

doi: 10.12097/gbc.2023.03.041

海南岛隆起山地型地热资源地质条件及潜力

雷栋¹, 潘良云^{2,3*}, 陈强¹, 孙福利², 王丽莎², 周博², 姚艳华², 陈元春²,
曹海丽², 尹超²

LEI Dong¹, PAN Liangyun^{2,3*}, CHEN Qiang¹, SUN Fuli², WANG Lisha², ZHOU Bo²,
YAO Yanhua², CHEN Yuanchun², CAO Haili², YIN Chao²

1. 中国石油南方石油勘探开发有限责任公司, 海南 海口 570216;

2. 北京宝石花能源科技有限公司, 北京 100088;

3. 中国石油集团东方地球物理公司研究院, 河北 涿州 072751

1. Southern Petroleum Exploration and Development Co., Ltd., NPC, Haikou 570216, Hainan, China;

2. Beijing GEM Flower Energy Science & Technology Co., Ltd., Beijing 100088, China;

3. Research Institute of BGP, NPC, Zhuozhou 072751, Hebei, China

摘要:【研究目的】海南岛隆起山地型地热资源十分丰富,发现了46个地热田、温泉。研究其分布的地质背景、地热地质特征和地质成因及资源潜力,对地热资源赋存规律认识和勘探、开发利用具有重要意义。【研究方法】综合区域地质调查、地球物理、水文地质、地热田(温泉)勘查等资料,开展海南岛隆起山地型地热资源地质综合研究,系统分析地热地质要素,明确地热地质特征和成因地质模式及资源潜力,指出地热资源勘探开发有利区。【研究结果】海南岛中南部隆起山地型地热田(温泉)主要赋存于东西向和北东向深大断裂附近或断裂交会部位,处于大地热流值高值区和恒温层高异常区,受断裂破碎的中生代花岗岩是最主要的热储;地热田(温泉)地下水补给均为大气降水,沿控热断裂与深部大地热流对流,在深循环过程中吸热逐渐形成地热流体,于断裂破碎带热储中富集为热矿水体,在盖层薄弱处排泄出地表则形成热水泉;海南岛隆起山地型地热资源总的可采热量约 $8.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,可采资源量 $26.17 \times 10^8 \text{ kcal/d}$,折合126.81 MW,相当于标煤373.83 t/d,按地热资源温度和规模分类,分别划分为中温、低温2类和中、小型2类地热资源。【结论】海南岛东南部和西北部深大断裂附近或交会部位、大地热流高值区、中生代花岗岩侵入体出露(或隐伏)区、具有高的地面水温的地区是隆起山地型地热资源勘探开发的有利区。

关键词: 隆起山地型地热资源;地热地质特征;深大断裂;断裂破碎带热储;资源潜力;海南岛

创新点: 首次系统开展了海南岛王五-文教断裂以南隆起山地型地热资源形成的区域地质构造背景、地热地质特征研究及地热资源综合评价,基本明确了海南岛东南部地热资源分布规律、成因机制及地热资源潜力,指明了地热资源勘探开发有利区,提出了开发利用建议。

中图分类号: P314; TK521 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)01-0077-14

Lei D, Pan L Y, Chen Q, Sun F L, Wang L S, Zhou B, Yao Y H, Chen Y C, Cao H L, Yin C. Geological characteristics and potential of geothermal resources in the uplift mountain-type of Hainan Island. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(1): 77-90

Abstract: [Objective] Hainan Island is very rich in geothermal resources of the uplifted mountain-type, with 46 geothermal fields and hot springs discovered. Studying the geological background, geothermal geological characteristics, genesis, and resource potential is of great significance for understanding the occurrence regularity, exploration, and development of geothermal resources. [Methods] Based on comprehensive regional geological surveys, geophysics, hydrogeological, regional geological surveys and geothermal fields (hot

收稿日期: 2023-03-28; 修订日期: 2023-06-28

资助项目: 中国石油天然气股份有限公司项目《东部油区地热成因机制与开发潜力研究》(编号: 2021DJ5501)

作者简介: 雷栋(1977-), 男, 高级工程师, 从事油气勘探和地热地质综合研究。E-mail: leid01@cnpc.com.cn

* 通信作者: 潘良云(1963-), 男, 博士, 高级工程师, 从事含油气盆地和地热地质综合研究。E-mail: 15830917288@139.com

springs) survey data, to carry out a comprehensive study on geothermal geology of the uplifted mountain-type geothermal resources in Hainan Island. a systematic analysis of geothermal geological elements, basically clear the geothermal geological characteristics, genetic model, and the potential of the resources, pointed out a favorable area for geothermal resource exploration and development. **[Results]** Geothermal fields (hot springs) in the south-central uplifted mountainous-type of Hainan Island are mainly located in the east-west and north-east near the deep-seated faults or the intersection of fractures, in the high value of the heat flow and high anomalies of constant temperature layer, broken by the fracture of the Mesozoic granite is the most important heat storage. Geothermal fields (hot springs) groundwater recharge are atmospheric precipitation, along the heat-controlled fractures and deep earth heat flow convection, heat absorption in the deep cycle process gradually formed geothermal fluid, in the fracture zone thermal storage for the enrichment of thermal mineral water body, in the cover of the weak drainage out of the surface is the formation of hot water springs. Hainan Island uplifted mountain-type geothermal resources, the total amount of recoverable thermal water of about $8.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, the recoverable resources $26.17 \times 10^8 \text{ kcal/d}$, equivalent to 126.81 MW, equivalent to the standard coal of 373.83 t/d, according to the temperature of the geothermal resources and the scale of classification, respectively, are divided into medium-temperature, low-temperature and medium-scale, small-scale geothermal resources. **[Conclusions]** The areas near or at the intersection of deep-seated faults in the southeast and northwest of Hainan Island, the high value area of geothermal heat flow, the exposed (or hidden) area of Mesozoic granite intrusion, and the areas with high surface water temperature are favorable areas for exploration and development of uplifted mountain-type geothermal resources.

Key words: uplifted mountain-type geothermal resources; geothermal geological characteristics; deep-seated fault; fracture zone heat storage; resource potential; Hainan Island

Highlights: The first systematically investigated the regional geological structure background, geothermal geological characteristics, and comprehensive evaluation of the formation of the uplifted mountain-type geothermal resources of the southern of the Wangwu-Wenjiao Fault on Hainan Island. Basically clarified the distribution, mechanism, and potential of geothermal resources in the southeastern of Hainan Island, identified favorable areas for exploration and development, and provided recommendations for the resources development and utilization.

海南岛地热资源非常丰富,按其成因可分为水热型和干热岩型两大类,水热型地热资源又可分为沉积盆地型地热资源和隆起山地型地热资源,隆起山地型地热资源也称构造裂隙型。海南岛隆起山地型地热资源主要分布在中南部丘陵和山地,受导热、导水断裂控制,能量传递方式以热对流为主,热储为呈带状分布的断裂破碎的构造岩。目前,在海南岛中南部已发现隆起山地型地热田 16 个、温泉 30 处(陈颖民, 2008; 高芳蕾等, 2009; 赵童, 2016; 张颖, 2019), 其中, 地热田是经过勘查或勘探后证实具有一定规模的地热资源, 温泉指出露地表的单个或多个热矿泉, 一般勘查程度低, 地热资源规模不明确。海南岛隆起山地型地热资源总体开发利用程度较低, 仅有 10 处地热田和温泉得到开发利用, 且利用领域单一, 主要用于洗浴、旅游酒店, 在工业、农业等领域的开发利用基本处于空白。

海南岛隆起山地型地热资源勘查、研究程度差异较大, 但总体程度较低。较详细的地热资源调查是 1962 年由广东省地质局水文工程地质队开展的 1:20 万、1:50 万海南岛水文地质概查, 对发现的

温泉点进行了调查, 并提交海南岛热矿泉调查表。1981 年由海南地质大队完成的 1:20 万海南岛区域水文地质普查, 对全岛的地热资源情况进行了初步总结。海南建省后, 先后对万宁兴隆、三亚南田、琼海官塘、儋州蓝洋、澄迈西达、保亭七仙岭等 9 处地热田和 13 处温泉点进行了勘查评价工作。前人对海南岛隆起山地型地热资源的研究, 主要是依据地热田(温泉)勘查评价报告对单个地热田(温泉)的地热地质、水化学特征和地热成因、资源利用和地热勘查方法开展研究(杨兴沐, 2004; 陈颖民, 2008; 高芳蕾等, 2009; 吴小洁, 2015; 赵童, 2016; 徐单, 2017; 杨峰等, 2018; 张颖, 2019)。但对海南岛隆起山地型地热资源形成的地质背景、地热地质特征、资源赋存规律、成因机制等综合研究和评价相对薄弱, 在一定程度上制约了海南岛中南部隆起山地型地热资源的潜力认识和开发利用。

