

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2025.062>



福建省地热成藏模式 II: 流体循环模式与地热驱动力

孙厚云^{1,2}, 马 峰^{1,2}, 王贵玲^{1,2*}, 朱 喜^{1,2}, 张 薇^{1,2}, 陈礼明³

1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 福建厦门 361021

2. 自然资源部地热与干热岩勘查开发技术创新中心, 河北石家庄 050061

3. 福建省地质调查研究院, 福建福州 350013

摘 要: 福建省地处华南陆缘高热流地热异常区, 地热流体循环演化与成藏机制研究对区域地热资源科学利用具有重要意义. 在系统梳理区域地地质条件基础上, 本文通过对地热流体的水化学和同位素分析, 探讨了省域内不同类型地热系统的流体循环演化机制与地热驱动力差异, 建立了分区地热成藏概念模型. 结果表明, 福建省水热型地热成因可分为闽西北隆起山地断裂深循环对流型、闽西南断陷盆地对流传导复合型、闽东-闽西南断拗带断裂深循环对流型三种类型. 区内地热资源成藏受控于区域构造与地壳热结构差异, 政和-大浦断裂以西武夷隆起带与闽东滨海陆缘带具有不同的热源机制, 但水热通道形式相对统一. 闽西武夷隆起带地热系统热源以幔源热为主, 闽东火山拗陷带为“热壳冷幔”岩石圈热结构, 壳内岩体放射性衰变生热对地热系统聚热贡献较高. 区域张性-张扭性 NW 向断裂构成地热系统的导水通道, 压性为主的 NE 向断裂则构成热聚敛的阻水-导热通道. 由水热系统流体温度和盐度变化导致的闽西北、闽西南和闽东火山断拗带与滨海地区地热驱动力的标准水头分别为 +218.75 m、+202.24~+250.60 m、+261.72 m 和 +308.32 m. 闽西永梅拗陷带、闽东 NW 与 NE 向深大断裂交汇处、断陷盆地-断陷海湾深入大陆段、福州与漳州等断陷盆地基底隆起带、永泰-德化-仙游等环状火山构造带与 NE 向深大断裂交汇处地热能储温度超过 150 °C, 为福建省域内中高温地热资源成藏潜力区.

关键词: 地热水; 地下水循环; 地热驱动力; 成因模式; 福建省; 水化学; 同位素.

中图分类号: P641.3

文章编号: 1000-2383(2025)09-3581-35

收稿日期: 2024-12-24

Formation Mode of Geothermal Resources in Fujian Province II: Circulation Conceptual Model and Driving Force of Hydrothermal System

Sun Houyun^{1,2}, Ma Feng^{1,2}, Wang Guiling^{1,2*}, Zhu Xi^{1,2}, Zhang Wei^{1,2}, Chen Liming³

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Xiamen 361021, China

2. Technology Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploitation and Development, MNR, Shijiazhuang 050061, China

3. Fujian Institute of Geological Survey, Fuzhou 350013, China

Abstract: Fujian Province is one of the most important geothermal anomaly areas in the southern margin of China. It is of great significance for the scientific utilization of geothermal resources to reveal the formation mechanisms of geothermal system in the

基金项目: 厦门市自然科学基金项目 (No. 3502Z202471066); 中国地质科学院基本科研业务费项目 (No. SK202328); 中国地质调查局项目 (Nos. DD202305010, DD20230019); 中国地质科学院青年英才项目 (No. YK202305).

作者简介: 孙厚云 (1990-), 男, 助理研究员, 博士, 主要从事地热地质与水文地球化学研究. ORCID: 0000-0002-3511-3879. E-mail: shyun2016@126.com

* 通讯作者: 王贵玲, ORCID: 0000-0002-2916-7360. E-mail: guilingw@163.com

引用格式: 孙厚云, 马峰, 王贵玲, 朱喜, 张薇, 陈礼明, 2025. 福建省地热成藏模式 II: 流体循环模式与地热驱动力. 地球科学, 50(9): 3581-3615.

Citation: Sun Houyun, Ma Feng, Wang Guiling, Zhu Xi, Zhang Wei, Chen Liming, 2025. Formation Mode of Geothermal Resources in Fujian Province II: Circulation Conceptual Model and Driving Force of Hydrothermal System. *Earth Science*, 50(9): 3581-3615.

area. The circulation and evolutionary characteristics of geothermal fluid were clarified, and the conceptual formation mode and driving force of hydrothermal system were established in each hydrogeochemical zone based on the implications of hydrochemical and isotopic characteristics of geothermal water samples, GIS spatial analysis, and the overview of regional geothermal geological and crustal thermal structure conditions. The results show that the geothermal system in Fujian Province can be divided into deep circulation convection type of uplifted mountain faults in northwestern region, complex convection conduction hydrothermal type of fault basin in southeastern region, and deep circulation convection type of fault depression zone in eastern and southeastern region. The endowment of geothermal resources in Fujian is controlled by regional tectonics and crustal thermal structure that the geothermal systems of Wuyi uplift zone in western Zhenghe-Dapu fault and the coastal margin zone in eastern Fujian obtained different crust and mantle heat source compositions, but relatively uniform hydrothermal transmission channels. The heat accumulation of the geothermal system in the Wuyi uplift zone is mainly derived by mantle conduction, while the lithospheric thermal structure of eastern volcanic depression zone is the “hot crust-cold mantle” type in which radioactive element decay of intrusive-volcanic rock mass contributed a relatively high amount of crustal heat accumulation. The regional tensile torsional NW faults turned out to be the water conducting channels of geothermal systems, while compression-dominated NE-trending faults were the water-blocking and heat-conducting channels for heat accumulation. The standard head of total geothermal driving force generated by temperature rise and salinity increase in hydrothermal system of northwestern, southwestern, eastern volcanic depression zone and coastal margin region was +218.75 m, +202.24~+250.60 m, +261.72 m and +308.32 m respectively. The Yongmei depression zone in western Fujian, and intersection zones of regional NW and NE deep faults, namely the hydraulic fracture of the faulted basin and the sunken bay extend deep into the mainland, the basement uplift zone of fault basins such as Fuzhou and Zhangzhou basins, intersection zones of regional NE deep faults and ring-shaped volcanic apparatus in eastern Fujian were the optimal target areas for exploitation of medium-high temperature geothermal resources in bulk.

Key words: geothermal water; groundwater circulation; geothermal driving force; formation mode; Fujian Province; hydrochemistry; isotopes.

0 引言

福建省是我国东南地热资源综合开发利用的优势潜力区,地热温泉流体循环演化与成因机制研究对区域地热资源开发利用具有重要意义.地下水流动系统的识别与划分是分析地热水形成机制、水力驱动和加热模式的基础,福建省中低温水热系统多属区域地下水流动系统,地下水循环深度大,流动路径复杂,很难直接获得不同层位的地下水场信息(Luo *et al.*, 2022; Tian *et al.*, 2023).区域尺度的地热水循环模式可通过地热流体的水化学及同位素特征识别,水化学组分对地热成因的指示主要包括地热水及化学组分的来源、地热热储温度、冷热水混合比例、地热水循环深度及水岩反应程度等方面;而同位素特征对地热循环演化的指示主要包括放射性同位素对地热水的计时作用与稳定同位素对地热水地球化学过程的示踪作用两个方面.地热水氢氧、碳、硫和锶、钙、硼、锂同位素等可以指示地热水补给来源、循环演化路径、储层性质,以及量化水文地球化学演化和水岩作用过程等(Pang *et al.*, 2017; 赵永红等, 2017; Li *et al.*, 2018a; Temizel *et al.*, 2021; 祁

士华, 2021; Jia *et al.*, 2024; 史自德等, 2024).此外,东南沿海地下水流动系统相较内陆浅层水流系统存在额外的热量和海水混合盐分来源,地下水的温度分布和流动形态除受重力势能差驱动控制、地应力场制约外,还受到流体温度、盐度变化导致的密度、黏度差等非重力额外“地热驱动力”影响,需对对流型水热系统中地下水运移的地热驱动力作用进行探讨分析(Saar, 2011; Lu *et al.*, 2017; 汪啸, 2018; 毛绪美等, 2022; 叶建桥和毛绪美, 2024).

福建省地热温泉开发利用相对较早,省内以往地热研究主要集中于地热异常形成的区域地质构造与地球物理背景、岩石圈热结构和热状态、陆缘壳幔异常结构与地热系统构造控热机制(Hu and Wang, 2000; 熊绍柏等, 2002; 廖志杰, 2012; Huang *et al.*, 2015; Gan *et al.*, 2019; 李帅等, 2022; 甘浩男, 2023; Zhao *et al.*, 2023; 张健等, 2018, 2024; Wu *et al.*, 2025),以及单个温泉点或地热田的水化学成因剖析与资源潜力评价(Huang and Goff, 1986; Hochstein *et al.*, 1990; Liu *et al.*, 2022, 2025; Lin and Yin, 2022; Yuan *et al.*, 2024)等方面,缺乏对省域范围内地热系统流体循环与地热形成驱动力,以及不同地质背景区地热成藏模式的系统性论述.在省域尺度

地热流体地球化学形成演化研究与区域地热地质背景系统梳理基础上,本研究通过地热流体水化学和同位素分析,识别不同地热分区内地热系统的形成条件与水循环模式,定量评价地热水补给受浅层冷水与海水混合影响程度,分析典型地热系统的“源”、“通”、“储”、“盖”特征,探讨地热系统流体循环驱动力的差异,建立典型地热系统成因模式地质概念模型,以期为区域地热资源合理高效开发利用提供理论支撑和参考依据。

1 研究区概况

1.1 地质概况

以南平-宁化构造带和政和-大埔断裂带作为构造边界,福建省可分为闽西北隆起带、闽西南坳陷带、闽东火山断拗带三个构造单元,且分别与加里东期褶皱区、燕山晚期火山-侵入杂岩区和长乐-南澳变质变形区相对应(图1c)。在大地构造分区基础上,结合地热储层地质建造类型,福建省地热分区可分为闽西北隆起带变质岩-侵入岩建造区(NW-I区),闽西南坳陷带侵入岩建造区(SW-I区)、侵入岩-碎屑沉积岩建造区(SW-II区)与碳酸盐岩-碎屑沉积岩建造区(SW-III区),闽东火山断拗带侵入岩-火山岩建造区(E-IV区)与东南沿海变质带侵入岩-第四系建造区(E-V区)六个亚区(图1a, 1c)。

1.2 地热地质与地壳热结构

1.2.1 地温梯度 福建省内2 000~4 000 m地热钻孔主要分布于漳州盆地至厦门湾区,其他区域地热钻孔多在500 m以浅(蔺文静等, 2020; 甘浩男, 2023; Lin *et al.*, 2023)。根据典型钻孔测温曲线(图2a~2b),闽西南至武夷山区地温梯度多小于20 °C/km,局部断陷盆地(龙岩盆地等)地温梯度较高,在30 °C/km以上。东南沿海地温梯度一般在18.3~52.0 °C/km,厦门湾-漳州盆地内平均地温梯度约18.3 °C/km,低于内陆地区平均值;温泉分布集中的漳州地区地温梯度一般大于40 °C/km。在地壳厚度由沿海向陆地逐渐增厚背景下,龙岩到厦门约20 km范围内地温梯度由30 °C/km增大至40 °C/km。沿海地区下地壳热物质上涌形成的浅部高温低阻层导致近地表地温梯度升高,加之浅部水热活动的影响,南靖-永春一带地温梯度可达100 °C/km以上(魏斯禹等, 1988)。在考虑浅部水热活动影响时,福州-长泰地区地温梯度在20.0~114 °C/km,主要集中于43.0~(68.8±2.32) °C/km

范围,福州盆地部分钻孔地温梯度达70~85 °C/km(蔺文静等, 2020, 2024),宁德飞鸾地热钻孔地温梯度为48.9~61.0 °C/km(甘秋玲, 2023),福州贵安地温梯度平均为47.0 °C/km(赵亮亮, 2011)。漳州盆地地温梯度在41.70~84.44 °C/km,其中漳州地招ZK8孔地温梯度为84.44 °C/km,汤洋地热田地温梯度为41.7 °C/km(李成龙, 2019)。泉州德化-戴云山环状火山带地温梯度空间变异明显,地温梯度在14~100 °C/km,如德化龙门峡谷地温梯度多在20~40 °C/km,个别钻孔达50~100 °C/km,而泉州地震台监测孔地温梯度仅为14.0 °C/km(李全力, 2021)。在沿海莆田至同安存在一个地温低异常区,地温梯度在(12.9±0.49)~(17.1±0.49) °C/km(中国科学院地球物理研究所, 1992)。

