

长三角地区地热能评价

孔彦龙^{1,2,3}, 黄 坚⁴, 徐雪球⁵, 官 煜⁶, 汪燕林⁷, 程远志^{1,2},
王一波^{1,2}, 龚宇烈⁸, 张伟尊^{1,9}, 罗冠中^{1,9}, 陈高凯¹⁰,
庞忠和^{1,2,3}, 汪集暘^{1,2,3}

(1.中国科学院地质与地球物理研究所页岩气与地质工程重点实验室, 北京 100029;

2. 中国科学院地球科学研究院, 北京 100029

3. 中国科学院大学地球与行星科学学院, 北京 100049

4. 上海市地矿工程勘察集团有限公司, 上海 200072

5. 江苏省地质调查研究院, 南京 210018

6. 安徽省地质环境监测总站, 合肥 230001

7. 浙江省水文地质工程地质大队, 宁波 315012

8. 中国科学院广州能源研究所, 广州 510640

9. 中国矿业大学(北京)地球科学与测绘工程学院, 北京 100083

10. 万江新能源股份有限公司, 郑州 450008)

摘 要:长三角地区是我国地热能较为丰富的地区之一,广泛分布浅层地热能和中深层地热能。根据现有资料,采用体积法估算得到长三角地区 3km 以浅的地热能(包括浅层地热能和中深层水热型地热能)总量达 782 亿 t 标准煤的热量,年可利用量相当于 1.6 亿 t 标煤。可实现建筑物冬季供暖面积 24.8 亿 m²,夏季制冷面积 14.5 亿 m²。然而,目前长三角地区利用地热供暖和制冷的建筑面积仅有 0.57 亿 m²,不足可利用的 4%,开发利用潜力巨大。按照上述地热能评估结果,若在长三角地区已有建筑物中可以最大限度的保障采用地热供暖制冷,可在现有基础上减排二氧化碳 10%以上,若新增建筑均最大限度的采用地热供暖制冷,地热减排贡献可在 20%以上,在碳达峰与碳中和目标的实现过程中做出突出贡献。

关键词:地热资源评价;地热能;长三角;体积法;碳减排

长三角地区,即长江三角洲地区,包括上海市、江苏省、浙江省、安徽省,是我国经济发展最活跃、开放程度最高、创新能力最强的区域之一,在国家现代化建设大局和全方位开放格局中具有举足轻重的战略地位。目前,长三角地区建筑用能约占总能源消耗的 20%,依赖煤炭供暖致使冬季雾霾天气频发;夏季制冷需求过大,出现了“拉闸限电”现象。此外,国土面积约占全国 1/50 的长三角地区,CO₂ 排放量却占全国的 1/10 以上,煤炭消费强度也远超京津冀和珠三角地区。为了早日实现碳达峰和碳中和目标,满足居民获得感和幸福感不断提高的要求,随着建筑用能缺口的不断增大,增加能源供应成为现代化建设十分重要的方面。然而火电不能因为建筑用热再扩容,寻求非碳基、无污染的替代能源势在必行。在非碳基能

源种类中,地热是稳定、连续、安全的清洁能源,因此成为首选。

2020 年 4 月,中国科学院启动了咨询项目《长三角地区地热资源及其综合利用研究》,会同中国科学院以及长三角地区共 18 家单位联合开展了多次调研、研讨与科研攻关,致力于推进长三角地区能源结构优化。项目组在大量前期工作的基础之上,通过收集资料和再评价,对长三角地区地热能进行了汇总评估,用于服务和支持区域地热能的开发利用规划,助推长三角地区早日实现碳达峰和碳中和目标。

1 资源评价方法

参照地质标准《浅层地热能勘查评价规范》(DZ/T 0225—2009)和国家标准《地热资源地质

勘查规范》(GB/T 11615—2010)中的换热功率法和体积法,分别评估浅层地热能资源量和中深层水热型地热能的资源量。结合长三角地区实际的地热地质条件,将浅层地热能的评价深度定为0~200m,中深层地热能的评价深度定为200~3000m。