本次研究结合区域地质调查、地球物理、水文地质、区域地质调查及地热田(温泉)勘查、调研等资料, 开展海南岛隆起山地型地热资源地质综合研究, 通过对典型地热田地热地质要素解剖, 基本明确了

海南岛隆起山地型地热资源地质特征和成因地质模型及赋存规律;利用海南岛水文地质勘查钻孔水温资料和地热田、温泉点水温资料,编制了海南岛恒温层水温等值线图,以分析海南岛隆起山地型地热资源分布与恒温层温度的关系;应用前人编制的海南岛居里等温面深度等值线图计算出地温梯度,利用大地热流值定义得到大地热流值,最后用北部福山凹陷油气勘探资料和收集的海南岛46个地热田数据、温泉水温数据、可采储量数据,应用水文地质法估算了地热资源量,评价了海南岛隆起山地型地热资源潜力;依据温度、可采资源规模,分别对海南岛隆起山地型地热田和温泉进行了分类;综合海南岛隆起山地型地热地质特征、赋存规律及资源潜力评价,指出海南岛东南部和西北部是隆起山地型地热资源有利区。

1 地热地质背景特征

海南岛具有优越的隆起山地型地热资源地质背景,是中国隆起山地型地热资源较丰富的地区。燕山期,海南岛地壳区域性的伸展减薄,地幔物质上涌,深部热载体(岩浆、热液)沿深大断裂带喷溢地表或停留于地壳浅部,从而形成区域性的高热流值(海南省地质调查院,2017)。新生代,海南岛在南北向拉张应力作用下发生持续扩张,形成一系列深大断裂,这些断裂控制了海南岛构造格局、地层、侵入岩、火山岩、地热、地震等分布(海南省地质调查院,2017)。海南岛地热田和温泉均分布于深大断裂附近或断裂交会部位。

海南岛所处的大地构造位置独特,自20世纪50年代以来,不同学者从不同的大地构造观点、不同的研究目的对海南岛的大地构造单元提出了不同的划分方案(夏邦栋,1991;晁会霞等,2016),尽管认识众说纷纭,但都认为东西向九所-陵水构造带南北两侧古生代在沉积、变质、变形、古生物面貌等方面具有明显的差异性,东西向王五-文教断裂带南北两侧新生代火山作用和沉积作用的差异性,都将这2条东西向断裂带作为一、二级构造单元的边界。参考《中国区域地质表·海南志》(海南省地质调查院,2017)的大地构造划分方案,以东西向九所-陵水断裂带为界,划分出北面的华南褶皱系和南面的南海地台2个一级构造单元,华南褶皱系以王五-文教断裂带为界划分为五指山褶皱带、雷琼断陷2个二级构

造单元,五指山褶皱带以北东向的定安-乐东断裂带为界划分为抱板隆起区、五指山隆起区和5个中、新生代断陷成因的凹陷共7个三级构造单元,南海地台只划分为三亚台褶皱带1个二级构造单元(图1)。海南岛五指山褶皱带的抱板隆起区、五指山隆起区和三亚台缘拗陷3个构造单元,多为中生代侵入岩和古生界变质岩裸露区,岩石具有高的热导率,且深大断裂发育,是大地热流高值异常区。已知的隆起山地型地热田、温泉均分布于这3个构造单元(图1)。

《中国区域地质志·海南志》(海南省地质调查院,2017)利用重、磁异常资料,结合地质调查和火山岩、温泉分布推断的区域断裂有43条,其中东西向5条、南北向4条、北东向18条、北西向16条;按规模和切割深度划分,切割深度达地幔顶部的壳断裂6条、规模较大的切割基底断裂28条、规模较小的一般断裂9条(图1)。海南岛6条壳断裂控制了隆起山地型地热田或温泉的分布,已知的地热田和温泉均分布于东西向王五-文教断裂以南地区,形成3个东西向和2个北东向地热田和温泉带,即沿东西向尖峰-吊罗断裂带、昌江-琼海断裂带、九所-陵水断裂带分布的地热田和温泉带,沿北东向琼海-三亚断裂带和定安-乐东断裂带分布的地热田和温泉带。

海南岛隆起山地型地热田、温泉与中生代花岗岩有密切关系,全岛目前发现的46处隆起山地型地热田、温泉点中有41处直接出露于中生代花岗岩侵入体中,仅二甲温泉出露于中元古代侵入岩中,而新生代火山岩中未发现地热田和温泉出露。其中分布于二叠纪侵入岩中的地热田(温泉)点有11个,分布于三叠纪侵入岩中的地热田(温泉)点有16个,分布于白垩纪侵入岩中的地热田(温泉)点有14个。沉积岩层中温泉和地热田不太发育,仅有九曲江、沙田、蓝洋、桂根4个温泉或地热田分布于石炭系或志留系浅变质砂岩与板岩中。

2 地热地质特征

本次利用海南岛地球物理、水文地质、区域地质调查、地热田勘察等资料,对海南岛隆起山地型地热田(温泉)地热地质要素进行了系统分析,初步总结了海南岛隆起山地型地热资源的大地热流背景、地温场、储层、导热和导水断层、地热水温、水量、水化学等地热地质特征,并探讨了海南岛隆起山地型

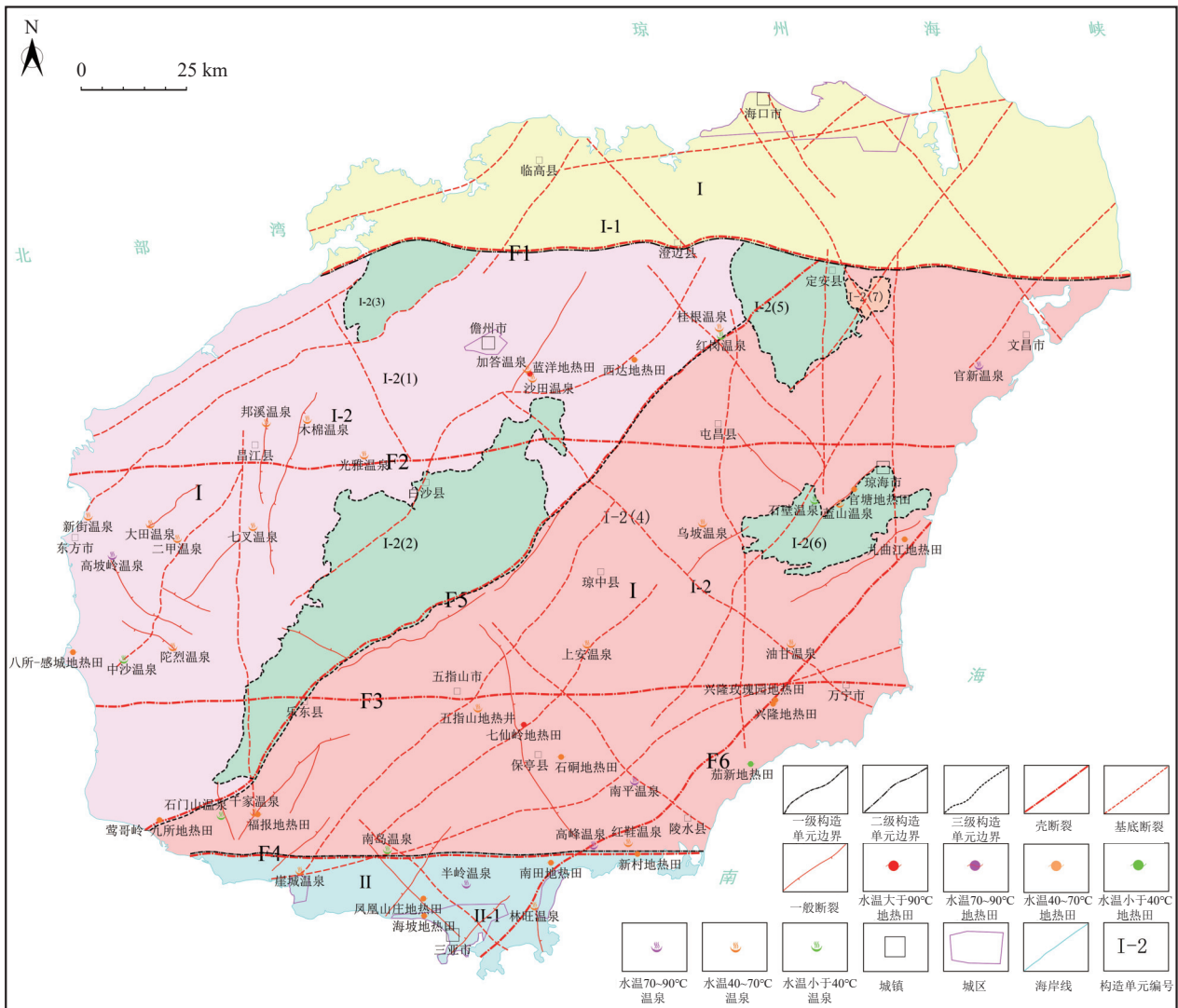


图1 海南岛断裂系统、区域构造单元划分与地热田(温泉)分布图

(图中断裂分布据海南省地质调查院, 2017 修改)

