以推测,以中朝陆台、扬子准陆台和塔里木陆台为基底发育起来的许多盆地都有发育深部基岩热储,因为:(1) 这些古老台块广泛发育有古生界或中、上元古界碳酸盐岩建造;(2) 这些台块在碳酸盐岩建造之后曾经历过地壳隆升和构造变动,碳酸盐岩地层遭受风化剥蚀和岩溶化作用,裂隙岩溶化的碳酸盐岩具深部储集层;(3) 基岩储层为中、新生代厚层沉积掩盖,有利于储集层的聚热和保温。

岩溶在中国分布广泛,碳酸盐岩的出露面积约 91 万 km^2 ^[9]。

控制古岩溶发育的最重要的外在因素是构造,它是岩溶发育的基础,且控制了岩溶分区,断裂和裂隙是地下热水运动的主要通道。岩溶储层作为地热资源储层的潜力巨大,中国古生界碳酸盐岩的分布区域主要集中在各大沉积盆地内^[21](图3),其中,处于较高热流值背景下的几大主要区域有:渤海湾盆地、鄂尔多斯盆地、苏北盆地、江汉盆地、楚雄盆地、兰坪思茅盆地、昂拉仁错盆地和羌塘盆地。

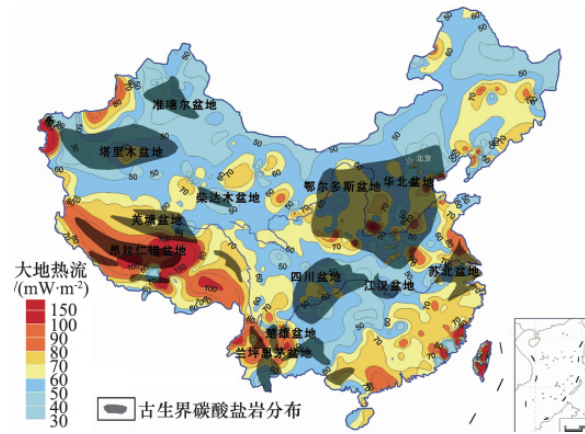


图3 中国大型岩溶热储及其热背景

Fig. 3 Large karstic geothermal reservoirs and thermal background in China

2010 年,中国非电直接利用的能量当量为:装机容量 3687MWt,相当于电量 12605MW·h,其中 55%作为洗浴及温泉疗养,14%为地热供暖,其他 14%为地热“三联供”,属世界首位。近年来,浅层地热能的利用为 3000MWt,且发展迅速。截止 2011 年底,供暖面积达到 1.4 亿 m^2 。但中国地热发电装机容量为 25MW,20 多年没有增加。

2.2 2050 年发展愿景

中国工程院于 2011 年提出了地热能直接利用和发电不同时间节点的发展目标(表 1)^[22]。到 2050 年,中低温地热直接利用的规模与总量将是现状的三倍,浅层地热能利用的规模可达 50000MWt,地热发电部分,将大力提升高温发电的装机容量,中低温和 EGS 地热发电也将重点发展。

表 1 中国地热能发展战略目标

Table 1 Strategic targets of geothermal energy development in China

年份	地热发电/MWe			直接利用/MWt	
	高温地热发电	中低温地热发电	EGS 地热发电	中低温地热直接利用	浅层地热能利用
现状	25.18	0.5	无	3239	3000
2020 年	75	2.5	试验	4000	10000
2030 年	200	20	25	6500	20000
2050 年	500	100	200	10000	50000

针对干热岩的开发利用,中国科学院的能源技术路线图给出了相应的愿景(图 4)。到 2035 年,中国的干热岩开采技术要达到商业化水平。

2012 年国家发展和改革委员会能源局发布了中国可再生能源十二五规划,确定了可再生能源发电占总发电量的 20% 的宏伟目标。其中地热能的发展目标为:在青藏铁路沿

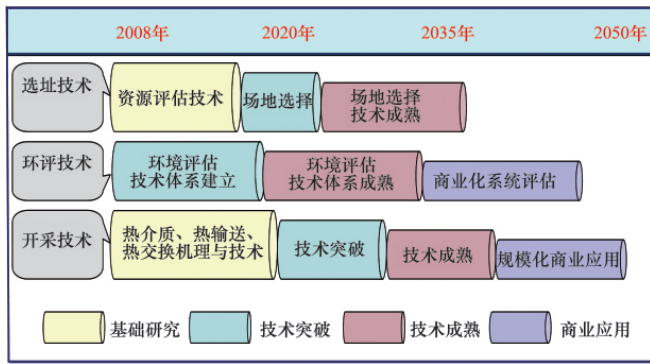


图 4 干热岩地热能利用技术路线图 2050

Fig. 4 Technology roadmap of HDR geothermal energy (2050)