为便于地热能评价结果的有效利用,同时计算了地热能的可采资源量和可利用潜力。其中可采资源量的计算按照如下方法:

针对浅层地热能,利用总换热功率和供暖/制冷时长相乘进行可采资源量的计算。总换热功率的计算原则:对于地埋管地源热泵系统适宜或较适宜而地下水地源热泵不适宜的区域,按地埋管地源热泵换热功率计算总换热功率;对于地埋管地源热泵系统不适宜而地下水地源热泵系统适宜或较适宜的区域,按照地下水地源热泵换热功率计算总换热功率;而对于地埋管地源热泵系统和地下水地源热泵系统均适宜或较适宜的区域,则按照地埋管地源热泵换热功率的2/3和地下水地源热泵换热功率的1/3进行折算。

针对中深层地热能,在评价其地热能资源量的基础之上,再由地热能资源量乘以相应的回采系数计算得到可采资源量。其中回采系数依据具体的储层而定,比如:古近系砂岩热储回采系数为0.2,碳酸盐岩裂隙热储回采系数为0.15,中生代砂岩和花岗岩等火成岩类热储回采系数为0.1。

可利用潜力的计算则由可采资源量除以供热/制冷单位平米的负荷和时长获得。单位平米的供热/制冷负荷参照地方建筑标准取值。需要说明的是,本文计算的地热能资源量不包括地表水资源量和污水源地热资源量等。

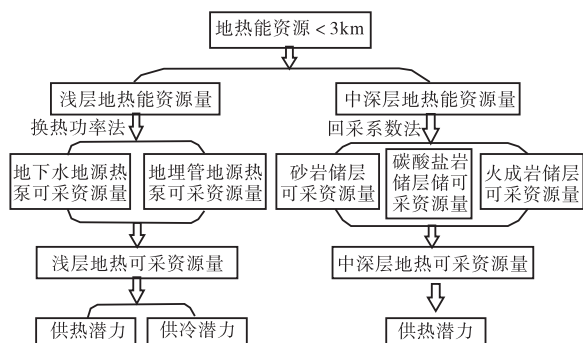


图1 地热资源评价流程

2 研究区地热地质

2.1 大地热流背景

大地热流是地球表面单位时间内单位面积上由地球内部以传导方式传至地表而后散发到宇宙太空中去的热量。它是衡量一个地区热背景的综合参数,能够确切地反映该地区地热场的基本特征。为了计算大地热流,通常要在地温呈现线性变化的同一段地层内,分别测定地温梯度和岩石热导率两个参数,然后将之相乘获得[5]。基于长三角地区大量钻孔和岩心热导率的实测结果,估算了长三角地区的大地热流值。从图2可以看出,长三角地区大地热流值从30到120mW/m²均有分布,但是大多数地区的热流值高于全球大陆大地热流的平均值65mW/m²,显示其具有较好的热背景,为形成区域上较好的热异常提供了基础。同时,可以注意到,低热流区主要集中在两淮地区推覆构造的上盘;高热流值区则主要集中在苏北盆地和江南隆起带东段(图2和图3)。其中,苏北盆地平均热流值约68mW/m²,属于典型的“热盆”。长三角地区的地热异常可以总结为“二次、二源”聚热模式,即中生代晚期中国东部克拉通区克拉通破坏引起的岩石圈热体制转变(如岩石圈厚度的巨量减薄等)和新生代广泛的岩石圈延伸;这两个构造—热事件共同决定了深部异常的幔源热,而上地壳尺度的热异常(浅部热源)则主要由热折射控制。