综合而言,在浅部水热活动影响下,福建东南沿海地温梯度可达到40 °C/km,在部分中高温热田中(如漳州、福州)可高达70~85 °C/km(万天丰等, 1988; 黄昌旗等, 2018);而在水热活动影响较小地区,地温梯度空间分异较大,如漳州龙海清泉林场干热岩HDR-1井(4 000.2 m)地温梯度为6.4~37.64 °C/km,平均为(21.48±6.29) °C/km;前亭ZK2(2 500 m)地温曲线稳定段增温梯度为13.2~24.0 °C/km,平均值为(18.6±5.4) °C/km。东山樟塘DK1孔(2 014 m)、隆教白塘湾BT01孔(2 000.37 m)与红星村钻孔(1 259 m)地温梯度平均值分别为20.0 °C/km、19.8 °C/km和17.0 °C/km(蔺文静等, 2020; 甘浩男, 2023)。厦门集美杏林湾JM-1干热岩勘探孔(2 014 m)地温梯度为17.2~34.4 °C/km,平均值为(21.3±4.11) °C/km。在闽东火山断陷盆地火山岩与侵入岩等受水热活动影响较小地区,测温曲线呈现出线性稳态特征(如龙海HDR-1和集美JM-1),表现为传导为主的热传递过程;而在NE-NW向深大断裂交汇部位及环状火山机构放射性断裂带周围,钻孔测温曲线表现出不规则起伏(前亭ZK2孔等),与断裂带热对流对浅部地温场的影响有关。

福建省以往地热研究主要聚焦于侵入岩和火山岩深循环对流地热系统上(廖志杰, 2012; 庄庆祥等, 2019; 蔺文静等, 2024),对区内碳酸盐岩对流-传导复合型地热系统的探索剖析相对较少。闽粤琼地热异常带的海南和广东地区均已发现碳酸盐岩热储,如琼州海峡雷琼盆地,广东茂名、佛山三水、惠州龙门和石坝等上古生界碳酸盐岩盆地地热系统热储层为岩溶裂隙-孔洞分布广泛的厚层-巨厚

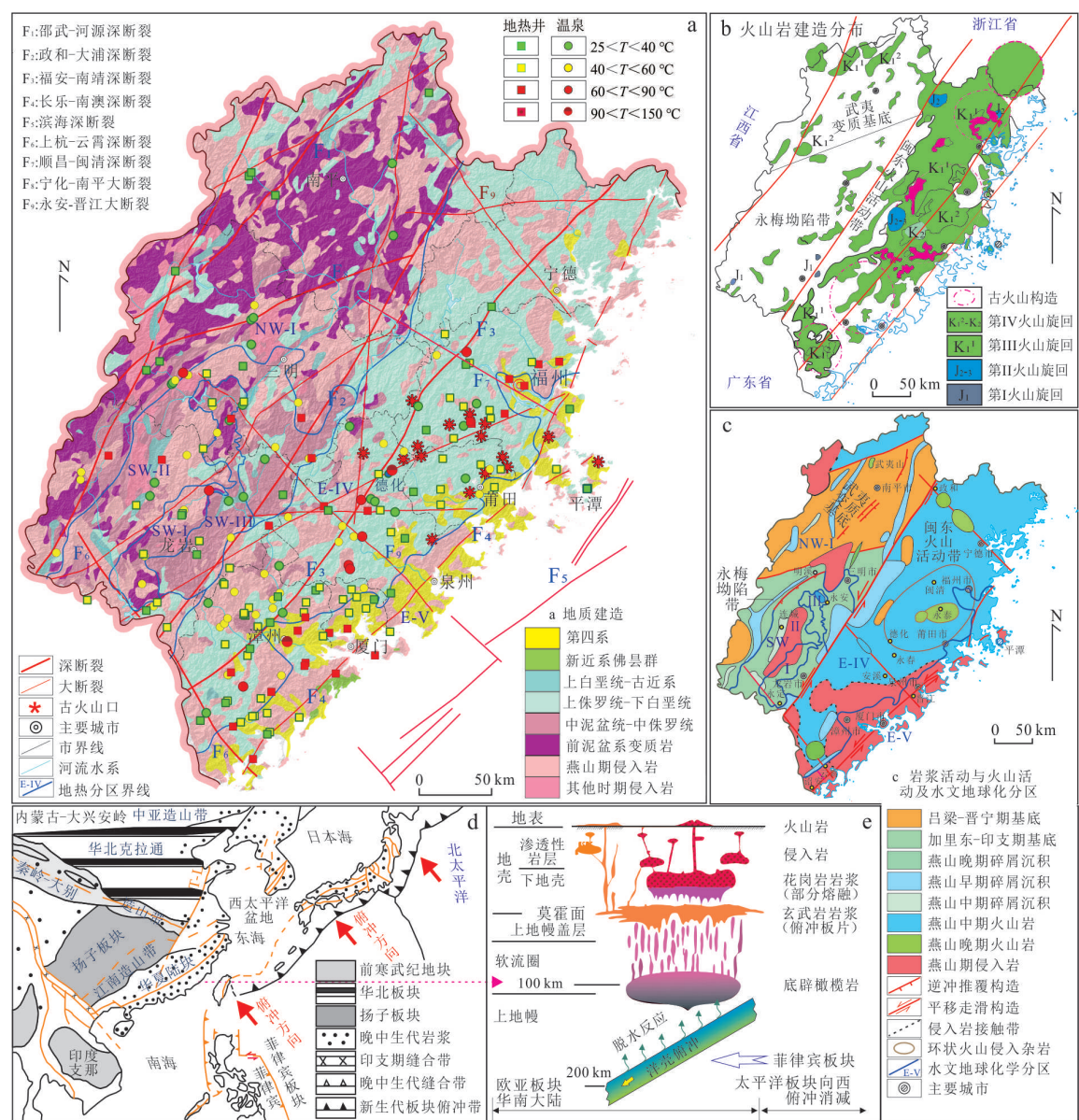


图1 福建省地质建造与地热温泉样品分布(a)、中生代火山岩时空分布(b)、岩浆活动-火山活动与地热水文地球化学分区(c)、区域大地构造框架(d)与太平洋俯冲消减带上部岩浆岩与火山岩断拗带热储体成因模式(e)

Fig.1 Regional geological formation and sampling sites of geothermal water (a), spatiotemporal distribution of Mesozoic volcanics (b), magma-volcanic activity sequence and hydrogeochemical zoning(c), regional geological section (d) and schematic diagram of the genetic of felsic magma and deep thermal reservoirs in the subduction zone of the Pacific plate (e) in Fujian Province

图b据 Xu *et al.* (2021, 2024)、余明刚等(2021); 图d据 Faure *et al.* (2017); 图e据 Zhou and Li (2000)

层碳酸盐岩,上部覆盖中生代红层砂岩及新生代沉积砂岩层.雷琼盆地上覆新生代砂岩盖层地温梯度 10~50 °C/km,在断层水热活动影响下,地热水升流区段地温梯度可达 50~80 °C/km (王思佳等, 2024; Zheng and Luo, 2024). 闽西南拗陷带内碎屑沉积岩与海相碳酸盐岩建造发育(图 1a),永安盆地等断陷盆地亦存在碎屑岩-碳

酸盐岩对流-传导复合型地热资源潜力,在阐述福建省域地热成因模式时需单独探讨.

1.2.2 莫霍面埋深与地壳厚度 福建省莫霍面总体呈 NE 向的椭圆状槽形拗陷形态,以福安-南靖、武夷山-武平两线为界,全省莫霍面形态可分为闽东莫霍面陡坡带、闽中莫霍面拗陷带与闽赣交界莫霍面隆起带三个区(图 2f). 东南沿海莫霍埋深等值

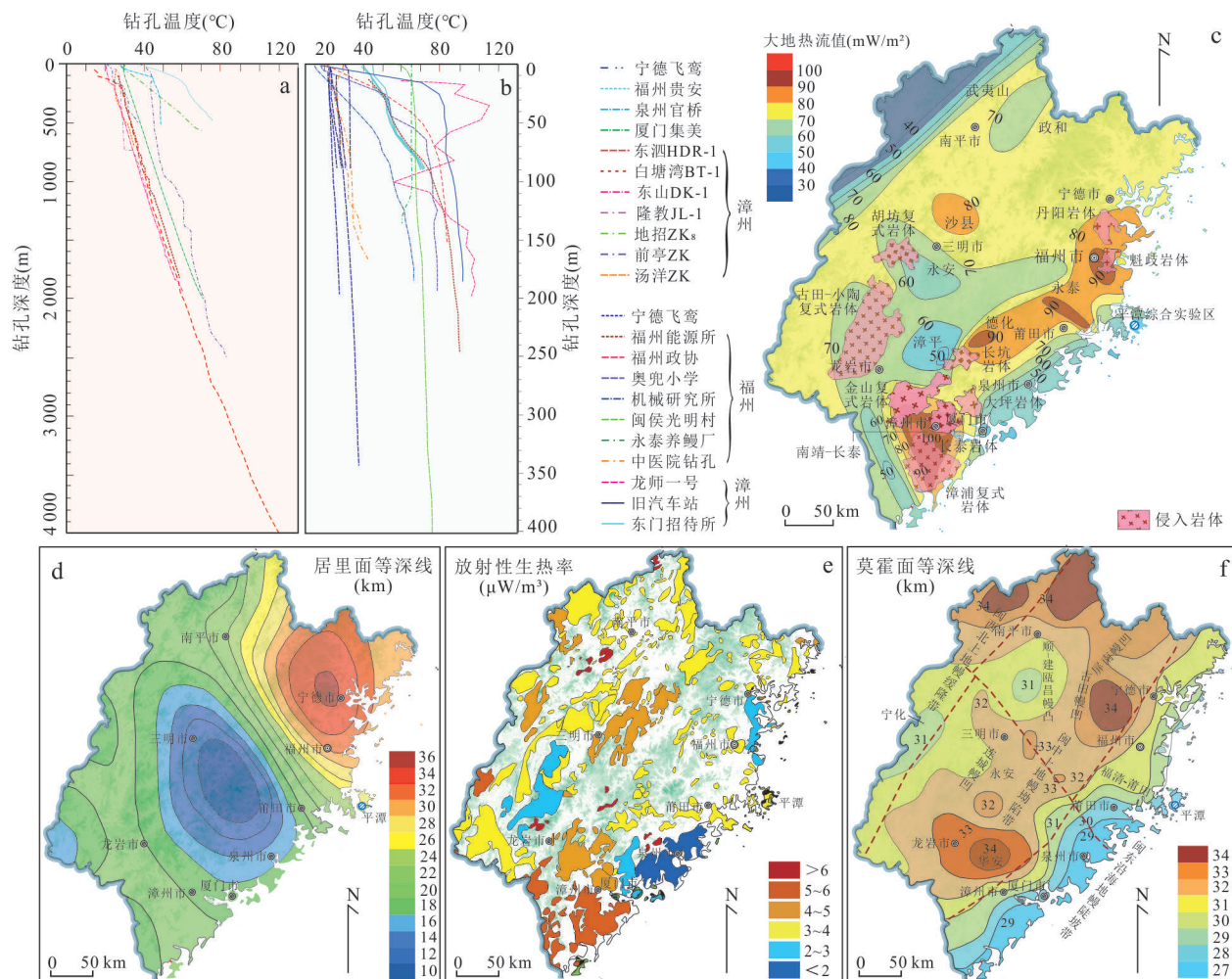


图2 福建省典型地热钻孔地温曲线(a,b)、大地热流(c)、居里等温面(d)、主要侵入岩体放射性生热率(e)与莫霍面埋深(f)分布
Fig.2 The temperature distribution curve of typical geothermal borehole (a, b), terrestrial heat flow (c), and burial depth for Curie isotherm surface (d), radioactive heat generation rate of main invading rock mass(e) and depth of Moho surface (f) in Fujian Province

典型钻孔测温曲线参考中国科学院地球物理研究所(1992)、赵亮亮(2011)、李成龙(2019)、蔺文静等(2020,2024)、李全力(2021)、甘秋玲(2023)、甘浩男(2023)等;大地热流、莫霍面和居里面埋深参考祖辅平(2012)、滕吉文等(2017)、黄昌旗等(2018)、姜光政等(2016);放射性生热率参考赵平(1995)、林乐夫等(2017)、李科甫和朱传庆(2023)