滇西南等高温地热资源分布区,启动建设若干兆瓦级地热电站。在东部沿海及天山北麓等中低温地热资源富集分布区,因地制宜发展中小型分布式中低温地热发电项目。到2015年,各类地热能开发利用总量达到1500万t标准煤,其中,地热发电装机容量争取达到10万kW,浅层地热能建筑供热制冷面积达到5亿m²。这个规划中地热发电量超过了中国工程院路线图确定的2020年发电目标,体现了对于技术与市场的信心。

2.3 地热能利用技术

中低温地热发电技术在中国拥有悠久的历史,积累了丰富的实践经验^[23-24]。20世纪70年代初,先后在广东丰顺、山东招远、辽宁熊岳、江西温汤、湖南灰汤、广西象州、河北怀来等地建成试验性地热电站。这些地热区热水的温度低,均属于中低温地热,大部分采用一次扩容发电,仅有江西温汤采用双工质循环。目前除广东丰顺地热电站还在运行外,其他均已停止运行。

地热能实质上是一种以流体为载体的热能,地热发电属于火力发电,所有一切可以把热能转化为电能的技术和方法理论上都可以用于地热发电。热能转化成机械功再转化为电能的最实用的方法只有通过热力循环,用热机来实现这种转化。利用不同的工质,或不同的热力过程,可以组成不同的热力循环。目前,使用较多的是双工质发电,较成熟的有两种:有机朗肯循环和Kalina循环。

干热岩(EGS)开发利用技术在中国已经起步^[25]。干热岩(增强型地热系统)开发的关键技术是:深部地热资源的圈定和储量评价;干热岩选址、调查和描述;降低成本和提高效率的技术(例如数值模拟)。部分其他技术也同样重要,例如深井开采、断裂特征、高温测井、液体成像、激发预测模型、示踪试验和数据解释及层间封闭技术。未来的干热岩开发与目前的高温水热型地热田均面临钻井技术这一难题^[26]。

水热型地热田的回灌式开采技术是实现地热资源可持续发展的必不可少的技术。但是,地热回灌非常复杂,不

但要考虑地下水的运移,还要考虑热的运移。如果回灌过程中出现不成熟的热突破,即回灌水很快回到开采井,就会极大地危及到地热田的寿命^[26]。因此,地热大规模回灌前进行地热回灌试验,确定热储的联通性以及回灌井与开采井之间的水力联系是非常必要的。同时,需要借助数值模拟的手段对不同生产和回灌情景下热储压力和温度的变化进行预测,指导地热资源的可持续开发利用。

中国目前的回灌热储可分为2种,一种为碳酸盐岩热储,包括灰岩和白云岩;另一种为砂岩热储,主要为新近系和古近系。天津、山东东营、北京和河北雄县地区对地热回灌进行了研究,并取得了一定的成果^[27-32]。

利用CO₂提高地热采收率的技术是一项新探索。在开展CO₂地质封存技术探索的过程中,庞忠和等^[33]提出了CO₂-EATER模式(CO₂ Enhanced Aquifer Thermal Energy Recovery),该模式指的是以CO₂作为化学激发剂,注入到砂岩储层中,通过与储层的碳酸盐矿物反应提高储层的渗透率和孔隙度,达到提高储层回灌率的目的,这对中国典型的中低温砂岩热储的可持续开发利用具有重要意义^[34]。

3 地热能技术发展战略

3.1 现状与问题

(1) 地热利用技术发展严重滞后。

近20年来地热发电停滞不前,以致地热发电技术远远落后于世界先进国家。地热直接利用虽然发展较好,但也存在资源利用效率较低的问题,没有形成资源梯级开发综合利用的最佳模式。地热成井工艺、回灌技术、以及结垢和腐蚀等技术问题较难处理,研发工作没有跟上。