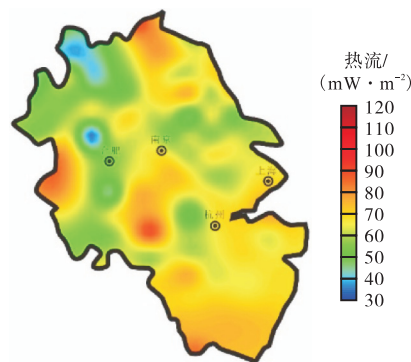


图2 长三角地区大地热流图

2.2 热储类型与分布

长三角地区见有孔隙型热储、岩溶型热储、基岩裂隙型热储和复合型热储(孔隙-裂隙),且以基岩裂隙型热储为主,热储的具体分布见图3。断层

以北东向分布为主,与多个北西向断裂交汇。区内相比之下,浙江省和上海市以基岩裂隙型热储为主,孔隙型热储相对较少;而江苏省则见有较多的孔隙型和岩溶型热储;安徽省热储类型较为齐全,以基岩裂隙型和复核型热储为主。从温泉井的分布来看,全区多处见有热水井或者温泉,井深已突破 3000m,热水最高温度达 93℃,最高流量超过 3500m³/d。

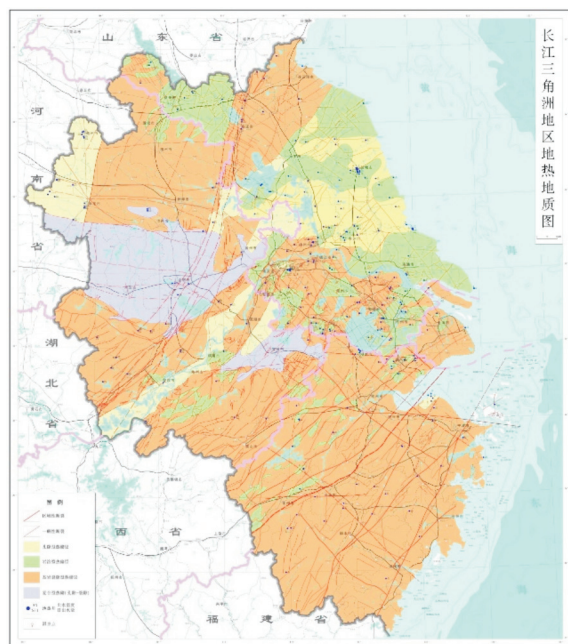


图3 长三角地区地热地质图

3 结果与讨论

3.1 资源量与供暖/制冷潜力

长三角地区 3km 以浅的地热资源总量达到了 782 亿 t 标准煤,其中可采资源量为 164.5 亿 t 标准煤。如图 4 所示,三省一市的资源量差异较大,其中江苏省的地热资源量最大,为 582 亿 t 标准煤,上海市的则最小,仅为 46 亿 t 标准煤,这主要与各省的面积大小以及地热储类型和厚度相关。将地热能的开采资源量折算为供暖和制冷潜力,则可实现冬季供暖面积 24.8 亿 m²,夏季制冷 14.5 亿 m²。

在总资源量中,尤其是在可采资源量中,浅层地热能资源占比非常高,且鉴于该地区既有供暖又有制冷的需求,是十分适宜开发浅层地热能的地区。计算结果显示,长三角地区浅层地热能资源具备供暖潜力为 17.1 亿 m²,制冷潜力则达 14.5