Fig. 1 Distribution map of fault system, regional tectonic units and geothermal fields (hot springs) in Hainan Island

I—华南褶皱系; II—南海地台; I-1—雷琼断陷; I-2—五指山褶皱带; II-1—三亚台缘拗陷带; I-2(1)—抱板隆起区; I-2(2)—白沙拗陷; I-2(3)—王五凹陷; I-2(4)—五指山隆起区; I-2(5)—雷鸣凹陷; I-2(6)—阳江凹陷; I-2(7)—长昌拗陷; F1—王五-文教断裂; F2—昌江-琼海断裂; F3—尖峰-吊罗断裂; F4—九所-陵水断裂带; F5—定安-乐东断裂; F6—琼海-三亚断裂

地热资源的成因地质模式。

2.1 恒温层温度分布特征

本次收集了海南岛水文地质勘查 323 口钻孔和已知的 46 个地热田、温泉点钻孔水温资料(赵童, 2016; 张颖, 2019), 编制完成海南岛近地表(相当于恒温层)水温等值线图(图 2)。

海南岛东南部和西北部恒温层温度较高, 一般大于 27℃, 中部及北部恒温层温度较低, 一般为 25~26.5℃。46 个地热田、温泉点均位于恒温层温度高异常区。

2.2 居里等温面与大地热流背景

高维等(2020)利用海南岛高精度航磁数据, 通过频率域功率谱法反演出居里等温面的深度, 海南岛居里等温面的上隆与拗陷大部分呈带状分布, 居里等温面存在两隆两拗, 即琼中-琼东南隆起区、琼西北隆起区和琼东北拗陷区、乐东-白沙拗陷区。琼中-琼东南隆起区呈北东向分布于琼海、陵水、万宁、保亭、三亚一带, 是海南岛居里面埋深最浅的地区, 其居里等温面深度为 16~24 km, 极值点位于陵水北东, 深度仅为 16 km; 琼西北隆起区呈北东向分

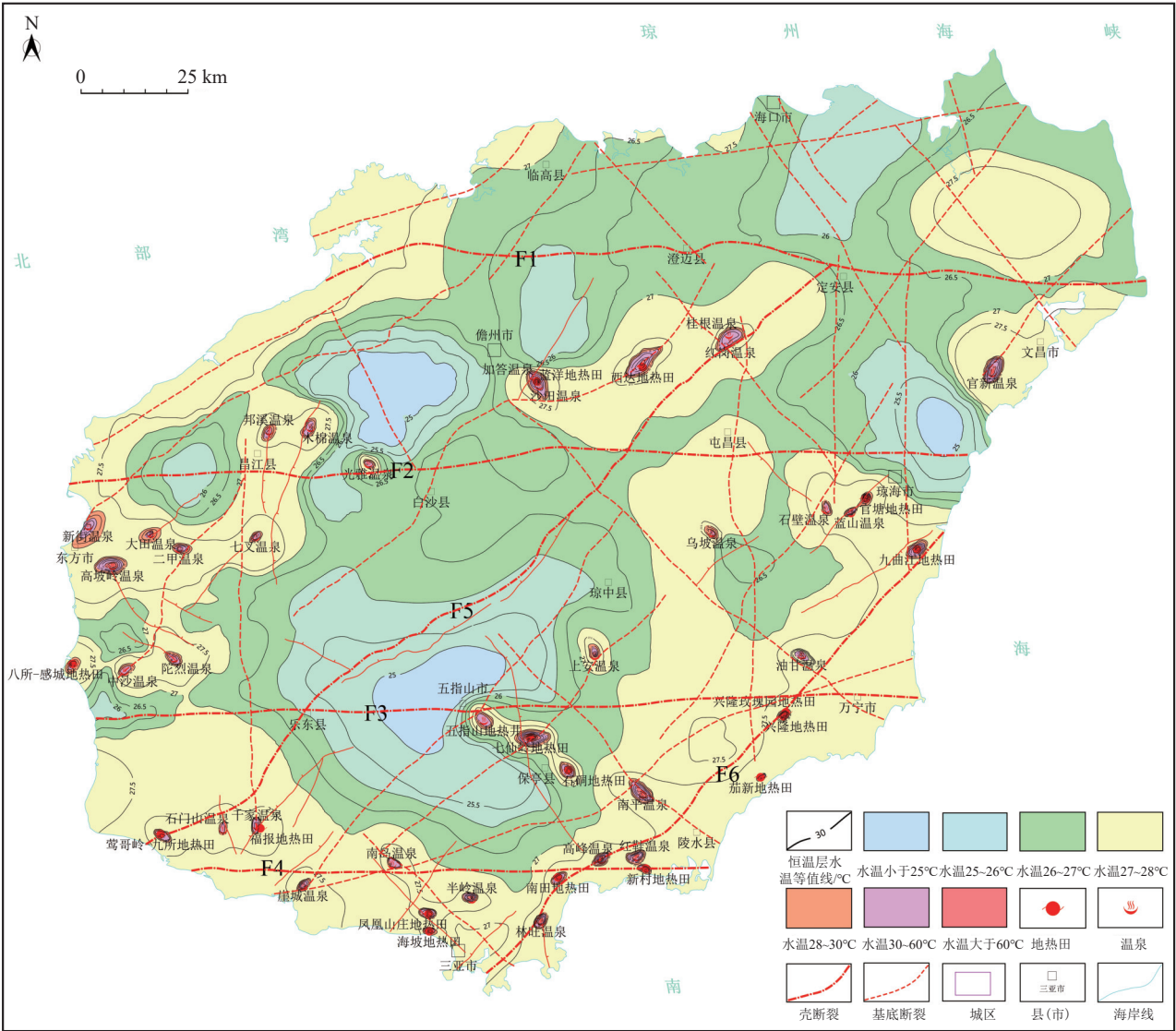


图 2 海南岛恒温层水温等值线图

Fig. 2 Contour map of constant temperature in Hainan Island

布于儋州市西、昌江西，至东方市沿海一带，居里等温面深度变化于 17~25 km 之间；乐东-白沙拗陷区呈东北向分布在海南岛西南部的乐东、中部白沙、儋州市东南、屯昌北一带，居里等温面深度总体变化于 26~32 km 之间，显示块状沉降区特征，琼东北拗陷区南部边界大致为王五-文教深大断裂带，北至海南岛东北部海岸，对应琼北的新生代断陷区，呈近块状或带状分布，其居里等温面深度为 26~35 km，澄迈—临高一带是海南岛居里等温面埋深最大的地区，最大埋深达 35 km，在龙州市一带，拗陷带内分布一个北西向次级隆起，居里等温面深度为 26 km 左右。

大地热流比其他地热单项参数 (温度、地温梯度) 更能准确地反映一个地区地热场的基本特点，具有十分重要的理论价值和现实作用。本次研究按照大地热流的定义，利用公式(1)计算出海南岛各点的大地热流值。

$$q = 100 K r \cdot K$$

(1)

式中： q 为大地热流 (mW/m^2)； Kr 为岩石导热率 ($\text{cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C}$)，其值用全岛分布最广的花岗岩平均热导率 $3.1 \text{ W}/(\text{m} \cdot ^\circ\text{K})$ (胡圣标等, 2001)， $1 \text{ cal}/\text{cm} \cdot \text{s} \cdot ^\circ\text{C} = 418.68 \text{ W}/\text{m} \cdot ^\circ\text{K}$ ； K 为地温梯度 ($^\circ\text{C}/100\text{m}$)。