(2) 人力资源匮乏、研究力量薄弱。

20世纪70—90年代,中国呈现地热能开发利用热潮,培养了一大批技术人才,但近20年来人力资源匮乏,人才队伍远远落后于风能、太阳能等可再生能源领域。

3.2 研发目标

基于存在的问题,本文提出地热能相关技术的研发方向应该是“四化”,即多元化、规模化、精细化、绿色化。

根据中国的2050年愿景,地热能开发利用技术的挑战是高温水热型地热能的勘探与开采技术,中低温地热发电技术,以及干热岩地热能的开发利用技术。

2020年地热能的技术发展目标是:水热型地热能的勘探技术显著提高,对于深层地热储(>1km)的地质探测准确率和打井成功率显著提高;水热型地热能开采技术整体上显著提高,包括能源利用率高的开发利用模式,形成市场远景好的成套技术,包括防腐防垢与尾水回灌技术;水热型地热能发电量中的技术贡献率大幅度提高,自主知识产权技术份额大大增加。干热岩地热能勘探、开发和利用技术取得关键的突破,形成储层属性与多场多相流体-热过程试验测试与模拟平台,实现小型先导性现场示范工程。

国家 863 计划中“十二五”(至 2015 年)期间已经立项的有:干热岩地热能利用技术,重点研究压裂技术与探测;中低温地热能发电技术,重点研究双循环发电技术;浅层地热能中低温地热综合利用技术,重点研究热泵及综合利用技术。

除了已经布局的内容之外,至 2020 年的技术研发重点任务主要有:在高温水热型地热能利用技术上,可以部署勘探、开采与发电综合性示范项目,并且以青藏高原为重点地区;在中低温水热型地热能利用技术上,可以部署沉积盆地大型岩溶热储的勘探、开采与综合利用示范项目,并且以东部地区的华北平原等“热盆”为重点地区;在干热岩地热能开发利用技术上,可以部署选址评价技术研究项目,涵盖全国地热背景较高地区与不同类型的储层,在开发利用模式上应该鼓励新的探索与试验,如无需压裂的开采,节约用水、用地,有利于碳减排以及和现有水热型地热田开采相结合的低成本与更加环保的技术路线。

在地热能开发利用对环境的影响方面,需要重点研究干热岩开采中人工造储诱发地震和各类地热开发工程中尾水排放的环境污染问题。

3.3 对策要点

(1) 重点扶持优秀地热能研发团队,提高自主创新能力。

现代地热能技术与以往相比,更加富于挑战性,涉及多个学科与专业。在国家能源局的指导下,建立地热能国家重点实验室,利用全国优势力量,加强人才的引进和培养,突破关键技术,强化对国家战略任务、重点工程技术的支撑和保障,提高地热能技术自主创新和核心竞争力。

(2) 加强技术研发,实施技术示范工程。

重点解决地热能开发利用过程中的关键科学技术问题,以国家财政扶持和企业投入相结合的方式,设立国家专项,实施大规模地热能开发利用示范工程。启动多个地热能发电的示范项目。深层地热能发电与开发利用是一项综合性很强的工作,它的开发利用包括 3 个主要部分:① 深层地热能开发利用选址与资源评价;② 地热发电技术;③ 人工热储层的形成或改造技术,如水力压裂等。

4 地热能产业发展战略

4.1 产业发展目标

到 2020 年地热能产业发展的目标可以概括为:地热直接利用总量继续保持世界第一,年增长率继续保持在 10% 左右,地热发电装机容量排名比现在提前 2—3 位。

4.2 现状与问题

总体上看,地热供暖及地源热泵产业虽然已得到国家政策扶持,但力度还不够。并且,目前国内地热开发项目呈分散式和小规模,不利于地热资源的综合高效利用。而地热发电产业近 30 年来几乎没有得到国家的支持,《可再生能源法》虽然起了重要的指导作用,但并没有明确地热发电项目的优惠扶持政策。

中国地热发电产业没有得到应有发展的原因是多方面的。其中主要有:(1) 国家重视程度不够,政策扶持不到位,地热电“不如电网供电便宜”;(2) 地热资源的勘探、评价过程比较复杂,费时费钱,而常规地热资源多分布在技术水平较低、资金缺乏的边远地区,市场需求不足。

4.3 产业发展路线

(1) 摸清资源家底,建立资源数据信息库。

启动资源调查项目,科学规划,重点部署,开展宜于发电的地热资源的调查研究;进行全国地热资源评价和区划,确定国内具有经济开发价值的重点地域,将评价范围扩大到干热岩地热资源。