亿 m²,其中以安徽省最大,上海市则最小。

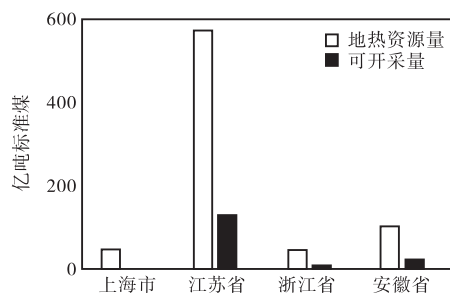


图4 长三角地区地热能评价结果

3.2 对地区减碳的意义

长三角地区煤炭消费强度过重,远超我国中东部平均消费水平,也远远高出与之经济发展速度相近的珠三角地区,碳排放量过高。因此,长三角地区有显著的碳减排压力。

建筑运行能耗约占总能耗的 20%,且呈逐年增加态势,对标欧洲发达国家,建筑运行能耗未来可占至总能耗的 50%,其中有约 1/2 的能耗来自于制冷和供热[9]。长三角地区夏季制冷需求大,电力消耗强度高;冬季湿度大,体感温度低,每年有近 60d 的时间体感温度低于 13℃,供暖需求迫切,老百姓呼声强烈。高强度的供热需求愈加凸显了能源需求,产生了近些年冬季的“拉闸限电”等紧急情况,而过度依赖煤炭的能源结构又致使雾霾天气频发。

从前文可以看出,长三角地区地热能丰富,可利用潜力巨大。然而,当前长三角地区地热供暖制冷仅有 5700 万 m²,不足地热制冷潜力的 4%和地热供暖潜力的 3%。由于地热利用很少甚至不排放 CO₂,采用地热替代化石燃料折算 CO₂ 减排量的计算方法,若已有建筑物可以最大限度地保障采用地热供暖制冷,可在现有基础上减排 CO₂ 达 10%以上,若新增建筑均最大限度地采用地热供暖制冷,地热减排贡献可在 20%以上,在碳达峰与碳中和目标的实现过程中做出突出贡献。

4 结 论

基于长三角地区地热地质数据,计算得到该地区 3km 以浅地热能总量 782 亿 t 标准煤,其中年可采资源量约为 1.6 亿 t 标准煤,可实现建筑物冬季供暖面积 24.8 亿 m²,夏季制冷面积 14.5 亿 m²。

在其可采资源量中,浅层地热能资源占比显著,是该地区清洁供暖制冷的首选能源。鉴于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。如果能正确引导和

适当扶持,加大地热能的开发利用,必将推动该地区提前实现碳达峰和碳中和的目标。

参考文献略

转自《科技导报》2023

西藏羊八井地热田三维电性结构模型 ——来自大地电磁的证据

薛国强¹, 陈卫营², 赵平², 任旺奇¹, 吕鹏飞¹, 雷康信¹, 赵炆¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所;

2. 青藏高原研究所)

西藏羊八井地热田是世界上著名的高温地热田,历经四十多年的开发利用,浅部地热资源日趋萎缩,亟需开发深部高温地热资源来维持地热发电或新增装机容量。深刻了解深部热源位置和形态、断裂分布特征、地热流体的升流通道以及深层热储结构,对于开发深部高温地热资源具有十分重要的意义。以往地球物理工作探测深度一般不超过 1km,且多以二维处理解释为主,未能给出地热田精细的深部电性结构。地热田深部熔融体的位置和埋藏深度,以及地热流体升流通道等关键地质问题长期存有争议,现有地热田模型的部分关键地质要素缺少充足的地球物理证据。

为解决上述问题,中国科学院地质与地球物理研究所薛国强、陈卫营等人与青藏高原研究所赵平合作,在羊八井地热田实施了电性源短偏移距瞬变电磁法(SOTEM)和大地电磁法(MT)两种不同尺度的电磁法探测,获得了地热田 16km 深度范围内的精细电性结构。SOTEM 方法是近些年发展起来的一种大深度人工源电磁探测方法。由于采用接地线源发射信号,SOTEM 相较于回线源瞬变电磁法具有探测深度大、可观测场量多、复杂地形适用性好等优点;由于采用近源区观测信号,SOTEM 相较于传统的长偏移距瞬变电磁法(LOTEM)具有信号能量强、带宽大、探测精度高、施工成本低等优点;由于观测垂直感应电动势分量,SOTEM 相较于频率域可控源电磁法具有垂向分辨率高、无静态效应、施工高效等特点。MT 方法采集天然电磁场信号,探测深度可达 10km 以