地温梯度计算公式如下:

$$K = (T - t) / H \times 100 \quad (2)$$

式中: K 为平均地温梯度 ($^{\circ}\text{C}/100\text{m}$); T 为居里面温度 (550°C); t 为恒温层温度 ($^{\circ}\text{C}$), 由海南岛水文地质勘查 323 口钻孔水温资料和已知的 46 个地热田 (温泉) 点钻孔水温资料编制 (图 2); H 为居里等温面深度 (m), 按高维等 (2020) 反演的居里等温面深度取值。

北部福山凹陷的大地热流值根据油气钻井实测 6 口井的地温梯度与 25 口井 75 个岩石样品的实测热导率, 计算得到 128 个热流值点, 最后根据前人在海南岛实测的大地热流值 (胡圣标等, 2001; 姜光政等, 2016) 对计算出的大地热流值进行校正。首次编

制完成了海南岛大地热流值等值线图 (图 3)。

海南岛内大地热流值变化于 $60 \sim 92 \text{ mW}/\text{m}^2$ 之间, 平均值为 $76 \text{ mW}/\text{m}^2$, 与全球典型克拉通型大陆区和大洋区的大地热流值相比 (高维等, 2020; 蔺文静等, 2016), 海南岛总体上具有中等—较高的区域大地热流值。海南岛的大地热流值分布与居里等温面起伏具有较好的相关性, 呈北东向或北西向展布 (图 3)。较高的热流值分布于琼中-琼东南和琼西北 2 个居里等温面隆起区, 琼中-琼东南热流高值区呈北东向展布, 位于琼海—万宁—陵水—保亭—三亚一带, 大地热流值大于 $80 \text{ mW}/\text{m}^2$, 最大值在兴隆南, 达 $92 \text{ mW}/\text{m}^2$, 处于东西向尖峰-吊罗断裂与北东向琼海-三亚断裂交会部位; 琼西北热流高值区亦呈北东

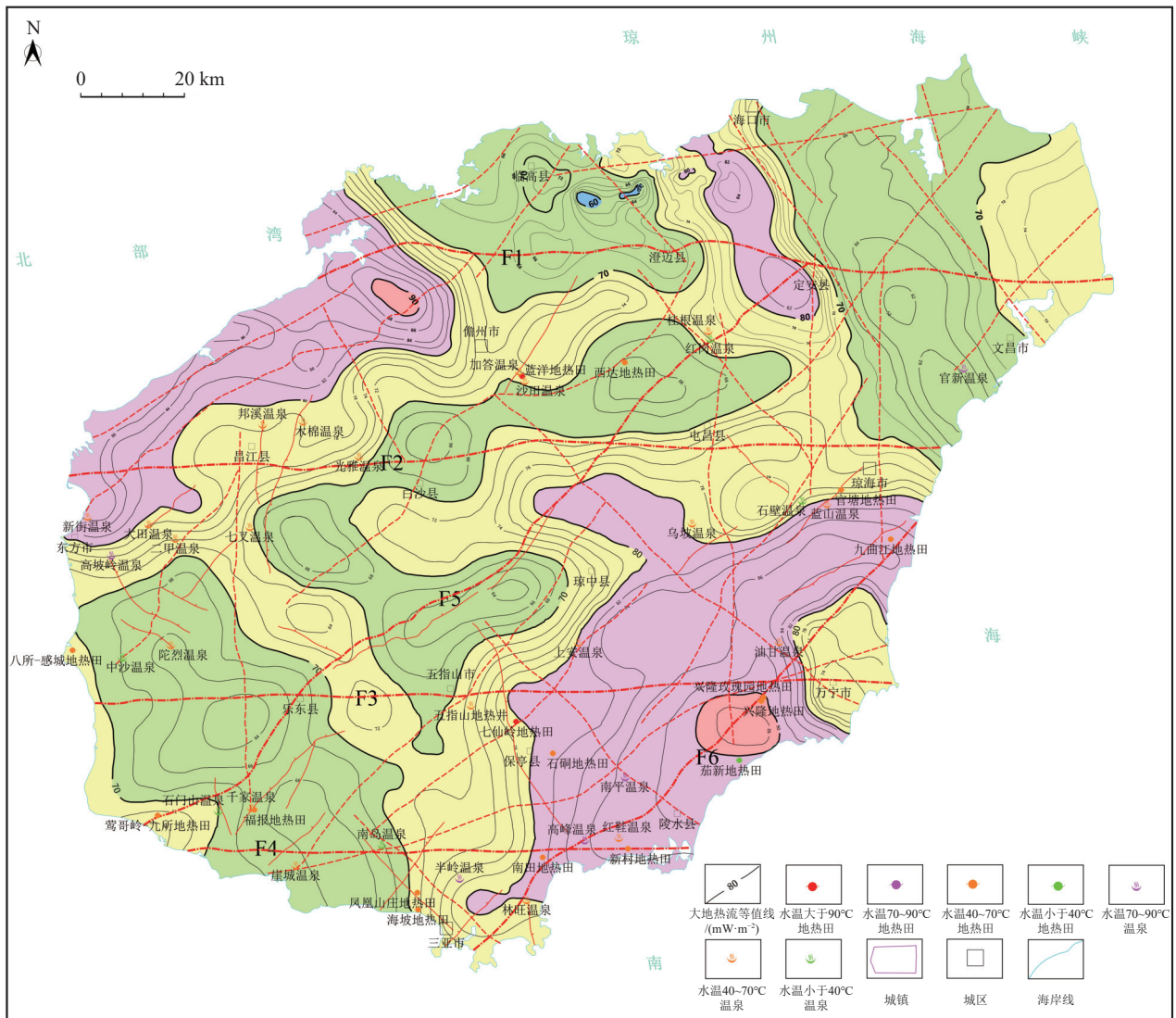


图 3 海南岛大地热流等值线图

Fig. 3 Contour map of heat flow in Hainan Island

向分布于儋州市西—东方市一带,大地热流值也大于 80 mW/m^2 ,最大值在儋州市西,达 90 mW/m^2 ,处于东西向王五-文教断裂与北东向博厚-三更断裂交会部位;而居里等温面拗陷区,大地热流值相对较低,如琼北居里等温面拗陷区具有较低的大地热流值,介于 $60 \sim 70 \text{ mW/m}^2$ 之间,最低值区位于福山凹陷中部,与居里等温面埋深等值线一样,在龙州市一带分布 1 个北西向高值区,大地热流值为 $80 \sim 84 \text{ mW/m}^2$,其对应北西向的石山-定安断裂,处于福山凹陷与云龙凸起之间;乐东-白沙居里等温面拗陷区,大地热流值为 $70 \sim 80 \text{ mW/m}^2$,变化相对较平缓。

从海南岛大地热流等直线图(图 3)可以看出,海南岛已知的 46 个地热田、温泉点主要分布于东南部和西北部 2 个大地热流值高值区,说明海南岛隆起山地型地热资源具有高的大地热流背景。

2.3 热储层和热盖层

海南岛隆起山地型地热田、温泉热储层均为断裂破碎的构造岩,控制热储分布的断裂均为张性断层,也是地热田和温泉的导热、导水断层,热储分布于断层破碎带中。热储原岩主要为中生代花岗岩,岩性主要为正长花岗岩、二长花岗岩、花岗闪长岩,只有少数为浅变质沉积岩,岩性为下石炭统南好组石英砂岩、砂岩与板岩和志留系千枚岩、板岩及变质砂岩为原岩的断裂破碎带。

热储层均呈带状构造,为视电阻率低异常带,视电阻率一般小于 $200 \Omega \cdot \text{m}$,岩石破裂,节理裂隙发育,多具碎裂、碎斑、糜棱、片麻状等结构。热储物性具有强的非均质性,断层上盘物性优于下盘,断层中部优于两侧、浅部优于深部。热储分布范围取决于导热、导水断裂规模,统计官塘、九曲江、蓝洋、七仙岭、南田 5 个典型地热田热储延伸长度为 $1.3 \sim 3.7 \text{ km}$,宽 $0.4 \sim 1.6 \text{ km}$,面积 $0.5 \sim 2.5 \text{ km}^2$,分布于 2 条断层交会处的热储长宽比较小,单条地层控制的热储长宽比较大,热储埋深不超过 500 m 。