(2) 制订优惠扶持政策,加速地热产业发展。

参照太阳能、风能、生物质能开发利用的国家补贴方式,对地热能开发利用,特别是对地热发电实行激励机制和扶持政策,尽快改变中国地热发电落后状况。

(3) 实行三步走战略。

基于技术经济的条件,地热能产业发展的道路是“三步走”,即近期——中低温利用与高温水热发电、中期——中低温水热发电、远期——干热利用与发电。

上述发展路线的实现,需要政府主导下的产、学、研、用分工合作的共同努力(表 2)^[2]。

表 2 地热能发展中政、产、学、研、用的分工合作机制与任务分解

Table 2 The cooperative mechanism and task allocation for government, industry, education, research, and users for geothermal energy development

序号	任务	主体
1	建立并发布地热资源数据库	政府机构
2	提出地热发电与直接利用的长期目标	政府机构
3	在地热发电与直接利用具备竞争力之前实施经济上的刺激政策	政府机构
4	完善简便快捷的地热能开发利用审批程序	政府机构
5	考虑引入地热资源勘查风险保障办法	政府机构
6	加强专业人才的培训与正规教育	政府机构+学校
7	增加地热能研发公共投入	政府机构
8	确保地热能研发公共投入的长期可持续性	政府机构
9	加强国际合作,充分发挥国内实力雄厚的研究中心的引领作用	政府机构
10	建立可供政府发布的地热资源数据库	研究机构

表 2 地热能发展中政、产、学、研、用的分工合作机制与任务分解(续)

Table 2 The cooperative mechanism and task allocation for government, industry, education, research, and users for geothermal energy development (continued)

序号	任务	主体
11	建立干热岩选址与评价技术整套方法	研究机构
12	开发地热方法与模型,用以找到干热岩或隐伏型水热资源	研究机构
13	开发廉价的钻井技术或降低成本的新工艺	研究机构
14	改进坚硬岩石和高温高压钻井技术	研究机构
15	探索开采干热岩地热能的替代技术的可行性	研究机构
16	探索开采水热型地热能的替代技术的可行性	研究机构
17	加强国际合作,充分发挥国内实力雄厚的研究中心的引领作用	研究机构
18	采用干热岩选址与评价技术整套方法	地热开发公司
19	利用地热方法与模型用以找到干热岩或隐伏型水热资源	地热开发公司
20	提高热电联供系统的效率与可靠性	地热开发公司
21	建设适应不同地质条件的示范性干热岩地热能发电站	地热开发公司
22	不断强化增强型地热系统的可持续利用	地热开发公司
23	改进健康、安全与环境事务的管理,包括诱发地震的风险管理	地热开发公司
24	把单个发电站的规模,从 50MW 放大到 200MW	地热开发公司
25	建立与应用取得社区对干热岩的支持以及对诱发地震的理解	地热开发公司
26	不断探索地热直接利用的途径	钻井公司
27	开发廉价的钻井技术或降低成本的新工艺	钻井公司
28	改进坚硬岩石和高温高压钻井技术	钻井公司
29	改进井下设备,包括监测与测井	钻井公司
30	探索油田伴生地热能的开发利用技术	石油公司
31	建立地热资源勘查的融资途径	金融公司

5 结论

(1) 地热资源潜力巨大,可以长期保障人类未来的电力和热能供应,为了将 3—10km 深度范围内的干热岩地热能的一定比例开采出来,需要加大技术研发力度。

(2) 地热能技术发展途径是实现“四化”,即多元化、规模化、精细化、绿色化。

(3) 现实的地热产业发展道路是“三步走”,即近期——中低温利用与高温水热发电、中期——中低温水热发电、远期——干热发电与利用。

(4) 地热能发展路线图的实现需要政府主导,产、学、研、用密切结合的努力。

致谢:本文的内容是在多次国内外地热研讨会的广泛讨论基础上形成的,尽管文章只代表作者的观点,但是,对于讨论中各有关专家的贡献不应忽视。特别感谢多吉、王秉忱、郑克棧、田廷山、宾德志、韩再生、王成善、李克文、黄少鹏、赵平等。感谢博士生孔彦龙和罗璐在文稿编辑中给予的帮助,感谢科技导报社的领导及其编辑团队给予的大力支持。

参考文献 (References)

- [1] Axelsson G. Sustainable geothermal utilization—Case histories; definitions; research issues and modeling[J]. *Geothermics*, 2010, 39(4): 283–291.
- [2] International Energy Agency. Technology roadmaps geothermal heat and power[R]. Paris, France: International Energy Agency, 2011: 52.
- [3] Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

IPCC special report on renewable energy sources and climate change mitigation[R]. Cambridge, USA: Cambridge, 2011: 1075.