线在太平洋板块俯冲挤压应力下呈NE向向内陆呈陡坡状延伸,深度在29~30 km;越接近沿海区带,埋深越浅.在福安-宁德、闽侯-永泰、德化-同安段,莫霍面埋深等值线明显向NE或SW拐折,福安、云霄和同安段莫霍面抬升梯度相对较高(中国科学院地球物理研究所,1992;Huang *et al.*, 2015).闽中山脉地幔坳陷带总体呈NE-NEE走向,莫霍面埋深在32~34 km,带内分布有古田(松溪-闽清-福安)和龙岩-华安两个次一级幔凹区,闽侯大湖和华安处莫霍面埋深最大达34 km.漳州华安是一个中强地震活动“地震窗”,现今小震活动频繁,已有证据表明其与深部热作用导致的地壳向上垂直作用力有关

(吕浩江等,1989).此外,闽中管前、水口分布两处NE走向的小型凹陷槽,明溪-漳平之间及屏南地区局部地幔凸起(中国科学院地球物理研究所,1992;Wu *et al.*, 2025).闽赣交界武夷山区莫霍面为NE走向的缓坡带,埋深在31~34 km,顺昌(邵武-崇安-松溪)次一级幔凸带埋深为31 km,浦城和宁化凸起次一级深部构造则向西延入江西.区域地壳厚度与莫霍面埋深分布总体一致,亦主要分为三个区带.沿海地幔陡坡带地壳厚度由滨海向内陆由26.5 km增厚至29 km;闽中上地幔坳陷带地壳厚度为30~31 km,以将乐-惠安为界,又可分为连城凹陷与建瓯隆起,从SW向NE地壳基底呈隆-凹-隆-凹变

化特征;闽赣交界上地幔缓隆带武夷山地区地壳厚度达 31~32 km.地震波速揭示的岩石圈分层结构显示,福建沿海地壳上、中、下三层厚度分别为 12 km、10 km、8 km,中地壳上部 12~18 km 范围内可观测到一个低速体(熊绍柏等, 2002; Zhou *et al.*, 2020a; 李帅等, 2022; Zhao *et al.*, 2023).

1.2.3 居里面埋深 福建省居里面埋深起伏较大,总体在 10~35 km.三明尤溪-古田至泉州德化-永春、福州永泰至莆田一带存在一个居里面隆起区,埋深在 10~15 km.在屏南幔凹处居里面显著凹陷,埋深达 33~35 km(图 2d).福州盆地-永泰、漳州盆地和泉州德化-安溪-永春一带居里面较浅,温泉出露亦相对最多.南平-福州顺昌-闽清深断裂(闽江断裂)展布区居里面呈陡坡状,埋深由 10~12 km 陡降至 30 km,其相应的壳内低速-高导层埋深在 14~15 km;漳州盆地居里面隆升到 10~12 km,低速高导层埋深在 11~14 km;德化-安溪-永春区低速高导层埋深约 12 km.居里面埋深可以反映地壳热结构的分布状态,大部分温泉出露位置处于居里面的隆起或凹陷的轴部,即低速高导层埋深较浅处,居里面隆起与凹陷的拐点亦有少部分温泉出露,浅地表地热异常与深部热背景密切相关(Zhou *et al.*, 2020a; Wu *et al.*, 2025).

莫霍面深度起伏形态受深部构造控制,莫霍面上隆处,熔融的高温流体向上地壳侵位形成浅部高温低阻层,导致深部热流上涌,使得地温相对升高;亦即地壳厚度减薄处,地温明显升高(熊绍柏等, 2002; Huang *et al.*, 2015; Dong *et al.*, 2020).东南沿海地壳(莫霍面)递变带,湄洲湾-建宁、上杭-云霄、浦城-宁德地壳(莫霍面)变异带一侧及建瓯-顺昌地幔凸起处地温高异常为地热成藏提供了深部构造背景,故此温泉分布相对最为密集.此外,龙岩-华安幔凹、永安盆地等所处的闽中地幔拗陷带,莫霍面等值线呈环状封闭,莫霍面的隆起和拗陷制约着盆地地壳演化和发展.以永安盆地为中心由东至西,地幔呈陡坡带-拗陷带-缓隆带分布,软流圈顶面显著隆起(由 100 km 锐减至 79 km),地幔刚性部分与地壳具有同向的隆凹形态,岩石圈基底(软流圈顶面)相应的也呈深凹陷-狭窄隆起带-隆起带分区特征(祖辅平, 2012; Xu *et al.*, 2019),为碳酸盐岩对流-传导复合型地热的成藏提供了有利条件.

1.2.4 大地热流与放射线生热率 (1)大地热流. 根据全国大地热流汇编(姜光政等, 2016; Jiang *et*

al., 2019), 东南地区平均热流值为 $(61.4 \pm 12.3) \text{ mW/m}^2$,福建省高热流区有漳州-南靖、德化-福州和永安三个区带,它们分别受九龙江断裂与长乐-诏安断裂、闽江断裂、永安-晋江断裂的控制.闽西北存在一个狭长大地热流升高带(从 30 mW/m^2 升至 80 mW/m^2)沿邵武-河源深大断裂带呈 NE 向展布,其中南平($n=4$)大地热流平均值为 78.1 mW/m^2 .闽中地幔拗陷带大地热流值相对稳定,多在 70 mW/m^2 ,闽西北沙县幔凸处大地热流值升高至 80 mW/m^2 以上.永安盆地及胡坊岩体带沿永安-晋江大断裂呈 NW 向分布一个大地热流低值区,三明大田幔凹带大地热流值为 66.32 mW/m^2 ,建宁、清流、沙县地区大地热流则稳定在 $71.8 \sim 79.3 \text{ mW/m}^2$,龙岩地区热流值为 $69.6 \sim 71.9 \text{ mW/m}^2$.永安盆地东北及东南缘漳平-永定一带及闽南上杭-云霄深断裂沿线为低大地热流值区,其中漳平-永定为政和-大埔断裂形变活动显著区段,其和溪断层一侧为上升区,由龙岩以东穿过雁石溪断裂,断块急剧下降;而华安地区为地幔凹陷区,故此大地热流值相对较低(Zhang *et al.*, 2021).东部沿海存在一处较为窄长的热流低值区($50 \sim 60 \text{ mW/m}^2$),与地温梯度低异常带相一致.平潭、莆田至厦门同安滨海地区大地热流值多低于 50 mW/m^2 ,泉州安溪及沿海热流为 $41.0 \sim 45.1 \text{ mW/m}^2$,厦门滨海为 47.2 mW/m^2 ,低于中国大陆大地热流平均值 60.4 mW/m^2 和全球大陆热流平均值 65 mW/m^2 .稍入内陆的漳州、福州魁岐岩体至永泰-德化(长坑岩体)一带为高热流值区($80 \sim 90 \text{ mW/m}^2$),闽侯和福州两点校正热流值为 72.3 W/m^2 和 80.7 mW/m^2 ;漳州盆地大地热流值变化范围较大,受水热异常影响较小地区热流值仅为 $50 \sim 65 \text{ mW/m}^2$ (Jiang *et al.*, 2019),而水热异常带内大地热流值在 $87.0 \sim 100 \text{ mW/m}^2$,平均达 93.25 mW/m^2 (Wu *et al.*, 2025),如根据稳态或近似稳态测温曲线计算的长泰岩体热流值达 $80 \sim 105 \text{ mW/m}^2$,漳浦复式岩体热流值为 $70 \sim 100 \text{ mW/m}^2$ (图 2b)(黄昌旗等, 2018),HDR-1 干热岩钻孔大地热流值为 62.5 mW/m^2 ,东山樟塘、白塘湾等钻孔获取的大地热流值范围为 $47.1 \sim 65.3 \text{ mW/m}^2$ (蔺文静等, 2020; Lin *et al.*, 2023).

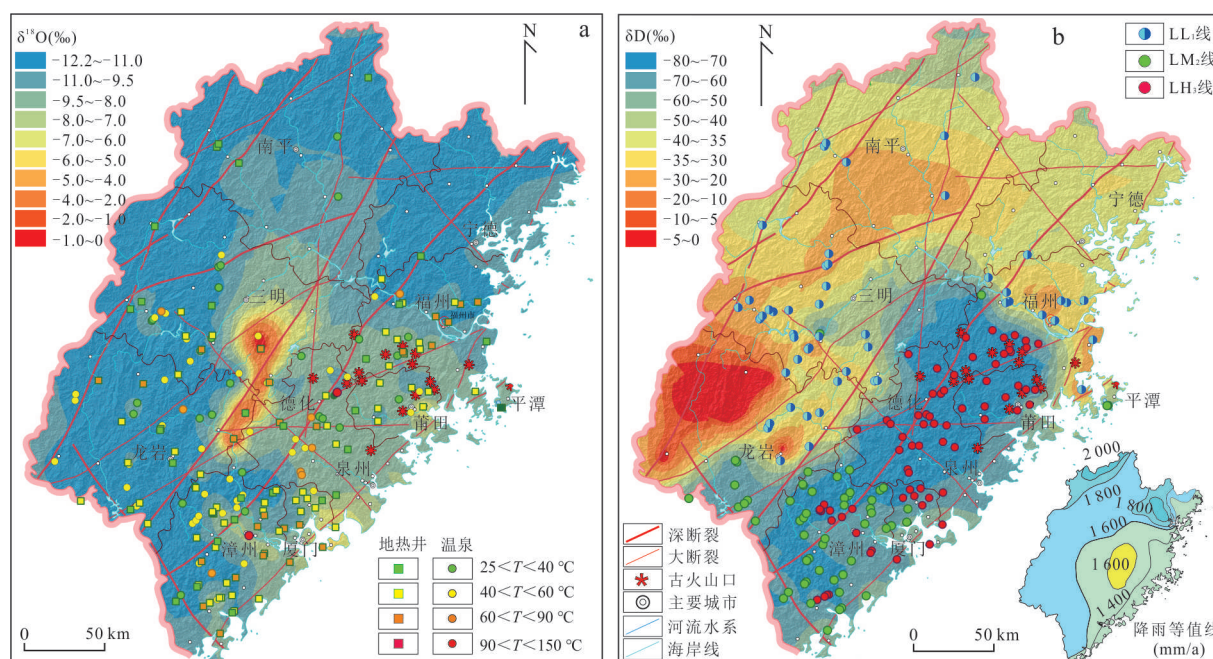
(2)岩石热导率.东南沿海为我国典型的岩浆岩放射性生热地热异常区,侵入岩中 U、Th、K 等放射性元素的衰变生热是区内地热系统的重要热源.赵平等(1995)研究统计发现,福建花岗岩生热率范

围为 $1.4\sim 4.4\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 平均为 $3.3\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 政和-大埔断裂西侧花岗岩生热率明显高于东侧火山岩出露区. 中生代中酸性岩浆岩和元古宙岩石生热率较高, 省内9个燕山期大型侵入岩体(图2b; 黄昌旗等, 2018)放射性生热率平均为 $4.62\ \mu\text{W}/\text{m}^3$; 德化-安溪长坑岩体生热率最高为 $5.65\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 其次为大坪岩体生热率达 $5.04\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 均相对高于全球花岗岩生热率平均值 $2.5\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 与李科甫和朱传庆(2023)统计的华南1933个花岗岩样品的生热率平均值 ($4.46\pm 2.66\ \mu\text{W}/\text{m}^3$) (范围为 $0.40\sim 17.45\ \mu\text{W}/\text{m}^3$) 相一致. 花岗岩体形成时代不同, 其生热元素丰度和生热率也有所差别, 区内加里东期岩石生热率较低, 燕山一期和燕山三期岩石生热率较高 ($6.4\ \mu\text{W}/\text{m}^3$) (图2e). 花岗岩体U、Th、K元素的放射性生热贡献率分别为49.45%、40.16%和10.39%, 大地热流与花岗岩生热率分布有着较好的对应关系. 省域中、新生代火山岩生热率在 $2.1\sim 2.8\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 最高达 $4.1\ \mu\text{W}/\text{m}^3$. 火山岩中粗面岩生热率最高, 凝灰岩(安山质过渡到流纹质)生热率多在 $2.0\sim 3.5\ \mu\text{W}/\text{m}^3$ 范围. 碱性玄武岩生热率多高于拉斑玄武岩, 如牛头山玄武岩生热率为 $0.75\ \mu\text{W}/\text{m}^3$. 沉积岩建造在晚元古代-寒武纪和侏罗纪出现两次生热率高峰, 碎屑沉积岩生热率集中在 $1.5\sim 3.0\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 碳酸盐岩灰岩与白云岩生热率总体低于 $1.0\ \mu\text{W}/\text{m}^3$. 变质岩建造混合岩、片麻岩、变质砂岩和糜棱岩生热率均超过 $2.0\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 角闪岩为 $1.4\ \mu\text{W}/\text{m}^3$; 元古代变质结晶基底隆起区局部岩体生热率超过 $6.0\ \mu\text{W}/\text{m}^3$.