海南岛隆起山地型地热田热盖层主要为第四系松散沉积层和地表致密花岗岩体。第四系松散沉积层主要为河流冲洪积中粗砂、含砾亚粘土、粘土,其他地区为下伏基岩的坡残积亚粘土或含砾亚粘土,厚 $0 \sim 50 \text{ m}$,除个别砂层外,一般隔水隔热性能较好;地表致密花岗岩体盖层岩性主要为块状花岗岩,岩石裂隙不发育或是闭合性的,或被矿物充填,岩体较完整,具有较好的隔水隔热作用。在热盖层不发育

或薄弱处以热水泉排泄,形成温泉。

2.4 导热、导水及控储断层

北东向和近东西向基底断裂是形成海南岛隆起山地型地热田和温泉的导热或导水断裂,如官塘地热田的控热断裂为北东向官塘-蓝山断裂,总体走向北东 60° ,沿万泉河分布,延伸出地热田区外,区内出露长度约为 8 km ,该断裂是文昌-琼海深大断裂的组成部分,位于其中部;七仙岭地热田导热和导水断层为近东西向,位于东西向尖峰-吊罗断裂南侧,是其旁侧次级断层,出露长度仅 2 km 左右,地热田温度等值线呈近东西向沿该断层分布,向周边水温降低,说明该断层为七仙岭地热田的导热和导水断层。

海南岛山地隆起型地热资源的导热、导水断裂旁侧的一般断层或更次级断层往往控制地热田(温泉)的热储层分布,从而控制其分布范围和规模,这些断层多为正断层,热储层是受张扭应力作用的断裂破碎带中的构造岩,并且多发育于正断层的上盘。如官塘、蓝洋和南田地热田热储均为北西向张性正断层的上盘破碎带,九曲江地热田热储为北东向张性正断层的上盘破碎带。

2.5 地热水温

海南岛隆起山地型地热田、温泉水温差异较大,地面泉口或井口温度变化范围为 $35 \sim 95^\circ\text{C}$ (赵童, 2016; 张颖, 2019),参考地热资源地质勘查规范(GB/T11615—2010)分类标准,结合海南岛地热资源利用及气候,提出海南岛地热资源温度分类标准(表 1)。按照《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2011)分类标准,热水水温为 $60^\circ\text{C} \leq t < 90^\circ\text{C}$,考虑海南地区热水水温 70°C 以上才可用于制冷,将热水下限提高至 70°C ;海南岛恒温层温度平均在 27°C 左右,故将水温大于 27°C 作为地热资源。

按表 1 的地热资源温度分类,海南岛中南部构造裂隙型地热水资源中,中温地热田有七仙岭和蓝洋 2 个,水温分别为 95°C 和 93°C ;低温 44 个,其中低温热水 5 个、低温温热水 33 个、低温温水 6 个(表 2)。

海南岛已知的 46 个地热田、温泉热水水温与控制地热田、温泉的断裂关系密切。一般温度大于 70°C 的地热田、温泉均分布于海南岛东南部和西北部 2 个大地热流值高值区;且多分布于 6 条壳断裂附近。如七仙岭地热田位于东西向尖峰-吊罗断裂带

表 1 海南岛地热资源按温度分类标准

Table 1 Classification standard of geothermal resources by temperature in Hainan Island

温度分级	温度(<i>t</i>)区间/℃		主要用途
	GB/T11615-2010	海南岛	
高温地热资源	$t \geq 150$	$t \geq 150$	发电、烘干、采暖
中温地热资源	$90 \leq t < 150$	$90 \leq t < 150$	烘干、发电、采暖、制冷
低温地热资源	热水	$60 \leq t < 90$	采暖、制冷、理疗、洗浴、温室
	温热水	$40 \leq t < 60$	理疗、洗浴、采暖、温室、养殖
	温水	$25 \leq t < 40$	洗浴、温室、养殖、农灌

表 2 海南岛地热田、温泉水温统计及分类

Table 2 Statistic of water temperature and classification table of geothermal fields and hot springs in Hainan Island

序号	地热田、温泉名称	水温/℃	温度分类	序号	地热田、温泉名称	水温/℃	温度分类
1	七仙岭地热田	95	中温	24	上安温泉	51	低温温热水
2	蓝洋地热田	93		25	二甲温泉	51	
3	高坡岭温泉	78		26	兴隆玫瑰园地热田	50	
4	南平温泉	77		27	千家温泉	48	
5	官新温泉	75		28	木棉温泉	48	
6	半岭温泉	77		29	陀烈温泉	47	
7	高峰温泉	72		30	七叉温泉	47	
8	红鞋温泉	68	低温温热水	31	福报地热田	47	
9	官塘地热田	68		32	乌坡温泉	46	
10	林旺温泉	67		33	海坡地热田	44	
11	兴隆地热田	66		34	新村地热田	42	
12	九曲江地热田	64		35	桂根温泉	42	
13	南田地热田	60		36	五指山市温泉	40.1	
14	崖城温泉	59		37	莺歌岭-九所地热田	40	
15	油甘温泉	58		38	光雅温泉	40	
16	蓝山温泉	58		39	邦溪温泉	40	
17	沙田温泉	57		40	八所-感城地热田	40	
18	西达地热田	55		41	中沙温泉	38	低温温水
19	石硐地热田	54		42	红岗温泉	37	
20	加答温泉	54		43	茄新地热田	36.1	
21	凤凰山庄地热田	53		44	石门山温泉	36	
22	大田温泉	52		45	石壁温泉	36	
23	新街温泉	51		46	南岛温泉	34.8	

上,官塘、南田等水温较高的地热田位于北东向琼海-三亚断裂上(图 1);单个地热田热水温度由地热田中部向边界逐渐降低,导热断层与导水断层交会部位是水温最高的部位,导水断层上盘水温往往高于下盘。如官塘地热田在北东向导热断层与北西向

导热断层交会处的泉口水温最高为 84℃,向周边水温降低,地热田边界过渡为正常水温,水温大于 70℃的地热井均位于北西向导水断层上盘。

2.6 水化学特征及类型

统计海南岛 5 个典型地热田水质分析资料(赵

童, 2016; 张颖, 2019), 海南岛隆起山地型地热水化学具有以下特征(表 3)。

(1) 阳离子以 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 为主, Na^+ 含量 25.1~1590 mg/L, Ca^{2+} 含量 2.4~664 mg/L, K^+ 含量 2.8~58.7 mg/L。九曲江和南田地热田 Na^+ 、 Ca^{2+} 含量高, 是其他 3 个地热田的几十倍。

(2) 阴离子以 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 为主, Cl^- 含量 12~3410 mg/L, SO_4^{2-} 含量 25.9~292 mg/L, HCO_3^- 含量 48.8~164 mg/L。九曲江和南田地热田 Cl^- 含量高出其他 3 个地热田几十倍。

(3) 水化学类型较复杂, 变化较大, 主要有 HCO_3^- -Na、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4$ -Na、 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ -Na、 Cl -Na·Ca、 HCO_3^- -Na·Ca 等类型, 靠近海边多为 Cl -Na·Ca 型, 七仙岭地热田属 HCO_3^- -Na 型, 蓝洋地热田属 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{SO}_4$ -Na 型, 官塘地热田属 $\text{HCO}_3^- \cdot \text{Cl}$ -Na 型, 九曲江和南田地热田属 Cl -Na·Ca 型(图 4; 表 3)。

(4) 热水中 F^- 含量较高, 含量为 2.4~24 mg/L, 达到氟水水质标准, 具有医疗价值。

(5) 矿化度除九曲江和南田地热田较高外, 其他均较低。九曲江地热田矿化度达 6.2 g/L, 南田地热田为 1.73 g/L, 是由于热矿水在径流过程中混入海水的原因。

(6) pH 值介于 7~9 之间, 为碱性热矿水。

(7) 九曲江和南田地热田 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Cl^- 含量高异常及高矿化度的原因是其位于海边, 地热水补给除大气降水外, 还有海水补给, 或热矿水在径流过程中混入海水。

(8) 七仙岭、蓝洋、官塘 3 个远离海边的地热田的 Na^+ 、 Cl^- 比值为 1.61~5.60, 大于海水平均值 (0.85), 说明地热水为大气成因的渗透水。而九曲江、南田地热田的 Na^+ 、 Cl^- 比值分别为 0.45 和 0.53, 小于海水平均值, 也说明地热水有海水的补给(张玉