上,可以对局部熔融体及深层地热流体的升流通道进行揭示,但该方法对浅层电性结构的分辨率不高,而且微弱的天然场信号易受到空间环境的电磁干扰。将这两种方法综合应用,可以兼顾地热勘查工作对探测精度和深度的要求。

本次工作在羊八井地热电站停产改造期间,利用项目团队自主研发的 SOTEM 探测系统获得了 6 条线剖面共 366 个测点的 SOTEM 数据;利用研究所底青云团队自主研发的地面电磁探测(SEP)系统,获得了 4 条剖面共 54 个测点的 MT 数据(图 1)。然后分别利用 SOTEMsoft 和 ModEM 软件对 SOTEM 数据和 MT 数据进行反演处理,得到了地热田不同深度范围内的三维电性结构(图 2 和图 3)。

羊八井地热田至今没有发现第四纪火山岩,热源性质、深部热储特征、地热流体升流通道等问题曾经争论了许多年。Hochstein 和 Yang(1995)提出了羊八井深循环地热水成因模式。但随着 ZK4002、ZK4001 井先后成功揭露出超过 250℃的地热流体,国内外同行对该地热田具有岩浆热源的属性已达成共识。氦同位素测定表明,地热气体中来自地幔的组分约为 3%。据此可以推断局部熔融体主要是地壳物质组分,通过深大断裂混入了少量的来自青藏高原地幔楔的流体组分,与同属亚东-古露裂谷的羊易、古露等高温地热田类似。国际合作项目(INDEPTH)研究发现,在羊八井等地 15~20km 深度存在着含水的花岗质岩浆层,而这次在地热田中部 6.2~14km 深度范围内