漳州干热岩HDR-1井处地表出露的花岗岩(中等风化)放射性生热率在 $1.3\sim 7.0\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 平均为 $3.65\ \mu\text{W}/\text{m}^3$; 钻孔中弱风化花岗岩放射性生热率集中在 $1.67\sim 5.16\ \mu\text{W}/\text{m}^3$. 漳州其他不同钻孔内花岗岩放射性生热率在 $2.8\sim 4.3\ \text{mW}/\text{m}^3$, 略高于全球花岗岩放射性生热率平均值 ($2.05\pm 1.07\ \mu\text{W}/\text{m}^3$); 但福建东南沿海花岗岩放射性生热率都要低于粤北-赣南(南岭地区)花岗岩体(如广东惠州HR1地热井二长花岗岩生热率为 $4.39\sim 7.46\ \mu\text{W}/\text{m}^3$), 还不能称之为高产热花岗岩(HHPG, high heat producing granites). 漳州盆地99件非花岗岩样品(凝灰岩、熔结凝灰岩、泥岩、泥质砾岩、玄武岩、基性火山岩和基性岩脉等)放射性生热率在 $1.08\sim 4.73\ \mu\text{W}/\text{m}^3$, 平均为 $2.45\ \mu\text{W}/\text{m}^3$. 东南沿海晚中生代凝灰质火山岩与同时代花岗岩属于“同源异相”关系, 二者具有相同的成岩物质源区, 导致漳州地区凝灰岩与熔结凝

灰岩亦具有相对较高的放射性生热率(蔺文静等, 2024; Wu *et al.*, 2025). 李科甫和朱传庆(2023)研究发现, 华南沉积地层覆盖区地壳放射性生热对地表热流贡献为 $29.13\ \text{mW}/\text{m}^2$, 占总热流值的41.61%; 侵入岩展布区地壳放射性生热对地表热流贡献为 $43.85\ \text{mW}/\text{m}^2$, 占总热流值的51.76%. 庞忠和(1987)、林乐夫等(2017)、Lin *et al.* (2023)、蔺文静等(2024)和Wu *et al.* (2025)根据漳州盆地地热流体、岩体元素和同位素地球化学特征分析及模拟研究均发现漳州地区幔源热对总热流值的贡献率达60%以上, 放射性元素衰变生热贡献率则约为40%.

1.2.5 地热系统热储层与盖层 福建省地热流体主要赋存于侵入岩与火山岩、变质结晶岩风化裂隙、成岩和构造裂隙、断层破碎带、节理裂隙、岩浆岩与围岩接触带中, 热储类型以裂隙型带状-脉状为主. 闽西局部沉积断陷盆地(永安盆地等)存在新生代砂岩或砂砾岩、二叠系-石炭系碳酸盐岩层状热储, 但规模相对较小. 其他分区内地热系统盖层不发育或厚度空间异质性较强, 局部山间盆地地热系统的盖层主要由断陷盆地上覆沉积岩(沉积物)、火山岩或具备一定厚度的基岩风化壳构成. 东南地区沉积岩热导率平均值相对高于地壳火成岩系, 钙质、硅质和泥质矿物的含量是决定砂岩和泥岩热导率值高低的主要因素, 碎屑沉积岩类盖层在防止热量散失方面作用相对有限, 保温能力较弱(熊绍柏等, 2002; Wang *et al.*, 2013; Zheng and Luo, 2024). 不同于沉积盆地地热系统盖层的热聚敛保温“毛毯效应”, 闽东南拉分盆地凝灰岩等火山岩盖层的生热对地热系统的热量贡献相对较高, 且有利于基底热量的保存. 漳州盆地基底岩石和周边造山带出露岩样热导率为 $2.7\sim 3.4\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, HDR-1井岩样热导率为 $2.00\sim 4.25\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 漳州地招ZK8孔40.0~599.7 m段花岗闪长岩($n=29$)热导率平均为 $2.72\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$. 漳州盆地200 m以浅岩石热导率平均仅为 $2.7\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 上覆第四系龙海组、东山组、长乐组冲积、洪积和海积层可构成地热系统盖层. 福州盆地永泰一带花岗岩热导率在 $3.1\sim 3.3\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, 火山岩热导率为 $2.3\sim 3.0\ \text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; 德化南埕一带上覆火山岩热导率相对小于下伏花岗岩, 凝灰岩与凝灰熔岩一定程度上构成了地热系统的盖层, 较好地保存了深部花岗岩体的热量. 闽西南部分断陷盆地上覆细碎屑沉积岩、含炭泥岩与炭质页岩, 热导率相对较低, 可组成地热系统盖层.

图4 福建省地热温泉 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值空间分布Fig.4 Spatial distribution of $\delta^{18}\text{O}$ and δD values of geothermal water samples in Fujian Province

从地热流体 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值空间分布(图4a, 4b)来看,水样 $\delta^{18}\text{O}$ 在三明大田至龙岩华安一带,即靠近龙岩-泉州和三明交界分水岭的戴云山-博平岭与玳瑁山狭长山谷盆地内,地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对高异常,与浅层地下水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相近.导致 ^{18}O 重同位素富集的原因可能为浅层地下水补给贡献比例较高,与自组织神经网络聚类(self-organizing map, SOM)揭示的SW-III区地热水循环深度小、更新速率快相一致.水样 δD 低值区分布于(LM₂和LH₃线)福州东南、戴云山-博平岭以东,莆田、泉州、厦门和漳州地区.大气降水的 δD 值分布与大气降水的大陆效应、海拔效应和降水量效应密切相关,通常情况下自海岸线向大陆内部,大气降水 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均减小;随海拔的升高,雨水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均减小;随降水量的增大,其重同位素丰度相对减少,尤以热带与中纬度地区最为显著(Dansgaard, 1964; 赵永红等, 2017).福建中部戴云山-博平岭以西内陆地区,及闽东海拔较高、降雨量较大的福州-宁德地区地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 值相对较低而 δD 值相对较高,主要分布于LL₁线上.水样 $\delta^{18}\text{O}$ 值分布与大陆效应、海拔效应和降水量效应相一致,而 δD 值的分布与海拔和降雨量呈现出相反变化规律,与再循环大气水受水岩作用同位素交换,古大气降水、热储层古沉积水混合等的影响有关.研究表明,我国东南地区夏季和秋季降雨 δD 值从沿海向内陆递减(陈佳澄等, 2024).当水

汽从海洋向大陆内部输送时,沿途形成的降水重同位素先于轻同位素分离,导致云中的重同位素逐渐贫化,从而使得后续降水中的重同位素含量降低.此外,闽中戴云山-博平岭以东滨海地区降水受南亚、东亚季风驱动的深对流影响较大,来自海洋的暖湿气团重同位素丰度较低,其与内陆上空气团相遇、混合后会稀释降水中的重同位素(柳鉴容等, 2009).故此,闽东南沿海地区以大气降水为主要补给来源的地热水 δD 值均相对较小.

由于热储层造岩矿物中氢同位素丰度显著低于地下水,水岩交换作用对地热流体氢同位素的影响甚微(Craig, 1961).故此,地热流体与当地大气降水的氢同位素的丰度差异可归因于地热系统接受大气降水的补给区不同.闽东南地热水主要接受闽中戴云山-博平岭南麓大气降水补给,故该区水样 δD 相对较低.闽西地热水同时接受武夷山东麓与鹫峰山-戴云山-博平岭西麓大气降水补给,而福州北部经由闽江(断裂)与闽西北地区贯通(同属闽江流域),且闽西北海拔相对较高,降水量显著高于闽东南地区,是降雨重同位素先行分离的区域,故此处接受大气降水补给的地热流体 δD 值相对较高.在东南沿海,特别是海湾地区地热水中 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均有升高,与地热水接受海水补给有关.加拿大South Meager Creek地区地热水的氢同位素丰度明显低于当地大气降水, Ghomshei and Clark(1993)将这一异

常解释为其补给来源为更靠近内陆(远离海岸带)的大气降水. 闽东火山断拗带大部分地热水样 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值显著偏负, 且低于地表水样, 表明地热水补给区位于海拔较高的闽中戴云山-博平岭山区, 而不是源于当地大气降水的邻近补给, 其径流路径相对较长. 台湾岛宜兰地热井附近多望溪地表水氢氧同位素丰度比理论大气降水的同位素丰度更低, 地热水补给来源于高海拔地区大气降水补给产生的溪水(谢越宁等, 1986; 赵永红等, 2017). 闽江下游福州地区地热水表现出低 $\delta^{18}\text{O}$ -高 δD 特征, 与上游闽西南地区相一致, 表明其地热水补给来源于闽江上游大气降水汇流形成的地表水. 除受大气降水大陆效应与高程效应影响外, 地热水氢氧同位素的组成还受到滨海海水入侵补给动力学差异的制约. 福建 NE 向断裂在近海地区多呈现为右旋压扭性质, 而 NW 向断裂以张性走滑为主, 且永安-晋江断裂及其以北的断裂均表现右旋走滑性质, 九龙江下游断裂及其以南断裂均表现为左旋走滑性质(中国科学院地球物理研究所, 1992; 张健等, 2018, 2024). 福建滨海地区地应力水平变化以顺昌-闽清(沙县-南日岛)深断裂为界, 北部(福州北至宁德地区)为低应力区, 南部莆田、泉州、厦门至漳州地区为高应力区, 且南部大致以九龙江下游断裂开始, 地应力水平呈现由北向南逐渐降低的趋势(李冉等, 2016). 故此, 在地应力场作用下, NW 向张性断裂多为导水断裂, 为海水入侵补给混合通道; 而顺昌-闽清断裂以北地应力相对较小, 海水入侵进入内陆的距离相对小于断裂以南地区, 一定程度上也导致了政和-大浦断裂以东顺昌-闽清断裂两侧地热流体 δD 值的显著分异.

NW-I 区($n=21$)地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为 -11.2‰ 和 -31.1‰ , 全部位于 LL_1 线上. SW-I 区($n=8$)水样 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为 -11.51‰ 和 -52.38‰ , 其中地热井水样的 $\delta^{18}\text{O}$ 值显著偏低, 与其流体补给来源于海拔较高武夷山区内具有较低 $\delta^{18}\text{O}$ 值的大气降水有关. 而在大气降水入渗、增温和升流出露成泉过程中, 初始大气降水氢同位素与含水岩层变质作用产生的 H_2S 和 CH_4 发生部分氢同位素交换, 导致部分温泉样品 δD 值相对升高. 故此, SW-I 区内水样点在 LL_1 和 LM_2 线上均有分布. SW-II 区水样($n=16$) $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为 -11.38‰ 和 -46.12‰ , 大部分($n=10$)位于 LL_1 线上, 其余($n=6$)均位于 LM_2 线上, 其中三明水样 δD 值稳定在 $-35\text{‰} \sim -30.0\text{‰}$, 龙岩水样 δD 则集中在

$-69.0\text{‰} \sim -65.0\text{‰}$ 范围, 可能与地表水与浅层地下水对地热水的补给贡献较大有关. SW-III 区($n=11$) $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为 -11.16‰ 和 -35.4‰ , 均位于 LL_1 线上, 水体轻氧同位素(低 $\delta^{18}\text{O}$ 值)和重氢同位素(高 δD 值)相对富集. 闽西南为福建沉积地层分布最广泛的区域, SW-II 区/SW-III 区地热水径流过程中存在部分古沉积水的混入, 且由于碎屑沉积岩地层中含较多的 H_2S 、 CH_4 , 而高矿化度的古沉积水与含氢气体都相对富集 δD 同位素, 地热流体径流过程中与深部古沉积水的混合及与含水介质中 H_2S 、烃类(CH_4 等)的氢同位素交换作用, 会导致闽西南地热流体 δD 值升高(陈礼明, 2019). 闽西沉积断陷盆地(举岚盆地、大田盆地、将乐盆地等)坂头组与闽东南火山断陷盆地(永泰盆地、长泰盆地和同安盆地等)小溪组暗色泥页岩地层(陈廷东, 2018)内有机沉积物热变质生成的 CO_2 、 CH_4 等与地热流体同位素交换亦能导致地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对富集. 与此同时, SW-III 区 δD 平均值(-35.4‰)最为接近浅层冷水(-38.93‰)和大气降水, 表明其受浅层地下冷水混合影响相对最大, 地热水循环更新速率相对较快. 由于地下水快速更新, 水岩反应过程氧同位素交换时间不充分, 使得地热流体 ^{18}O 相对贫化, 与 SOM-KM 聚类簇分析结果相一致.