- [4] Massachusetts Institute of Technology. The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century[R]. Boston, USA: Massachusetts Institute of Technology, 2006.
- [5] Massachusetts Institute of Technology. The future of geothermal energy: Impact of Enhanced Geothermal Systems (EGS) on the United States in the 21st century[M]. Boston: Massachusetts Institute of Technology, 2006: 372.
- [6] Lund J W, Freeston D H, Boyd T H. Direct utilization of geothermal energy 2010 worldwide review[J]. *Geothermics*, 2011, 30(3): 159–180.
- [7] 庞忠和. 美国地热能新技术与政府的政策倾向[N]. 科学时报, 2008–7–14.
Pang Zhonghe. New geothermal technology and government's policy in American[N]. *China Science Daily*, 2008–7–14.
- [8] 庞忠和. 澳大利亚利用增强型地热系统开发深层地热资源[N]. 科学时报, 2008–8–10.
Pang Zhonghe. Development of deep geothermal resources by using enhanced geothermal system in Australia[N]. *China Science Daily*, 2008–8–10.
- [9] 庞忠和. 瑞士政府投资重点: 开发地热资源[N]. 科学时报, 2008–8–25.
Pang Zhonghe. Investment priority of Swiss government: Development of geothermal resources[N]. *China Science Daily*, 2008–8–25.
- [10] 庞忠和. 亲历冰岛地热开发: 冰火交融 创造奇迹 [N]. 科学时报, 2008–9–7.
Pang Zhonghe. Experiencing the development of geothermal resources in