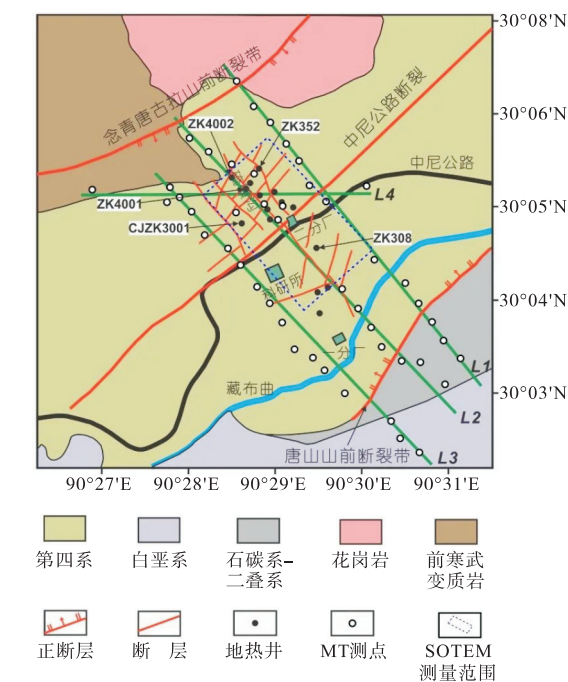


图1 SOTEM 和 MT 测点布设图

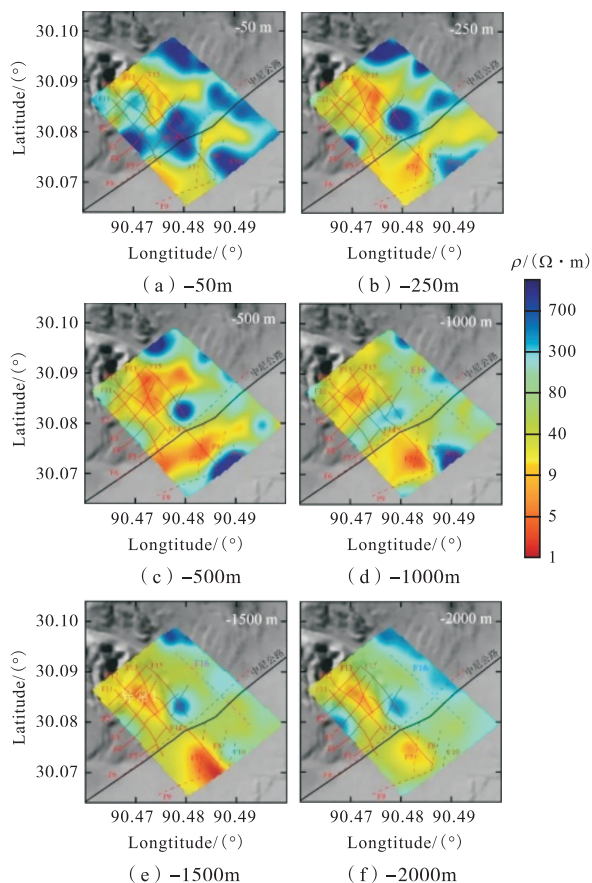
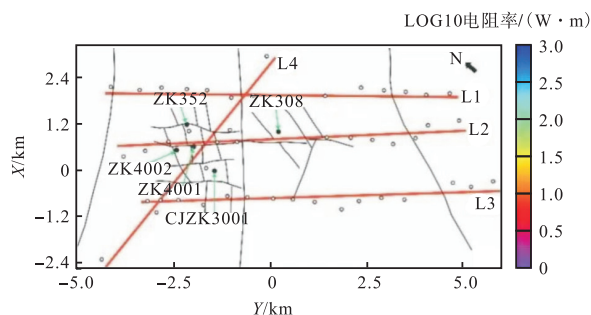
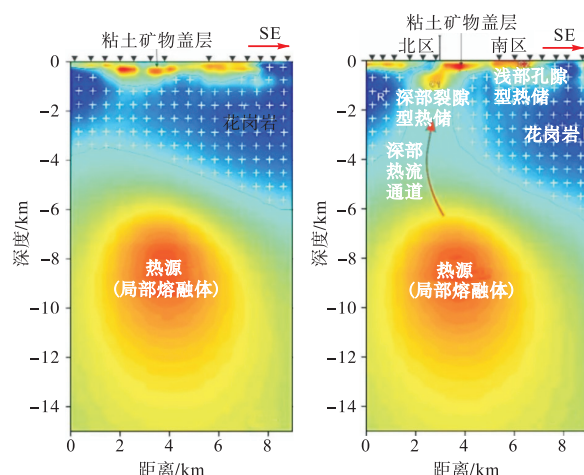


图2 不同深度电阻率等值线平面图及断裂分布 (SOTEM结果)