E-IV 区($n=99$)水样 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 平均值分别为 -10.05‰ 和 -69.2‰ , 福州和宁德地区水样 δD 值相对较高, 落在 LL_1 线上, 而莆田、泉州、厦门和漳州水样均分布于 LM_2 和 LH_3 线上(图 3a). 温泉($n=42$)样点均分布于 LM_2 和 LH_3 线上. 沿海低降雨量地区地热水主要接受闽中戴云山-博平岭东麓大气降水补给. E-IV 区地热水具有相对较低的 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值, 可能与流体循环过程中经历了与 CO_2 的同位素交换, 或升流过程中存在古大气降水与火山蒸汽水的冷凝混入有关(祁士华, 2021; Temizel *et al.*, 2021). 地热井水样靠近浅层地下水, 部分位于大气降水线右上侧, ^{18}O 相对富集. 造成 ^{18}O 明显漂移的原因可能为: ①地下水补给高程高, 循环深度深, 高程效应导致 ^{18}O 明显向右偏移; ②地热水滞留时间较长, 流体与矿物发生 ^{18}O 交换; ③地热水受安山岩-英安岩内生水混合作用影响, 由于内生水相对贫 ^{18}O 和 D, 使得混合后的地热流体 ^{18}O 向右偏移. E-V 区($n=33$)地热水样 $\delta^{18}\text{O}$ 范围为 $-11.5\text{‰} \sim -5.0\text{‰}$ (平均 -8.81‰), δD 范围为 $-73.0\text{‰} \sim -19.0\text{‰}$ (平均为 -58.2‰), 轻氢同位素(低 δD 值)相对富集, 除个别

水样(FP15)位于LL₁线上外,大部水样点分布于LM₂和LH₃线上.在闽东火山拗陷带同一集水流域内,E-V区水样 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值均相对高于E-IV区,与其受海水混合影响有关.空间分布上,E-IV和E-V区内漳州水样点大部分分布于LM₂线上,与已有研究证实的漳州盆地地热水补给来源为闽中山脉东麓大气降水相一致(庞忠和,1987);仅长泰岩体与漳浦复式岩体(图2c)热储层内部分水样点分布于LH₃线上, ^{18}O 和D重同位素相对富集,可能与侵入岩内流体存在与高温岩石黏土矿物的同位素交换及侵入岩流体包裹体内生水的混入有关,而火山岩热储层内地热水则一定程度受到了安山岩-英安岩内生水的混合影响(Li *et al.*, 2018b).大多数花岗岩、变质岩和沉积岩比地幔($\delta^{18}\text{O}=5.7\text{‰}\pm 0.3\text{‰}$)含有更高的 $\delta^{18}\text{O}$ 值,而海水和大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 相对亏损.流体包裹体破裂释出的内生 H_2O 、 CH_4 和 CO_2 会导致侵入岩热储层内地热水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 相对富集(赵永红等,2017;Li *et al.*, 2018b).相近地区粤东黄沙洞地热田研究证实,花岗岩流体包裹体可能是中低温 HCO_3^- -Na型低盐高钠地热水中 Na^+ 的主要来源,断裂和花岗岩裂隙层面及其附近的流体包裹体破裂提供了平均83%的 Na^+ (史自德等,2024).

闽东地热水循环深度与温泉出露温度相对高于闽西地区,部分水样 δD 接近 $-20\text{‰}\pm 10\text{‰}$ (安山水),介于标准海水(0‰)与大气降水之间.研究区位于西太平洋俯冲带上,而在板块汇聚边界地区地热水氢氧同位素多呈现出“安山水”与当地大气降水的混合特征(Giggenbach, 1992).台湾岛典型高温地热水样(热储温度达 260°C)点即分布于台湾岛本地大气降水线右上区域(图3b),地热流体补给来源呈现出俯冲作用火山蒸汽、安山水与大气降水混合特征(谢越宁等,1986;Liu *et al.*, 1990).与台湾岛岩浆热源型地热水相比,闽东火山断拗带地热水以中低温为主, ^{18}O 和D漂移相对较小,未见水样点分布于俯冲作用火山蒸汽和岩浆水端元内(图3b),“安山水”混合与高温水岩作用对同位素分馏的影响明显弱于岩浆热源型地热水系统,由此也印证了福建省地热系统热聚敛过程中无岩浆热源贡献.厦门地区及广东神灶海上温泉(Liu *et al.*, 2022, 2025; Tian *et al.*, 2023)气体组分研究亦表明,东南沿海地热温泉气体组分与西南高温地热系统存在显著差异,具有深大断裂带并沟通地幔或壳内熔融岩浆作为直接热源的可能性极低.

3.1.2 地热水补给区高程 根据水体 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 分布的高程效应可以确定地热水的补给高程,具体计算方法如下(Li *et al.*, 2018a; 祁士华, 2021):

$$H = \frac{\delta\text{G} - \delta\text{P}}{k} \times 100 + h, \quad (1)$$

其中, H 为地热水补给区高程(m); δG 为地热水的 δD 或 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰); δP 为取样点附近大气降水的 δD 或 $\delta^{18}\text{O}$ 值(‰); k 为同位素高度梯度($\delta/100\text{ m}$); h 为水样取样点高程(m).

鉴于福建全域地热水样存在3条 δD 与 $\delta^{18}\text{O}$ 关系拟合线,在计算地热水补给区高程时,取 δD 高程效应梯度值为 $-2.0/100\text{ m}$,位于LL₁线水样点取大气降水 δD 值为 -29.0‰ ,位于LM₂和LH₃线上水样点则取大气降水 δD 值为 -51.15‰ .经计算,NW-I区地热水补给区高程为 $84.3\sim 1\,117.3\text{ m}$,平均为 535.2 m .SW-I、SW-II和SW-III区地热水补给区高程分别为 $868.8\sim 1\,482.1\text{ m}$ (平均 $1\,245.3\text{ m}$)、 $460.5\sim 1\,223.2\text{ m}$ (平均 832.8 m)和 $186.3\sim 1\,425.8\text{ m}$ (平均 626.5 m),与武夷山东麓连城冠豸山(666.1 m)、玳瑁山高峰石门山狗子脑($1\,811\text{ m}$)—梅花山($1\,778\text{ m}$)—庙金山($1\,755\text{ m}$)、龙岩岩顶山($1\,807\text{ m}$)与小戴云山($1\,713\text{ m}$)相一致.SW-III区内永安盆地地热水补给高程相对最低;E-IV区地热水补给高程为 $64.5\sim 2\,149.5\text{ m}$,平均为 $1\,248.1\text{ m}$;E-V区则为 $43.4\sim 1\,216.3\text{ m}$,平均为 643.9 m ,相对低于E-IV区.闽东地热水系统补给区为闽中九峰山—戴云山—博平岭山脉,其中鹭峰山主峰海拔 $1\,822\text{ m}$,戴云山高峰海拔 $1\,856\text{ m}$,其他高峰为石谷解($1\,803\text{ m}$)、石牛山($1\,781\text{ m}$)、东湖尖($1\,682\text{ m}$),漳州区内高峰为大芹山($1\,545\text{ m}$)及灵通山($1\,282\text{ m}$),与计算获取的E-IV区及E-V区补给区高程总体一致.另外,E-V区平潭FP15、FP16和FP17点,漳州诏安湾ZZ93样点补给高程低于海平面,出现“反重力”现象,这可能与深部地热流体温度、盐度、黏度与密度变化,压实势与构造挤压应力提供的额外增大的压力水头——“地热驱动力”有关,使得地热水出露水位可超出补给水位(叶建桥和毛绪美,2024).SOM-KM聚类第I₁~I₆组地热水样补给区高程平均为 $1\,060.5\sim 1\,372.9\text{ m}$,集中在 $1\,208.6\sim 1\,230.3\text{ m}$ 范围.II₁与II₂组水样平均补给高程分别为 333.09 m 和 193.25 m ,均相对较低.III₁与III₂组地热水补给高程分别为 $84.32\sim 1\,010.60\text{ m}$ (平均 452.6 m)和 $186.3\sim 415.9\text{ m}$ (平均为 331.8 m).

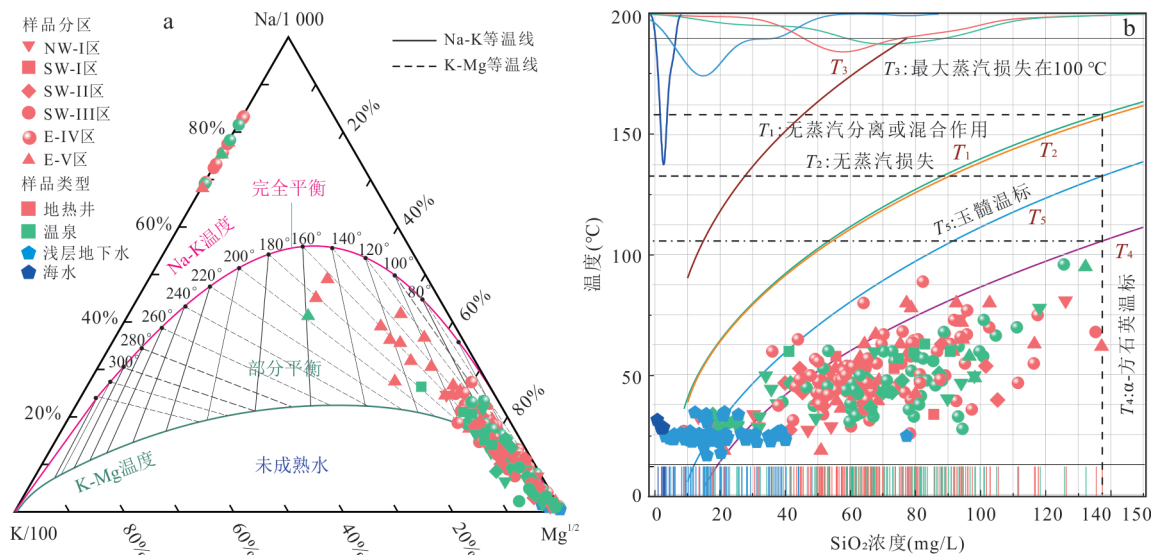


图 5 福建省地热温泉流体 Na-K-Mg 三线图和二氧化硅温标热储温度估算结果

Fig.5 The Na-K-Mg triangular diagram of geothermal water and the temperature of geothermal reservoir estimated by different SiO₂ geothermometer in Fujian Province

3.2 热储温度

地热温标法是获取热储温度应用最为广泛的方法,常用的地球化学温标有二氧化硅、阳离子、同位素、多矿物平衡温标等(祁士华,2021).通过 Na-K-Mg 三元图解(Giggenbach, 1988)可以看出(图 5a),除部分 E-V 和 E-IV 区水样及 NW-I 区个别样品水岩作用达到部分平衡,位于 Na-K 等温线 120~190 °C 区间和 K-Mg 等温线 80~160 °C 区间外,大部分地热温泉为未成熟水(Na-K 等温线 80~150 °C 和 K-Mg 等温线 60~100 °C 区间).E-V 和 E-IV 区水样点有向完全平衡区靠近趋势,表明其循环深度、水岩作用成熟度和热储温度均相对高于闽西南和闽西北地区.SW-III 区永安盆地等区域地热水水岩作用成熟度相对最低,尚处于水岩作用初期阶段,受浅层地下冷水混合影响相对最为显著.钾长石与白云母达溶解沉淀平衡是热储层水-岩相互作用达到完全平衡的标志(Giggenbach, 1988; Li *et al.*, 2018a)和阳离子温标适用的基础.根据硅铝酸盐矿物稳定场,研究区仅 SOM 第 I 组部分高温地热母流体钾长石与白云母达平衡状态.控制地热流体中 Na⁺、K⁺ 活度比值的矿物主要为低钠长石和微斜长石,而在低于 180 °C 条件下,Na⁺、K⁺ 活度比值与温度明显相关,Na-K 温标相对不适用.研究区水热蚀变矿物稳定端元指示冷水混入前地热母流体温度集中在 100~180 °C,钾长石与云母未达水岩作用完全平衡状态,加之第 II 组地热水存在海水混合等

因素影响,阳离子温标法应用存在局限.已有研究(庞忠和,1987;Lin and Yin, 2022)亦表明 SiO₂ 温标是估算福建地区地热热储温度较为适用的方法.