良等, 2019)。

2.7 地热成因模式

高芳蕾等(2009)、赵童(2016)、张颖(2019)利用海南岛地热田和温泉热水同位素 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 数据进行分析, δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 均为负值, 数据点落在大气降水线上, 结果表明, 地热田和温泉热水的补给主要为大气降水。热水地球化学分析和水化学类型结果表明, 临海的地热田和温泉有海水的补给(表 3); 根据海南岛典型地热田放射性同位素分析, 热水放射性元素含量低(表 4), 由其所导致的热流增量小, 因此区内地热田和温泉热源主要来源于地壳深部或地幔的热能; 根据海南岛典型地热田热水地球化学分析资料, 应用钾镁温标估算的热储温度在 74~118℃ 之

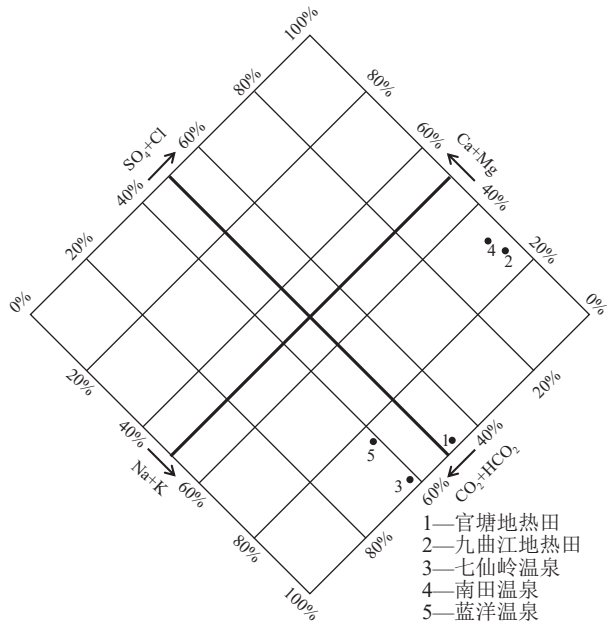


图 4 海南岛典型地热田水化学类型 Piper 图

Fig. 4 Piper diagram of hydrochemical types in typical geothermal fields in Hainan Island

表 3 海南岛典型地热田地球化学组成

Table 3 Summary table of hydrochemical analysis of typical geothermal fields in Hainan Island

地热田 名称	阳离子/(mg·L ⁻¹)					阴离子/(mg·L ⁻¹)						pH值	矿化度/(g·L ⁻¹)	水化学类型
	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Fe ³⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	SiO ₄ ²⁻	NO ₃ ⁻	F ⁻			
七仙岭	2.8	67.2	2.8	0.07	<0.02	12.0	25.9	58.6	128	0.94	12.0	8.98	0.299	HCO ₃ -Na
蓝洋	5.7	84.4	19.2	1.8	<0.02	23.6	66.1	134	151	0.29	14.0	8.32	0.467	HCO ₃ ·SO ₄ -Na
官塘	7.9	185	8.8	0.34	<0.02	115	73.8	164	113	0.50	24.0	8.39	0.678	HCO ₃ ·Cl-Na
九曲江	58.7	1590	664	4.5	1.0	3410	292	73.2	126	17.3	2.4	7.47	6.21	Cl-Na·Ca
南田	16.0	393	190	2.6	<0.02	741	255	48.8	100	1.7	4.8	7.89	1.73	Cl-Na·Ca

间,钾钠温标估算的热储温度在 171~202℃ 之间(表 5)。一般认为,钾镁温标公式代表不太深处热储层中的热动力平衡条件,估算的温度为浅层热储温度,而钾钠温标公式是根据水岩平衡和热动力方程推导的计算公式,适用于估算深部热储温度,在略高于海南岛平均地温梯度(3.5℃/100m)的大地热流背景下、恒温层温度取 27℃,得到海南岛典型地热田和温泉热储埋深深度为 4~5 km(表 4)。

综合海南岛已发现的地热田和温泉地热地质特征,可以将区内地热资源的成因模式归纳为:热源主要来源于地壳深部或地幔的热能,大气降雨通过断裂在地壳深部形成热对流循环,水体得到能量,水温升高,水压增大,使热流体通过裂隙上升,于构造岩体破碎段富集为热矿水体。热矿水一部分沿断裂垂直向上流动,在盖层薄弱处以热水泉排泄,形成温泉;另一部分在热矿泉高水位区向四周作水平流动,到热储边界与地表常水混合,水温降低。热储主要为以花岗岩或变质岩为原岩的断裂破碎带,盖层为第四系松散层或较完整的岩体(图 5)。而邻海的地热田或温泉由于海水的侵入,与热水混合,则形成高矿化度、高盐度的咸热水,如九曲江地热田和南田地热田。

3 地热资源潜力评价及赋存规律

3.1 地热资源潜力评价

将海南岛已发现或探明的 46 个隆起山地型地热田和温泉依据水温、可采储量(赵童, 2016),利用水文地质法估算可采资源量,计算公式为:

$$Q_{R1} = \rho w C_w Q (tr - tj) \tag{3}$$

式中: $Q_{R1} = Q_R/t$, 为单位时间的地热资源量(kcal/d); $Q = Adn/t$, 为热矿水可采资源量(L/d); t 为时

间(d); ρw 为热水密度(kg/m³), 查表得到; C_w 为水的比热容(1 kcal/kg·℃); tr 为热矿水水温(℃); tj 为年平均气温,海南岛取 27℃。

由于地热田和温泉在勘探程度、可采水量存在巨大差异,一般同一处温泉经勘探后,用地热井开采的可采水量是温泉的 10 倍左右,故将地热田与温泉分开估算。

将热能单位 1 kcal/d 换算成 MW 的换算关系是:

$$1\text{ W} = 3.6\text{ kJ/h} = 3.6/4.1868\text{ kcal/h} = 0.8598 \times 24\text{ kcal/d} = 20.64\text{ kcal/d}$$

通过估算,海南岛已发现或探明的 46 个隆起山地型地热田和温泉的总可采热量约为 8.1×10⁴ m³/d,可采资源量为 26.17×10⁸ kcal/d,折合 126.81 MW,相当于标煤 373.83 t/d(表 5、表 6)。其中,16 个地热田可采热量约为 6.97×10⁴ m³/d,可采资源量为 23.03×10⁸ kcal/d,折合 111.6 MW,相当于标煤 329 t/d(表 5);30 个温泉可采热量约为 1.15×10⁴ m³/d,可采资源量为 3.14×10⁸ kcal/d,折合 15.21 MW,相当于标煤 44.84 t/d(表 6)。

根据《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010)(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等, 2011)分类标准(表 7),按同级地热田是温泉热能的 10 倍,将海南岛中南部构造裂隙型地热水资源划分为中型、小型 2 类地热资源。其中,中型地热田 6 个(可采能量大于 10 MW),分别为蓝洋、官塘、九曲江、兴隆、七仙岭、南田地热田,小型地热田 10 个(可采能量小于 10 MW);中型温泉 4 个(可采能量大于 1 MW),分别为南平、林旺、半坡、高坡岭温泉,小型温泉 26 个(可采能量小于 1 MW)。

3.2 地热资源赋存规律及勘探开发有利目标区

通过对海南岛已知的 46 个地热田和温泉地热地质综合研究,尤其是对其中 5 个典型地热田的地

表 4 海南岛典型地热田放射性同位素分析及热水循环深度估算

Table 4 Radioisotope analysis and the hot water circulation depth estimation of typical geothermal fields in Hainan Island

地热田名称	放射性同位素/(Bq·L ⁻¹)				阳离子/(mg·L ⁻¹)			热储温度/℃		热水循环深度估算/km
	²²⁶ Ra/10 ⁻³	²²⁰ Ra	总α	总β	K ⁺	Na ⁺	Mg ²⁺	K-Mg温标	K-Na温标	
七仙岭					2.8	67.2	0.07	99	171	4.11
蓝洋	14.2	17.78	0.512	0.334	5.7	84.4	1.8	76	203	5.02
官塘	4.9	4.65	0.088	0.414	7.9	185	0.34	106	172	4.16
九曲江	23.42	39.91	0.059	0.073	58.7	1590	4.5	127	164	3.90
南田	78.2	50.57	0.58	0.615	16.0	393	2.6	97	169	4.07

表 5 海南岛地热田资源量估算及规模分类

Table 5 Resources estimation and classification of geothermal fields in Hainan Island