- Iceland: Fire and ice blend to work miracles [N]. China Science Daily, 2008-9-7.
- [11] 庞忠和. 冰岛: 多元化开发地热[N]. 科学时报, 2008-10-5.
Pang Zhonghe. Iceland: Diversification in development of geothermal resources[N]. China Science Daily, 2008-10-5.
- [12] 庞忠和. 花园之国的绿色能源: 新西兰地热开发 [N]. 科学时报, 2008-10-22.
Pang Zhonghe. Green energy in the country of garden: Development of geothermal resources in New Zealand [N]. China Science Daily, 2008-10-22.
- [13] 庞忠和. 地热成为德国公众喜爱的职业[N]. 科学时报, 2008-11-16.
Pang Zhonghe. Geotherm becomes the German public's favorite profession[N]. China Science Daily, 2008-11-16.
- [14] 庞忠和. 德靠技术进步开发地热能[N]. 科学时报, 2008-11-30.
Pang Zhonghe. Depending on technological progress to development geothermal resources in Germany[N]. China Science Daily, 2008-11-30.
- [15] Duchane D, Brown D. Hot Dry Rock (HDR) geothermal energy research and development at fenton hill, new Mexico[J/OL]. [2012-08-30]. <http://geoheat.oit.edu/bulletin/bull23-4/art4.pdf>.
- [16] 罗兰德·洪恩, 李克文. 世界地热发电新进展 [J]. 科技导报, 2012, 30(32): 60-66.
Roland N Home, Li Kewen. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 60-66.
- [17] 汪集昉, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 25-31.
Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, et al. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 25-31.
- [18] 王贵玲, 蒯文静, 刘志明, 等. 中国地热资源潜力评估[C]. 中国地球物理学会第二十七届年会论文集, 长沙, 2011.
Wang Guiling, Lin Wenjing, Liu Zhiming, et al. Estimate of geothermal resources potential in China [C]. Chinese Geophysical Society Twenty-seventh Annual Symposium, Changsha, 2011.
- [19] 陈墨香, 汪集昉, 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.
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Geothermal resources in China -formation characteristics and potential evaluation [M]. Beijing: Science Press, 1994.
- [20] 李大通, 罗雁. 中国碳酸盐岩分布面积测量 [J]. 中国岩溶, 1983(2): 147-150.
Li Datong, Luo Yan. *Carsologica Sinica*, 1983(2): 147-150.
- [21] 康玉柱. 中国古生代碳酸盐岩古岩溶储集特征与油气分布 [J]. 天然气工业, 2008, 28(6): 1-12.
Kang Yuzhu. *Natural Gas Industry*, 2008, 28(6): 1-12.
- [22] 中国能源中长期发展战略研究项目组. 中国能源中长期(2030、2050)发展战略研究: 可再生能源卷[M].北京: 科学出版社, 2011.
Working group on mid to long term development strategy of energy in China. The mid and long-term(2030, 2050) development strategy of energy in China: Renewable energy[M]. Beijing: Science Press, 2011.
- [23] 朱家玲, 卢志勇, 张伟, 等. Kalina 地热发电循环分析 [J]. 科技导报, 2012, 30(32): 46-50.
Zhu Jialing, Lu Zhiyong, Zhang Wei, et al. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 46-50.
- [24] 骆超, 龚宇烈, 马伟斌. 地热发电及综合梯级利用系统 [J]. 科技导报, 2012, 30(32): 55-59.
Luo Chao, Gong Yulie, Ma Weibin. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 55-59.
- [25] 许天福, 张延军, 曾昭发, 等. 增强型地热系统(干热岩)开发技术进展 [J]. 科技导报, 2012, 30(32): 42-45.
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 42-45.
- [26] 查永进, 冯晓炜, 葛云华, 等. 高温地热发电的钻井技术进展[J]. 科技导报, 2012, 30(32): 51-54.
Zha Yongjin, Feng Xiaowei, Ge Yunhua, et al. *Science & Technology Review*, 2012, 30(32): 51-54.
- [27] 刘久荣. 地热回灌的发展现状 [J]. 水文地质工程地质, 2003, 30(3): 100-104.
Liu Jiurong. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2003, 30(3): 100-104.
- [28] 曾梅香, 阮传侠, 赵越波, 等. 岩溶裂隙热储层采、灌井井间连通试验研究——以天津市王兰庄地热田回灌井 HX-25B 示踪测试为例[J]. 地质与勘探, 2008, 44(2): 105-109.
Zeng Meixiang, Ruan Chuanxia, Zhao Yuebo, et al. *Geology and Prospecting*, 2008, 44(2): 105-109.
- [29] 孙宝成, 曾梅香, 林黎, 等. 天津地热对井回灌系统中的同位素示踪技术[J]. 地质调查与研究, 2005, 28(3): 187-192.
Sun Baocheng, Zeng Meixiang, Lin Li, et al. *Geological Survey and Research*, 2005, 28(3): 187-192.
- [30] 王坤, 朱家玲. 天津基岩热储对井系统回灌与示踪剂试验研究[J]. 太阳能学报, 2003, 24(2): 162-166.
Wang Kun, Zhu Jialing. *Acta Energetica Solaria Sinica*, 2003, 24(2): 162-166.
- [31] 周世海, 杨询昌, 梁伟, 等. 德州市城区地热水人工回灌试验研究[J]. 山东国土资源, 2007, 23(9): 11-14.
Guo Shihai, Yang Xunchang, Liang Wei, et al. *Shandong Land and Resources*, 2007, 23(9): 11-14.
- [32] 高宗军, 郭加朋, 李哲, 等. 东营市城区热储人工回灌条件及分区研究[J]. 地下水, 2009, 31(5): 4-8.
Gao Zongjun, Guo Jiapeng, Li Zhe, et al. *Groundwater*, 2009, 31(5): 4-8.
- [33] 庞忠和, 段忠丰, 杨丰田. 二氧化碳地质封存技术进展 [C]//第二届废物地下处置学术研讨会论文集. 北京: 中国岩石力学与工程学会, 2006.
Pang Zhonghe, Duan Zhongfeng, Yang Fengtian. CO₂ geological storage technology progress [C]// The Second Waste Underground Disposal Academic Conference. Beijing: Chinese Rock Mechanics and Engineering Society, 2006.
- [34] 李义曼, 庞忠和, 杨丰田, 等. 北塘凹陷馆陶组地热水同位素与 CO₂-EATER 的可行性[C]. 中国地球物理学会第二十七届学术年会, 长沙, 2011.
Li Yiman, Pang Zhonghe, Yang Fengtian, et al. Feasibility analysis of CO₂-EATER and isotopes of geothermal water in Guantao formation in Beitang sag [C]. Chinese Geophysical Society Twenty-seventh Annual Symposium, Changsha, 2011.

(责任编辑 刘志远)

《科技导报》“卷首语”栏目征稿

“卷首语”栏目每期邀请一位中国科学院院士和中国工程院院士就重大科技现象、事件,以及学科发展趋势、科学研究热点和前沿问题等,撰文发表个人的见解、意见和评论。本栏目欢迎院士投稿,每篇文章约 2000 字,同时请提供作者学术简历、工作照和签名电子文档。投稿邮箱:kjdbbjb@cast.org.cn。