福建省温泉泉口温度一般低于区内热水沸腾温度,地热水的升流过程以传导冷却过程为主,基本无绝热冷却水蒸气损失.由石英温标(无蒸汽损失)计算(Fournier, 1973; Fournier and Truesdell, 1977)统计可知(图 5b),NW-I 区热储温度为 85.3~146.9 °C,平均为 117.3 °C;SW-I、II、III 区热储温度范围分别为 93.5~138.8 °C(平均 123.2 °C)、59.2~153.6 °C(平均 110.9 °C)和 60.2~133.8 °C(平均 104.6 °C),其中福州闽侯荆溪镇地热井(FZ05,井口温度 62 °C)热储温度最高达 155.92 °C.SW-III 区永安盆地热储温度平均值相对最低,但局部存在碎屑沉积岩盖层的砂岩-碳酸盐岩热储层热储温度超过 150 °C,如三明大田县太华镇汤泉(SZ143,泉口温度 81 °C)和永安洪田镇贵湖村地热井(SZ146,井口温度 68 °C)热储温度分别为 150.77 °C 和 155.06 °C.热储温度较高点位于闽中地幔坳陷带向闽西北地幔隆起带过渡区上的永梅坳陷带内,即永安-晋江大断裂向西北延伸段,居里面埋深剧烈变化、莫霍面埋深和地壳厚度较大处(图 2f).热储温度估算表明,福建省中生代以来断陷沉积盆地内碳酸盐岩热储层地热亦具有一定的开发利用潜力.地热地质条件相近的北部湾白垩世和新生代叠合断陷盆地地热系统的盖层主要由中新世地层组成,热储层则由古近系砂岩

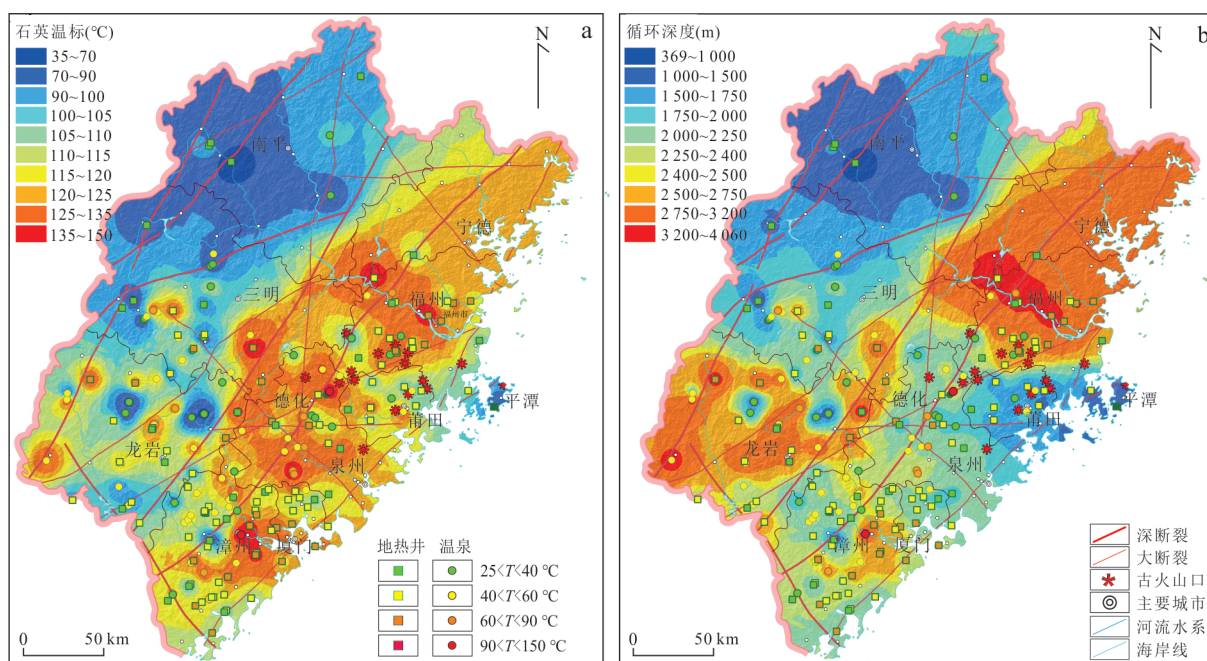


图6 福建省地热温泉热储温度(石英温标)与循环深度空间分布

Fig.6 Spatial distribution of geothermal reservoir temperature (Quartz thermometer), and circulation depth of geothermal water in Fujian Province

和上古生界碳酸盐岩、燕山期花岗岩或下古生界变质岩组成,其3 000~6 000 m深处的地热储层温度范围可达120~210 °C(Zheng and Luo, 2024).E-IV区地热热储温度为33.5~155.1 °C,平均为116.5 °C;E-V区热储温度为58.5~155.9 °C,平均为116.3 °C.泉州德化塔兜地热井(水温86~96 °C)热储温度为150.54 °C,漳州地震台水化观测井(ZS115, 95 °C)热储温度计算值为153.64 °C,其他地热水样点热储温度计算值均小于150 °C.

空间分布上(图6a),研究区仅存在5处地热水样点石英温标(无蒸汽损失)热储温度高于150 °C.热储温度高异常区主要为断陷盆地中部(漳州盆地、福州盆地)和NE向与NW向断裂交汇部位,特别是福安-南靖深大断裂(F_3)与永安-晋江深大断裂(F_9)交汇处安溪-德化-永泰沿线,以及福安-南靖深大断裂(F_3)与顺昌-闽清深断裂(F_7)交汇处长乐-闽侯-闽清沿线.福州地热田地热井口最高温度为97 °C,据石英温标确定的热储温度在123~131 °C(Huang and Goff, 1986).庞忠和(1987)、庞忠和等(1990)通过地热储层矿物蚀变研究发现,漳州地热田的热储温度可能不高于150 °C.地热田热水蚀变矿物早期以绿帘石-绿泥石和浊沸石-蒙脱石为主,近期有蛋白石形成,佐证了漳州盆地地热田古热储温度由260 °C到140 °C再到180 °C的演变过程.蔺文

静等(2020)、Liu *et al.*(2022)确定的厦门地区地热热储温度为101~145 °C,厦门湾-漳州盆地典型温泉石英温标热储温度为106.5~142.7 °C(最高处为黄坑温泉),多矿物平衡曲线亦多收敛于130~160 °C之间.甘浩男(2023)、Yuan *et al.*(2024)通过石英温标确定的南靖-漳州盆地和闽东南沿海地热热储温度分别为106~148 °C和75~140 °C,与本次研究确定的地热热储温度范围总体相一致.东南沿海地热异常区内, Lin and Yin(2022)确定的华南地区典型地热田热储温度主要集中在111~145 °C,与广东龙门岩溶热储温度101.5~148.0 °C相近(王思佳等, 2024);而惠州黄沙洞地热田热储温度为108.6~161.3 °C(史自德等, 2024)或150~165 °C(Tian *et al.*, 2023; Xiao *et al.*, 2023),略高于福建省地热热储温度.

3.3 海水混合与冷热水混合

3.3.1 冷热水混合特征 根据硅-焓模型(Rybach and Muffler, 1987; Li *et al.*, 2018a)可以分析地热母流体升流过程中与浅层冷水的混合状况,并获得冷水混入前深部流体的初始温度.福建省地热温泉的升流过程以传导冷却过程为主,适宜于应用硅-焓模型.以浅层地下水温度和 SiO_2 浓度平均值($T=20$ °C, SiO_2 质量浓度为14.0 mg/L)为冷水端元,不同温度地热流体相应的焓值通过国际蒸汽表(Wagner and Kretschmar, 2008)获取,不同水化学

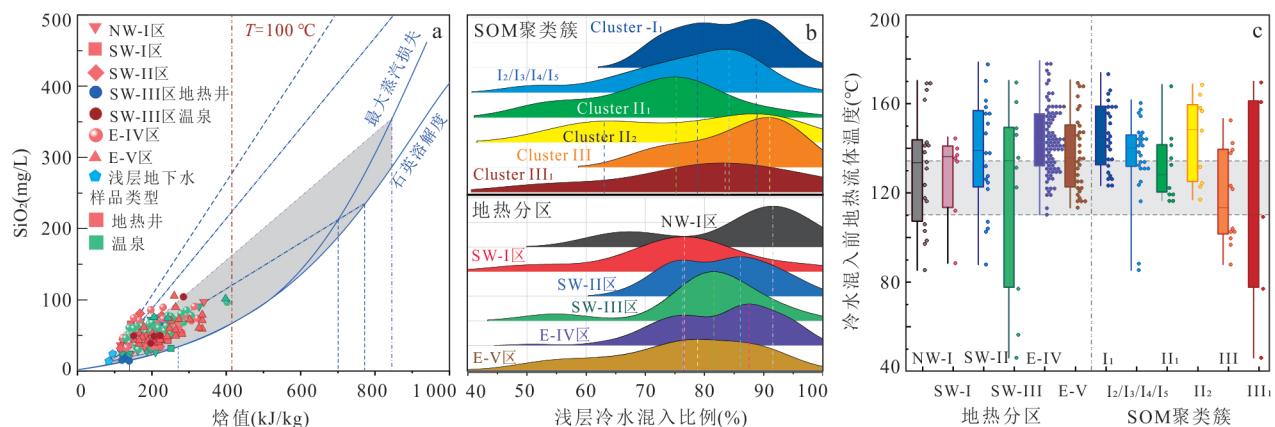


图 7 福建省地热温泉硅焓模型估算的地热流体冷水混入比例及混入前温度

Fig.7 The proportion of shallow cold groundwater mixing with deep parent geothermal fluid, and the temperature of deep parent geothermal fluid estimated by silicon-enthalpy model in Fujian Province

分区和 SOM-KM 聚类簇水样冷水混入比例及混入前地热母流体温度统计结果见图 7。

NW-I 区地热流体循环过程中冷水混入比例相对最高(61.48%~97.46%),平均达 84.78%,混入冷水前地热母流体温度为 85.8~170.7 °C(平均为 131.2 °C)。水样点冷水混入比例分布曲线(图 7b)存在 2 个峰值,混合前热储温度存在 4 处高异常点(>160 °C),与三明大田-永安与龙岩存在几处相对高温地热点有关(73.5~81.0 °C)。SW-I、II、III 区地热流体循环过程中冷水混入比例分别为 51.1%~95.9%(平均 75.4%),68.3%~97.3%(平均 82.9%)和 54.8%~93.5%(平均 80.3%),混入冷水前地热流体温度分别为 88.9~145.4 °C(平均 128.5 °C)、88.3~178.9 °C(平均 137.2 °C)和 46.5~170.7 °C(平均 120.5 °C)。SW-III 区冷水混入前热储温度低值点分布集中(图 7c),平均值相对最低,冷水混入比例分布相对最为集中(图 7b)。E-IV 区地热流体中冷水混入比例为 51.2%~97.3%,平均为 82.9%;冷水混入前热储温度为 110.5~179.6 °C,平均达 144.3 °C,在不同分区中相对最高。冷水混入比例分布曲线存在 2 个波峰,与区内热储温度空间分异较为明显有关,热储温度高值区沿 NW 向断裂控制的滨海断陷盆地和断陷海湾呈带状分布,而冷水混入比例较大水样点亦主要沿闽江、晋江、九龙江等地表水系分布。粤东榕江地区地热研究亦揭示了地表水补给对地热流体循环的显著影响,富水(5 760 m³/d)花岗岩裂隙储层内地热流体是深、浅层地下水中地热母流体与榕江水入渗补给的混合物(Luo *et al.*, 2022)。E-V 区地热流体升流过程中冷水混入比例

为 50.5%~92.5%,平均为 76.3%;冷水混入前流体温度为 113.8~170.9 °C,平均为 138.5 °C,相对较低。E-IV 区、E-V 区地热水升流过程中明显受海水混合影响,但冷水混入比例计算结果相对较低。E-IV 区,可能与海水和地热流体的混合区域位于海水入侵咸淡水界面以下,海水以热咸水形式混入地热水系统有关(汪啸, 2018; Zhou *et al.*, 2023),如 Zhou *et al.* (2016)通过数值模拟解析发现,广西南部北海市附近西北海岸的海水入侵淡水与咸水界面深度范围达 471~478 m。