序号	地热田名称	水温/℃	可采热水储量/(m ³ ·d ⁻¹)	可采资源量/(10 ⁸ kcal·d ⁻¹)	可采资源量折合标煤/t	热能/MW	规模分类
1	蓝洋地热田	93	7000	4.4740	63.91	21.680	中型
2	西达地热田(含九乐宫温泉)	55	1200	0.3312	4.73	1.605	小型
3	官塘地热田	68	6700	2.6849	38.36	13.011	中型
4	九曲江地热田	64	7800	2.8297	40.42	13.712	中型
5	兴隆地热田	66	7708	2.9475	42.11	14.283	中型
6	兴隆玫瑰园地热田	50	2367.36	0.5380	7.69	2.607	小型
7	茄新地热田	36.1	5774.98	0.5224	7.46	2.532	小型
8	新村地热田	42	2265.28	0.3371	4.82	1.634	小型
9	七仙岭地热田	95	4040	2.6420	37.74	12.803	中型
10	石硐地热田	54	1032	0.2747	3.92	1.331	小型
11	南田地热田	60	8030	2.6051	37.22	12.624	中型
12	凤凰山庄地热田	53	4640	1.1891	16.99	5.762	小型
13	海坡地热田	44	2972.5	0.5004	7.15	2.425	小型
14	福报地热田	47	1385.47	0.2740	3.91	1.328	小型
15	莺歌岭-九所地热田	40	3934	0.5074	7.25	2.459	小型
16	八所-感城地热田	40	2887.48	0.3724	5.32	1.805	小型
合计			6.97×10 ⁴	23.03	329	111.6	

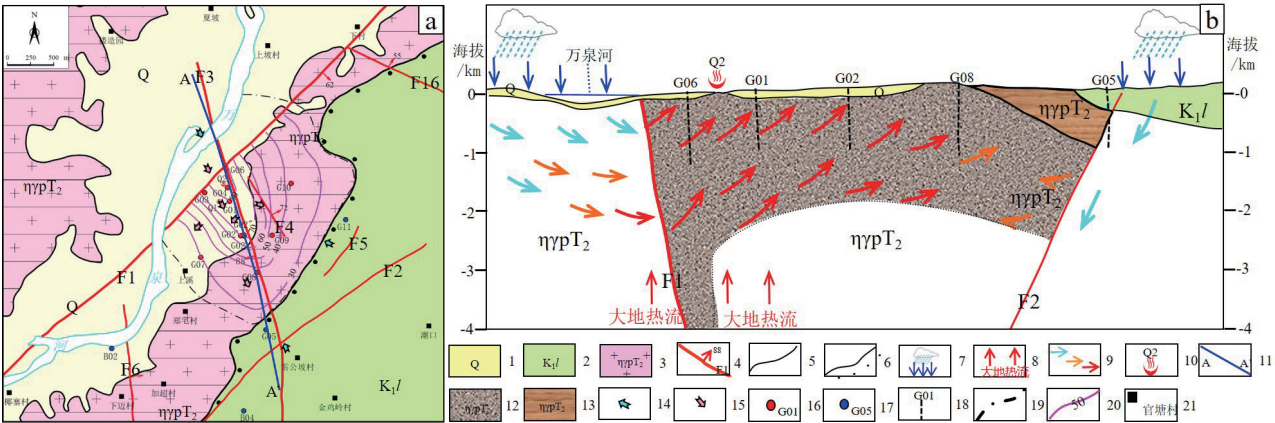


图 5 官塘地热田地热地质图(a)和成因模式图(b)

Fig. 5 Geothermal geological map (a) and genetic model ideograph of Guantang geothermal field (b)

1—第四系;2—白垩系下统鹿母湾组;3—三叠纪中期花岗岩;4—断层;5—地质界线;6—不整合界线;7—地下水补给;8—大地热对流;9—地下水流向;10—地面温泉及编号;11—模式图剖面位置;12—三叠纪中期花岗岩断裂破碎带热储;13—三叠纪中期花岗岩基岩盖层;14—地下水补给方向;15—地热水排泄方向;16—热水钻孔及编号;17—常温钻孔及编号;18—地热钻孔及编号;19—地热田边界;20—水温等值线;21—村镇

质要素进行系统分析,基本明确了海南岛隆起山地型地热资源的赋存规律。

(1)海南岛隆起山地型地热资源均分布于中南部五指山褶皱带的抱板隆起区、五指山隆起区和三

亚台缘坳陷3个构造单元。

(2)断裂是控制区内地热田和温泉最主要的地质要素,东西向、北东向深大断裂是主要导热、导水断裂,旁侧的次级断层往往控制地热田(温泉)的热

储层分布,热储均为断层破碎带构造岩。

(3)海南岛地热田、温泉多分布于中生代花岗岩区,受断裂破碎的花岗岩是最主要的热储。

(4)海南岛隆起山地型水温高、规模较大的地热田、温泉主要分布于东南部和西北部 2 个大地热流值高值区。

(5)海南岛隆起山地型地热田、温泉主要分布在

恒温层水温高值区。

因此,海南岛东南部和西北部深大断裂附近及其交会部位、大地热流高值区、中生代花岗岩侵入体出露(或隐伏)区、具有高的地面水温的地区是隆起山地型地热资源勘探开发的有利目标区,可能也是隆起山地型干热岩地热资源的有利区。已知地热田及温泉周边是地热资源勘探开发的有利目标区,如

表 6 海南岛温泉资源量估算及规模分类

Table 6 Resources estimation and classification of hot springs in Hainan Island

序号	地热田名称	水温/℃	可采热水储量/(m ³ ·d ⁻¹)	可采资源量/(10 ⁸ kcal·d ⁻¹)	可采资源量折合标煤/t	热能/MW	规模分类
1	沙田温泉	57	541.44	0.1598	2.28	0.775	小型
2	加答温泉	54	70.85	0.0189	0.27	0.091	小型
3	桂根温泉	42	216	0.0321	0.46	0.156	小型
4	红岗温泉	37	603.36	0.0600	0.86	0.291	小型
5	官新温泉	75	296	0.1385	1.98	0.671	小型
6	蓝山温泉	58	25.92	0.0079	0.11	0.038	小型
7	石壁温泉	36	61.92	0.0055	0.08	0.027	小型
8	乌坡温泉	46	494.4	0.0930	1.33	0.451	小型
9	上安温泉	51	463.68	0.1099	1.57	0.533	小型
10	油甘温泉	58	26	0.0079	0.11	0.038	小型
11	南平温泉	77	1228.8	0.5976	8.54	2.896	中型
12	红鞋温泉	68	174.53	0.0700	1.00	0.339	小型
13	高峰温泉	72	401.76	0.1768	2.53	0.857	小型
14	林旺温泉	67	1054	0.4134	5.91	2.003	中型
15	五指山市地热点	40.1	384	0.0499	0.71	0.242	小型
16	半岭温泉	77	563.24	0.2742	3.92	1.329	中型
17	南岛温泉	34.8	850.18	0.0659	0.94	0.319	小型
18	崖城温泉	59	157.92	0.0497	0.71	0.241	小型
19	千家温泉	48	426	0.0885	1.26	0.429	小型
20	石门山温泉	36	1382	0.1236	1.77	0.599	小型
21	中沙温泉	38	25.92	0.0028	0.04	0.014	小型
22	陀烈温泉	47	75.12	0.0149	0.21	0.072	小型
23	高坡岭温泉	78	667.9	0.3318	4.74	1.608	中型
24	二甲温泉	51	129.6	0.0307	0.44	0.149	小型
25	大田温泉	52	254.02	0.0627	0.90	0.304	小型
26	新街温泉	51	174.53	0.0414	0.59	0.201	小型
27	七叉温泉	47	157.25	0.0311	0.44	0.151	小型
28	邦溪温泉	40	256.56	0.0331	0.47	0.160	小型
29	木棉温泉	48	38.88	0.0081	0.12	0.039	小型
30	光雅温泉	40	298.94	0.0386	0.55	0.187	小型
合计			1.15×10 ⁴	3.14	44.84	15.21	

表 7 水热型中低温地热田和温泉规模分类标准
Table 7 Classification standards of low temperature geothermal fields and hot springs

地热资源 规模	地热田分类		温泉分类	
	热能/MW	保证开采 年限/年	热能/MW	保证开采 年限/年
大型	> 50	100	>5	100
中型	10~50	100	1~5	100
小型	< 10	100	< 1	100