探测到的局部熔融体很可能是来自该岩浆层的上涌,局部熔融体的平均深度是 10.1km。

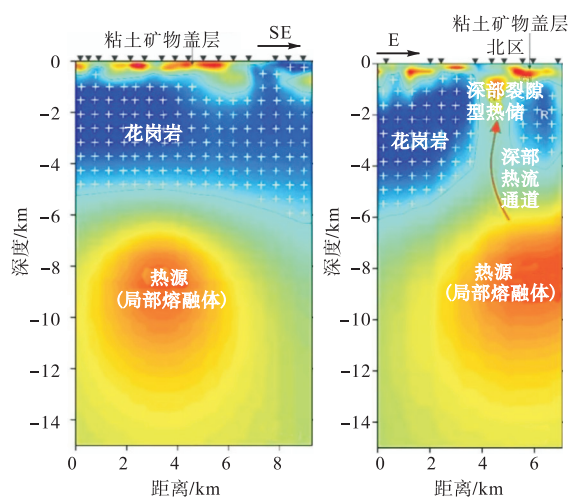


(a) MT 测线分布图,红线表示 MT 测线,黑线表示断层,黑圆圈和倒三角形表示测点,黑圆点表示地热井



(b) L1 线

(c) L2 线



(d) L3 线

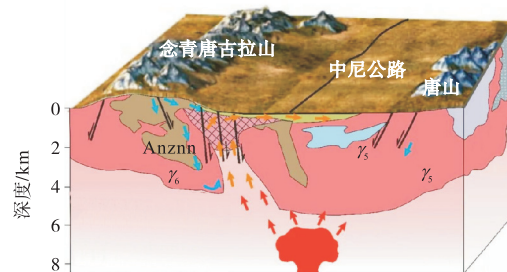
(e) L4 线

图3 沿 MT 测线的剖面图(红色箭头表示热流通道)

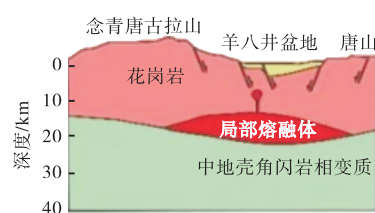
综合前人在地热地质、地球物理、地球化学和钻孔测温等资料,提出了羊八井地热田的地质成

因模型(图 4)。大气降水和冰雪融水沿念青唐古拉南缘山前断裂带向下渗透,随深度增加而逐步升温,沿途从围岩中吸取热量,并淋滤出矿物组分。经局部熔融体烘烤加热后,地热流体的密度逐渐下降。当地热流体循环到一定深度时,在冷、热水密度差和地势差的共同驱动下开始沿裂隙向上折返。在上升过程中,减压气化导致大量气体组分(主要是 CO_2 和 H_2S)和地热蒸气从地热流体逃逸,在升流通道顶部硫磺沟附近形成了大面积的酸性蚀变带,明矾石、高岭土、蛋白石和玉髓等是热储盖层的主要矿物成分,同时释放出高通量的 CO_2 。地热流体在升流过程中遇到盖层阻挡后,受深部压力和浅层冷水顺流流的共同驱动,开始向地热田的东南方向做水平流动,在北区浅层蚀变花岗岩和南区第四系砂砾岩层内形成浅层热储,地热流体埋藏深度逐渐减小,最终在南区形成大面积的溢流区。羊八井地热田深部三维电性结构揭示,南区既没有地热流体升流通道,也不存在深层热储。在北区喇叭状升流通道 2km 深度以下,尚未发现富水性良好的层状热储,这表明羊八井深部岩层的裂隙不够发育,渗透性较差,与北区深部热储勘探井的钻探资料比较吻合。前人的地热流体化学组分研究表明,浅层地热流体是深层地热流体与地下冷水相混合的产物,冷水混合比例为 30 ~ 35%。开发利用深层高温地热流体将加快浅层地热资源的萎缩。由于羊八井北区在 1km 深度的岩层温度已超过 200℃,菱块状断裂发育,因此在地热尾水回灌过程中,可以借鉴美国 Geysers 地热电站的成功经验,应用水力压裂等多种方法

(EGS)在深部高温岩体人工扩大热储的规模,通过增加地热水深循环范围和流量进一步扩大产能,实现地热能的高效开发利用。



(a) 羊八井地热田地质成因模型



(b) 念青唐古拉花岗岩侵位与伸展构造图

1—断层;2—温水运移方向;3—热水运移方向;4—岩浆热能传导方向;5—岩浆热源;6—裂隙型热储;7—富水区,推测其温度低于浅层热储;8—第四系孔隙型热储;9—花岗岩;10—前寒武纪变质岩;11—白垩系;12—新生代火山岩

图 4 羊八井地热田地质成因模型及念青唐古拉花岗岩侵位与伸展构造图

注:研究成果发表于《中国科学:地球科学》和《地球物理学报》。研究受第二次青藏高原综合科学考察研究项目(2019QZKK0804)和国家自然科学基金项目(U21A2015,42274192,42010306)共同资助。

转自中国科学:
地球科学, 2023. 53(8): 1859-1871