SOM-KM 聚类第 III 组(除 III₁ 以外)及 III₁ 组水样冷水混入平均比例分别为 85.6% 和 80.23%,明显高于其他聚类簇。冷水混入前热储温度平均值分别为 118.6 °C 和 113.4 °C,在不同聚类簇中相对最低,第 III 组水样为循环深度较浅、更新速率快、受浅层冷水混合影响较大地热水。第 I₁ 组水样冷水混入比例为 69.1%~95.9%(平均 82.8%),冷水混入前热储温度为 123.7~174.2 °C,平均达 145.8 °C(图 7c),在不同聚类簇中相对最高。漳州盆地、福州盆地内中高温富磷富硅高氟地热流体升流过程中受闽中鹞峰山-戴云山-博平岭东麓浅层地下水补给混合影响相对较大,但由于火山断拗内地热水循环深度较大、热储温度相对较高,地热水沿断裂深循环升流出露时仍具有相对较高的温度。第 I₂/I₃/I₄/I₅ 子类水样冷水混入比例为 51.1%~94.5%(平均为 77.1%),冷水混合前热储温度平均达 136.9 °C;升流过程中受冷水混合影响较小的地热水具有较高的水温、pH、F⁻ 和 Rn 浓度。第 II₁ 组高矿化度海水混合地热流体冷水混入比例为 54.1%~90.9%,平均

为71.62%,在不同聚类簇中相对最低;冷水混入前热储温度为116.7~168.9℃,平均为132.7℃,介于第I组与第III组之间.受海水混合影响较大的地热流体升流前冷水混入比例相对较低,一方面与海水密度导致的热焓值差异有关,另一方面与海水与地热流体的混合区域及补给海水的温度(硅焓值)有关,海水可能以高焓高矿化度热咸水形式由深部(咸淡水界面以下)混入升流地热流体中(Lu *et al.*, 2017; Wang *et al.*, 2018).滨海断裂深循环地热系统的流体对流循环受到重力,以及水体密度、黏度差异产生的浮力驱动,并受地球固体潮水-构造地应力共同影响.故此,滨海地热系统的海水补给混合位置可能在断层破碎带高温低密度区,海水在补给混入前已具备一定温度,导致硅-焓模型计算的滨海地热水样点冷水混入比例相对偏低.

3.3.2 海水混合特征 根据地热流体水化学SOM-KM聚类分析结果,第II组($n=24$)样品为高TDS(总溶解性固体, total dissolved solids)浓度的咸水和盐水,水化学类型为Cl-Na·Ca和Cl-Na型,空间上均分布于NW向断裂控制的沿海断陷盆地和断陷海湾-莆田平原-兴化湾、泉州平原-泉州湾、厦门杏林湾-漳州盆地-东山湾、诏安平原-诏安湾等地区,水样TDS、 Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 Sr^{2+} 、 Li^{+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 、 Br^{-} 、 I^{-} 、TFe和 HBO_2 浓度均显著高于其他聚类簇样品,笔者推测其为古沉积水-海水补给混合型地热水.盆地深循环古沉积水-海水补给Cl-Na型与侵入岩-火山岩建造断裂深循环 HCO_3^{-} -Na和 HCO_3^{-} -Na·Ca型流体的混合作用,导致了Cl-Na·Ca型地热水的形成.地热流体组分物源解析正定矩阵分解PMF(positive matrix factorization)模型(孙厚云等, 2025b)亦表明,海水补给分别贡献了省域地热流体82.54%、71.59%和63.97%的 SO_4^{2-} 、 HBO_2 、 Li^{+} , 59.56%、50.46%、52.74%、41.04%和37.22%的 Na^{+} 、 K^{+} 、 Sr^{2+} 、 Br^{-} 和 Cl^{-} .由第II组样点流体特征阴离子的空间分异可知,闽东沿海海水补给地热水的通道为NW向的导水深大断裂(上杭-云霄深断裂、永安-晋江和顺昌-闽西大断裂),由海岸线沿断裂往西北方向,海水混合补给地热水比例逐渐减小.相对远离海岸带的漳州盆地深部地热流体循环演化也受到了海水补给混合影响,漳州盆地周缘中低山丘陵经盆地内残丘台地至盆地中部平原区,阴离子由以 HCO_3^{-} 、 HCO_3^{-} - Cl^{-} 为主过渡到以 Cl^{-} - HCO_3^{-} 、 Cl^{-} 为主(庞忠和, 1987).

在SOM-KM和PMF源解析指示基础上,进一步通过特征离子比值关系、 Cl^{-} 与 Cl^{-} - δD 混合模型估算海水补给对第II组样品的具体贡献.通过不同水体 $\gamma(\text{Br}/\text{Cl})$ 比值可以指示海水混合对地热水循环的影响,海水与石盐的 $\gamma(\text{Br}/\text{Cl})$ 特征值分别为 3.47×10^{-3} 和 1.0×10^{-3} .水体 Cl^{-} - Br^{-} 关系图(图8a)中 $\gamma(\text{Br}/\text{Cl})=3.47 \times 10^{-3}$ 线为海水稀释线,靠近该线水样可被认为受到了海相盐源水混合的影响,而 $\gamma(\text{Br}/\text{Cl})$ 值低于 1.0×10^{-3} 线时则说明其形成受非海相蒸发盐溶解作用控制(徐钊一鸣和卢国平, 2017; Temizel *et al.*, 2021).大部分E-V区及部分E-IV区地热井水样品靠近海水稀释线,地热水循环受到了海水混合影响(图8a).SW-II区2处泉点位于海水稀释线上,可能与海相沉积岩中古海水混入有关;E-IV区部分水样位于石盐溶解线以下,可能与火山岩粒间孔隙/空隙中盐或流体、矿物颗粒中的包裹体、暗色矿物黑云母和角闪石中固定的 Cl^{-} 或以 F^{-} 或 OH^{-} 的类质同象形式存在的 Cl^{-} 在水岩作用过程中的溶解释放有关(Li *et al.*, 2018b).海水 $\gamma(\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-})$ 特征比值为0.86,离子以 Cl^{-} 为主(约19 000 mg/L),其次为 SO_4^{2-} (约2 700 mg/L),结合水化学 $\gamma[(\text{Na}^{+}+\text{K}^{+})/\text{Cl}^{-}]$ 和 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^{-})$ 关系能反映出大气降水、水岩作用(矿物溶解与阳离子交换吸附)和海水混合对流体 Na^{+} 、 K^{+} 和 SO_4^{2-} 输入的影响(孙厚云等, 2025a).根据图8b可知, SOM-KM第II组样品均位于C区, $\gamma(\text{Na}^{+}/\text{Cl}^{-})$ 比值接近0.86,样点均位于 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^{-})$ 值1:1线以下,地热流体水化学形成演化受海水补给混合控制.

通过地热流体补给端元海水与浅层地下水的 Cl^{-} 浓度特征值,可以估算海水补给对地热流体的贡献.取厦门海域海水样品 Cl^{-} 浓度为17 100 mg/L,浅层地下冷水采用基岩山区浅层地下水 Cl^{-} 浓度平均值17.90 mg/L.经计算, SOM-KM第II组水样中, E-IV区福州盆地FZ01和FZ209(福州连江县岱云村钻孔)与漳州ZP105(龙海新塘钻孔)点海水混入比例分别为0.77%、0.77%和0.71%,其他样点地热流体中无海水混入. E-V区89.19%水样($n=33$)受到海水补给影响,混入比例在0.20%~99.28%之间.其中莆田南溪PZ36、漳州漳浦ZP107和云霄ZZ93点海水混入比例分别为99.28%、94.40%和74.37%,厦门翔安浦边XP71、翔安大嶝XP70和集美园博园XZ68,以及福州福清沁前FP15点海水混入比例

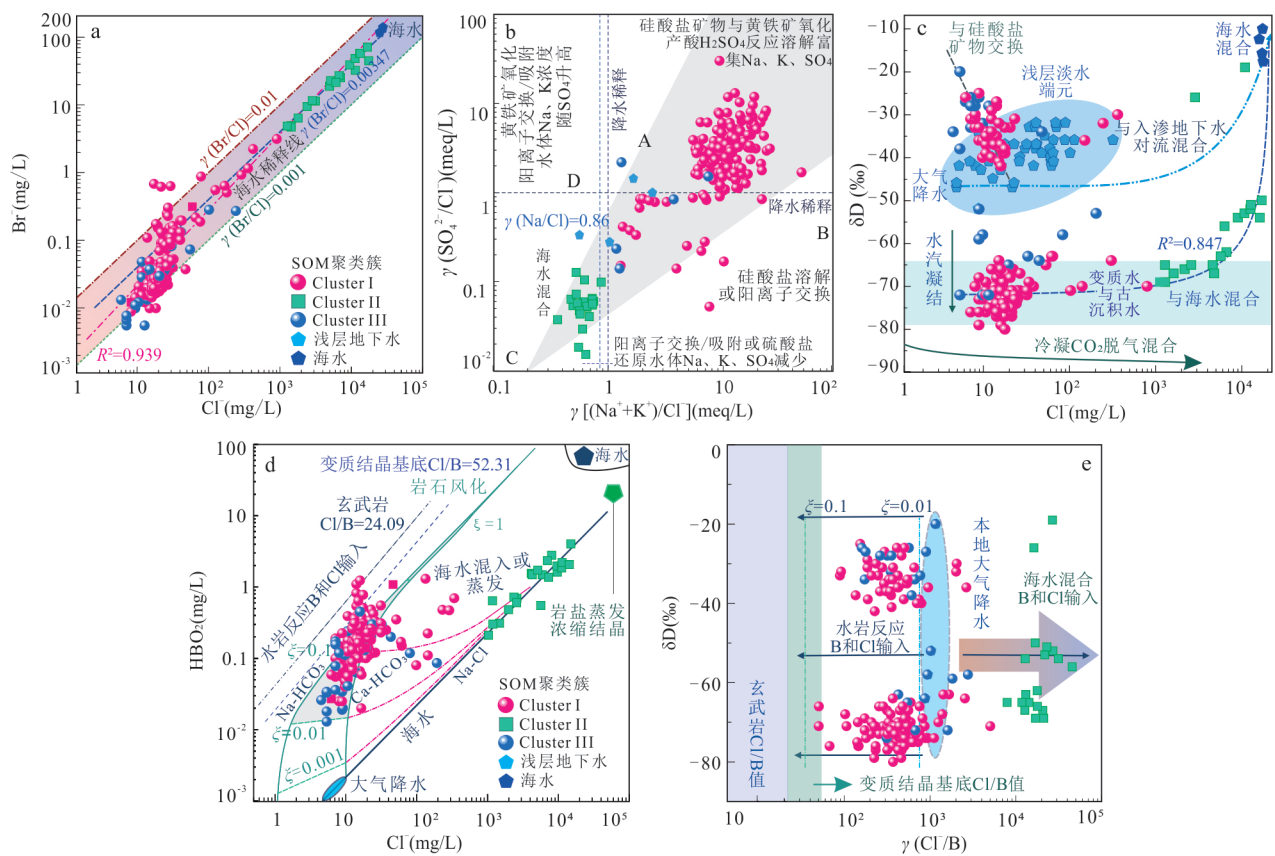


图 8 福建省地热温泉流体水化学 Cl^- 与 Br^- 、 $\gamma[(\text{Na}^++\text{K}^+)/\text{Cl}^-]$ 与 $\gamma(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 、 Cl^- 与 δD 、 Cl^- 与 HBO_2 、 $\gamma(\text{Cl}^-/\text{B})$ 与 δD 相关关系
Fig.8 Relationships between Cl^- vs Br^- 、 $\gamma[(\text{Na}^++\text{K}^+)/\text{Cl}^-]$ vs $\gamma(\text{SO}_4^{2-}/\text{Cl}^-)$ 、 Cl^- vs δD 、 Cl^- vs HBO_2 and $\gamma(\text{Cl}^-/\text{B})$ vs δD of geothermal fluid in Fujian Province

分别为 73.34%、62.56%、52.41% 和 63.33%，其余点海水混合贡献均小于 50%，与 Liu *et al.* (2022) 估算的厦门湾地热水海水混合贡献 73.20%、泉州湾地热水海水混合贡献 9.13%~10.76% 相一致。