注: 地热田规模分类标准按《地热资源地质勘查规范》(GB/T11615—2010); 温泉规模分类标准按同级地热田的 1/10

官塘地热田 F6、F16 两条北西向断裂与 F1 断裂交会部位具有与官塘地热田相似的地热地质条件, 是官塘地热田周边寻找隆起山地型地热田的有利目标区 (图 5-a); 七仙岭地热田水温高, 地热田深部热储温度可达 170℃ 以上, 具备深层水热型和干热岩地热资源勘探开发潜力。

4 结 论

(1) 海南岛隆起山地型地热资源的主要控制因素是东西向和北东向深大断裂, 深大断裂是导热、导水断裂, 旁侧的次级断层控制热储分布, 受断裂破碎的花岗岩是最主要的热储。

(2) 海南岛 6 条壳断裂控制了隆起山地型地热田或温泉的分布, 已知的地热田和温泉均分布于东西向王五-文教断裂以南地区, 形成沿尖峰-吊罗、昌江-琼海、九所-陵水断裂带分布的 3 个东西向地热田 (温泉) 带和沿琼海-三亚、定安-乐东断裂带分布的 2 个北东向地热田 (温泉) 带。

(3) 海南岛隆起山地型地热资源的热源主要来源于地壳深部或地幔的热能, 热水补给为大气降水, 通过断裂在地壳深部形成热对流循环, 于构造岩体破碎段富集为热矿水体, 在盖层薄弱处以热水泉排泄, 形成温泉。邻海的地热田或温泉由于海水的侵入, 与热水混合, 形成高矿化度、高盐度的咸热水。

(4) 海南岛隆起山地型地热资源丰富, 已发现和探明的 46 个地热田和温泉可采热量约 $8.1 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$, 可采资源量 $26.17 \times 10^8 \text{ kcal/d}$, 折合 126.81 MW, 相当于标煤 373.83 t/d, 按地热田和温泉水温、规模分类属于中、低温和中、小型地热田或温泉。海南岛东南部和西北部深大断裂附近及交会部位、大地热流高

值区、中生代花岗岩侵入体出露 (或隐伏) 区、具有高的恒温层水温的地区是隆起山地型地热资源勘探开发有利区。

蓝洋和七仙岭地热田水温高, 目前利用程度较低且单一, 热能盈余多, 建议加强地热资源用于制冷的可行性研究; 海南岛东南部具有高的大地热流背景, 主要为中生代花岗岩出露区, 分布有七仙岭地热田和南平、高峰等温度较高的温泉, 具有干热岩地热资源潜力, 建议加大干热岩地热资源研究评价和勘探工作。

References

Chao H X, Han X H, Yang Z H, et al. 2016. New exploration of geotectonic characteristics of Hainan Island[J]. Earth Science Frontier, 23(4): 200–211 (in Chinese with English abstract).

Chen Y M. 2008. Present Situation of Geothermal Resource in Hainan Island and Suggestions for Development and Exploitation[J]. Scientific and Technological Management of Land and Resources, 25(6): 61–65 (in Chinese with English abstract).

Gao F L, Yang X Q, Wu G A, et al. 2009. Characteristics of thermal springs and genesis of thermal underground waters in Hainan Island[J]. Journal of Jilin University (Earth Science Edition), 39(2): 281–287.

Gao W, Guo Z H, Zhou J X, et al. 2020. High precision aeromagnetic characteristics and Curie depth analysis of the Hainan Island[J]. Acta Geologica Sinica, 94(11): 3249–3262 (in Chinese with English abstract).

Hainan Geological Survey. 2017. Regional geology of Hainan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House (in Chinese).

Hu S B, He L J, Wang J Y. 2001. Compilation of heat flow data in The China Continental area (3rd edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 44(5): 611–626 (in Chinese with English abstract).

Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al. 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4th edition)[J]. Chinese Journal of Geophysics, 59(8): 2892–2910 (in Chinese with English abstract).

Lin W J, Gan H N, Wang G L, et al. 2016. Occurrence prospect of HDR and target site selection study in Southeastern of China[J]. Acta Geologica Sinica, 90(8): 2043–2058 (in Chinese with English abstract).

Wu X J, Zhang Q, Chen C L, et al. 2015. The application of comprehensive electrical prospecting to exploration of thermal mineral water in Wuzhishan area[J]. Chinese Journal of Engineering Geophysics, 12(3): 348–353 (in Chinese with English abstract).

Xia B D, Shi G Y, Fang Z, et al. 1991. The Late Palaeozoic rifting in Hainan Island, China[J]. Acta Geologica Sinica, 65(2): 103–115 (in Chinese with English abstract).

Xu D. 2017. Hydrogeochemistry of geothermal field of Long Mu Bay, Hainan Province[D]. Master Thesis of East China University of Technology: 1–65(in Chinese with English abstract).

- Yang F, Ruan M, Zhang D Q, et al. 2018. Study on the geochemical characteristics of hot mineral water isotope in Haipo district, Sanya City, Hainan Province[J]. Ground water, 40(4): 15–17 (in Chinese with English abstract).
- Yang X M, Liu C N, Yang Z Z. 2004. The application of three-dimensional resistivity view to disclosing structural form of the Nantian geothermal field[J]. Geophysical & Geochemical Exploration, 28(1): 62–64 (in Chinese with English abstract).
- Zhang Y. 2019. A study of the characteristics and formation of the hot springs in Hainan Island[D]. Master Thesis of China University of Geosciences (Beijing): 1–56(in Chinese with English abstract).
- Zhang Y L. 2019. Analysis of geothermal geological conditions in the area of Liudongying of Huairan sag in Datong Basin[J]. Underground Water, 41(5): 15–17(in Chinese with English abstract).
- Zhao T. 2016. Characteristics and evaluation of geothermal resources in Hainan Province [D]. Master Thesis of Guilin University of Technology: 1–79(in Chinese with English abstract).
- 晁会霞, 韩孝辉, 杨志华, 等. 2016. 对海南岛大地构造特征的新探索[J]. 地学前缘, 23(4): 200–211.
- 陈颖民. 2008. 海南岛地热资源现状及勘查开发利用建议[J]. 国土资源科技管理, 25(6): 61–65.
- 高芳蕾, 杨小强, 吴国爱, 等. 2009. 海南岛温泉特征与地下热水成因[J]. 吉林大学学报(地球科学版), 39(2): 281–287.
- 高维, 郭志宏, 周坚鑫, 等. 2020. 海南岛高精度航磁特征与居里等温面深度分析[J]. 地质学报, 94(11): 3249–3262.
- 海南省地质调查院. 2017. 中国区域地质志·海南志[M]. 北京: 地质出版社.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旻. 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J]. 地球物理学报, 44(5): 611–626.
- 姜光政, 高棚, 饶松, 等. 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. 地球物理学报, 59(8): 2892–2910.
- 蒯文静, 甘浩男, 王贵玲, 等. 2016. 我国东南沿海干热岩赋存前景及与靶区选址研究[J]. 地质学报, 90(8): 2043–2058.
- 吴小洁, 张前, 陈长亮, 等. 2015. 综合电法勘探在五指山地区找热矿水中的应用[J]. 工程地球物理学报, 12(3): 348–353.
- 夏邦栋, 施光宇, 方中, 等. 1991. 海南岛晚古生代裂谷作用[J]. 地质学报, 65(2): 103–115.
- 徐单. 2017. 海南省龙沐湾地热田的水文地球化学研究[D]. 华东理工大学硕士学位论文: 1–65.
- 杨峰, 阮明, 张东强, 等. 2018. 海南省三亚市海坡地区热矿水同位素地球化学特征研究[J]. 地下水, 40(4): 15–17.
- 杨兴沐, 刘川宁, 杨忠政. 2004. 三维电阻率视图揭示南田地热田构造形态[J]. 物探与化探, 28(1): 62–64.
- 张颖. 2019. 海南岛温泉特征及成因研究[D]. 中国地质大学(北京)硕士学位论文: 1–56.
- 张玉良. 2019. 大同盆地怀仁凹陷柳东营一带地热地质条件分析[J]. 地下水, 41(5): 15–17.
- 赵童. 2016. 海南省地热资源特征及评价[D]. 桂林理工大学硕士学位论文: 1–79.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2011. 地热资源地质勘查规范(GB/T11615—2010)[S]. 北京: 中国标准出版社.