在仅考虑流体机械混合情况下，地热水中非反应组分 Cl^- 、 Br^- 等的质量浓度与海水的混入量呈线性正相关关系，接受大气降水与海水补给的地热流体 Cl^- 与 δD 亦多呈线性正相关关系，故此可以通过 Cl^- - δD 关系估算滨海地热水接受海水补给的贡献 (Bath and Williamson, 1983; 庞忠和等, 1990)。由于省域内陆地热流体仅由山地大气降水补给，而滨海地热流体经历了海水补给-大气降水入渗补给两次混合过程，使得流体 Cl^- - δD 与 $\gamma(\text{Cl}/\text{B})$ - δD 亦呈现出两组分异明显的拟合关系 (图 8c)。LL₁ 线上水样点 Cl^- 浓度总体与 δD 呈负相关关系，其中 SW-III、NW-I 和 SW-II 区相关系数分别达 0.848、0.751 和 0.776 ($P<0.01$)，显示出显著的浅层地下冷水混入特征，部分地热水 δD 组成也受到了与水合硅酸盐矿物及 H_2S 氢同位素交换的影响。LM₂ 和 LM₃ 线上

SW 和 NW 区，及 E-IV 区水样点 Cl^- 与 δD 无显著相关关系，海水混合、蒸发作用对区内地热流体循环演化的影响相对较小。E-IV 区水样点较为集中分布于大气降水与浅层地下水样点下部，呈现出火成岩矿物流体包裹体及火山机构内生水-断裂深部升流母流体特征，具有相对较低的 δD 值。LL₁ 和 LM₃ 线上 E-IV 与 E-V 区水样 Cl^- 与 δD 的线性正相关系数分别为 0.575 和 0.240 ($P<0.01$)。地热水中 $\delta^{18}\text{O}$ 因“氧漂移”而升高，而 δD 受变质水、古沉积水与海水混合盐度效应 ($\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 同步升高) 影响相对富集。SOM-KM 第 II 组水样 Cl^- 与 δD 线性正相关系数达 0.847 ($P<0.01$)，海水混合盐度效应使得地热流体 δD 和 Cl^- 同步富集，印证了第 II 组水样为海水补给混合型地热水。Stefánsson *et al.* (2019) 在研究冰岛玄武岩地区地热流体物质来源时，通过玄武岩浸溶实验特征 $\gamma(\text{Cl}/\text{B})$ 值 (ξ 表示每升水溶解的玄武岩质量，kg/L)、海水 (Cl/B 摩尔比为 1 300) 与大气降水特征 Cl/B 值建立了地热水 B 和 δD 来源混合质量平衡模型 (图 8d, 8e)，用以定量描述地热水化学组分

受水岩作用、大气降水补给、海水混合影响程度.结合PMF物源解析结果可知,SOM-KM第I组和III组水样B和C1主要来源于水岩作用输入(等效溶解玄武岩质量在0.01~0.10 kg/L),第II组水样均位于大气降水与海水混合线上,B和C1主要由海水补给混合贡献.

由本地大气降水 δD 和 $\delta^{18}O$ 关系线获取的淡水端元 δD 特征值为 -72.84‰ ,以厦门集美湾海水 δD 值 -7.0‰ 为海水端元 δD 特征值,通过以下公式估算地热流体中海水的混入比例.

$$P_{\text{mix}}(\text{fresh/sea}) = \frac{\delta D_{\text{sea}} - \delta D_{\text{mix}}}{\delta D_{\text{mix}} - \delta D_{\text{fresh}}} \times 100, \quad (2)$$

其中, δD_{mix} 、 δD_{fresh} 和 δD_{sea} 分别为地热水样、淡水端元和海水端元的 δD 值.经计算,SOM-KM第II组水样中,E-V区内福州、莆田和泉州湾、厦门滨海地热流体中海水混入比例分别为22.54%~81.77%、8.87%~34.69%和5.83%~31.65%(平均为18.36%);漳州地区地热流体中海水混入比例为1.28%~33.17%(平均为13.32%),与庞忠和(1987)计算的漳州地下热水海水的最大混入量在35%~40%之间相一致.流体密度差形成的压力场使得侵入内陆的海水在水动力作用下有条件进入地下深层部位,进而混入地热水循环区域,使得地热流体盐度增高.

3.4 地热水循环深度

研究区热储属中低温热储层,地下水热量来源主要为地热增温,可根据地温梯度估算地热水的循环深度(Li *et al.*, 2018a; 祁士华, 2021).

$$H = \frac{T_r - T_0}{t} \times 100 + h_0, \quad (3)$$

其中, H 为地热水循环深度(m); T_r 为热储温度($^{\circ}\text{C}$); T_0 为恒温带温度, t 为地温梯度($^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$), h_0 为恒温带深度.根据不同地热分区地质条件,年平均气温 T_0 取 $21\text{ }^{\circ}\text{C}$,恒温带深度 h_0 采用恒温层深度20~30 m的平均值取25 m,热储温度采用石英温标(无蒸汽损失)估算的热储温度(图6a).根据图2a~2b,福清至莆田地温梯度低值区地温梯度取 $1.83\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,闽西北隆起带与泉州地区地温梯度取 $2.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,厦门地区根据集美地热井取地温梯度为 $2.13\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,漳州与三明地区取平均地温梯度为 $2.347\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,福州永泰地区取地温梯度为 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$,福州与闽西南隆起龙岩高地温梯度地区取 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$;经计算统计(图6b),NW-I区地热水循环深度为582.1~3 478.1 m,平均为1 946.4 m;SW-III区地热水循环深度为837.9~

3 254.2 m,平均为2 073.0 m,在不同分区中循环深度相对最小.SW-I区地热水循环深度为837.9~3 254.2 m,平均为2 974.6 m,相对最深.SW-II区、E-IV和E-V区地热水循环深度相近,平均值分别为2 406.9 m(1 169.0~3 596.3 m)、2 309.7 m(366.7~3 770.3 m)和2 255.9 m(771.8~4 064.8 m).不同SOM-KM聚类簇中, $I_1 \sim I_6$ 组地热水循环深度平均为2 018.9~2 972.8 m, II_1 和 II_2 组地热水循环深度平均为2 247.6和2 331.9 m, III_1 组水样循环深度平均为1 003.1 m,相对最浅.

在不考虑省域尺度内地温梯度差异情况下,地温梯度统一取值 $2.0 \sim 2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 时,地热流体循环深度的空间分布与地热流体热储温度的空间分布(图6a)相一致;如庞忠和(1987)估算的漳州地热田循环深度为3.5 km~4.0 km,漳州汤洋地热水循环深度为3 550~5 200 m(李成龙, 2019);地温梯度取 $2.5\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ 时,厦门湾-漳州地区循环深度为3 445 m~5 014 m(蔺文静等, 2020);Gan *et al.* (2019)和甘浩男(2023)确定的南靖-漳州盆地地热水循环深度为3.65~5.44 km,验证了上地壳上部以脆性破裂为主的流变特征,表明漳州盆地西北缘热水循环的深度大于盆地内部,导水断裂在不同构造区段的破裂延伸深度并不统一,与本次研究计算的结果总体相一致.从省域尺度来看(图6b),闽西北山地隆起区及沿海莆田至同安一带地热水循环深度相对较浅,与这些地区的地温低异常有关(图2c).闽西北地热系统热源主要为幔源热,武夷山隆起带莫霍面(地幔隆起)埋深相对较浅,故在循环深度较浅情况下,闽西北地区仍能形成地热异常.闽西南拗陷带与南平-福州顺昌-闽清晰裂(F_7 , 闽江沿江断裂)沿线地热水循环深度较大,与地壳热结构的空

地热水循环深度相对较浅,与花岗岩及“同源异相”火山岩放射性元素衰变生热对地热系统聚热的贡献较高有关(蔺文静等, 2024; Wu *et al.*, 2025)。“热壳冷幔”的岩石圈热结构使得地下水在浅部地壳径流过程中获得了较高的“放射性衰变热”(地壳热流加热),因此地热水循环深度虽相对较小,但地热异常仍相对较为明显,温泉出露及热储温度均相对较高。

4 地热流体循环演化模式识别与地热系统成因模式

福建省“东西分带、南北分块”的区域地质构造格架及其地壳热结构差异决定了区内地热资源禀赋的空间分带特征,以往研究多将福建省地热成因模式统一归类为深循环对流型水热系统(庞忠和, 1987; Yuan *et al.*, 2024)或板缘俯冲带热控构造型水热系统(王贵玲和蔺文静, 2020),未对不同大地构造分区内地热系统组成差异进行区分。庄庆祥等(2019)在考虑存在近现代火山活动与岩浆热源情况下,将福建温泉分为火山热成因、火山-对流热成因、对流热成因三种类型;但考虑到东南沿海地壳上部未出现岩浆热源的温度条件及相关地球化学与地球物理证据,不具备形成现代侵入岩体异常热源的条件(廖志杰, 2012; 张健等, 2018, 2024)。故此,本研究在梳理地热地质条件基础上,综合不同大地构造与水化学分区内地热流体的地球化学演化特征及其指示的流体循环模式,以壳幔生热控热和构造聚热深部热能聚敛理论(王贵玲等, 2023)与地热系统 THMC(温度-流体-力学-化学, thermal-hydro-mechanical-chemical)多场耦合成因(Lu *et al.*, 2017)理论为基础,重新总结了福建省主要的地热系统成因模式。

4.1 区域构造与地壳热结构对地热成藏的制约

福建省政和-大浦断裂以西武夷隆起带与断裂以东东南沿海陆缘带具有不同的热源机制,但热通道形式相对统一(李帅等, 2022; 王贵玲等, 2023; 张健等, 2024),地热成因模式也存在差异。

4.1.1 壳幔结构与深部热聚敛 华南地块位于欧亚板块东南地壳生长和大陆增生最活跃的大陆边缘(图 1d~1e),是壳幔物质与能量强烈交换的地带,其地壳热结构制约着地热异常带的空间展布。福建武夷隆起带和东南沿海陆缘带地热异常是壳幔生热和构造控热共同作用的浅部响应,区内地热形成的深层动力学机制与古太平洋板块西向俯冲

的挤压环境及后撤作用下的伸展环境密切相关(Dong *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2021; 甘浩男, 2023)。

闽西武夷隆起带地热系统热源主要分布在莫霍面以上,深部隆起地幔对流与地幔热作用造成了莫霍面的隆起,导致了隆起带内较高的大地热流状态($70\sim 80\text{ mW/m}^2$)。但武夷隆起带内大地热流尚不能使地壳完全熔融,壳内低速高导异常的可能成因为深部岩浆上涌在莫霍面内形成了部分熔融体。东南沿海陆缘带热源来自岩石圈上地幔,特别是浅部放射性元素聚集岩层的衰变放热,深部存在的地幔热物质贯穿地壳和上地幔,使得沿海陆缘带显现为高热状态(Hu and Wang, 2000; Guo *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021, 2024)。古太平洋板块向西强烈俯冲使得沿海陆缘带强烈活化,核-幔物质传输、壳幔物质传输和岩浆活动强烈,使得大洋板块插入大陆板块下,冷的大洋板块下沉,热的地幔物质上涌,形成了东南沿海地幔以及下地壳高热的状态(图 1e);且越靠近沿海,岩浆活动的剧烈程度越明显,壳幔内高导体亦越丰富,埋深也越深(Dong *et al.*, 2020; Guo *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021, 2024; 李帅等, 2022;)。东南陆缘地壳和上地幔存在巨量低速体,福州、漳州等地地壳 10 km、20 km、莫霍面周围及以下均发现有大规模低速异常带,其与地幔橄榄岩与玄武质岩浆上涌,在莫霍面以及地壳中发生部分熔融有关。福州、漳州盆地两地上地幔软流圈隆起,在 20~30 km 深度发育有次级底辟体,深部地幔热活动强烈,加之地壳浅部的放射性元素生热,地热异常相对更为明显(熊绍柏等, 2002; 王恺和熊熊, 2012; Zhou *et al.*, 2020b)。东南陆缘地壳热流为 35.5 mW/m^2 ,地幔热流为 25.1 mW/m^2 ,壳幔热流比值(q_c/q_m)达 1.41,表现为“热壳冷幔”型岩石圈热结构(甘浩男, 2023)。漳州 HDR-1 钻孔放射性元素衰变产生的热能(即地壳热流)为 28.94 mW/m^2 ,地幔热流为 33.6 mW/m^2 (壳、幔热流比为 1:1.16),亦表现为“热壳冷幔”岩石圈热结构特征(图 9c)(Lin *et al.*, 2023; 蔺文静等, 2024)。与此不同的是,张健等(2018)通过计算华南陆缘高热流区的壳幔温度,指出花岗岩中放射性元素衰变放热是地壳浅层地下水热活动的重要热源,但地壳总体温度不高,为“冷壳热幔”型热结构;黑水-泉州剖面地球物理证据(王恺和熊熊, 2012)表明东南沿海岩石圈厚度相对四川盆地及湘中地区明显减薄,表现为“热”而活跃的岩石圈热结构;林乐夫等(2017)研究揭示的南

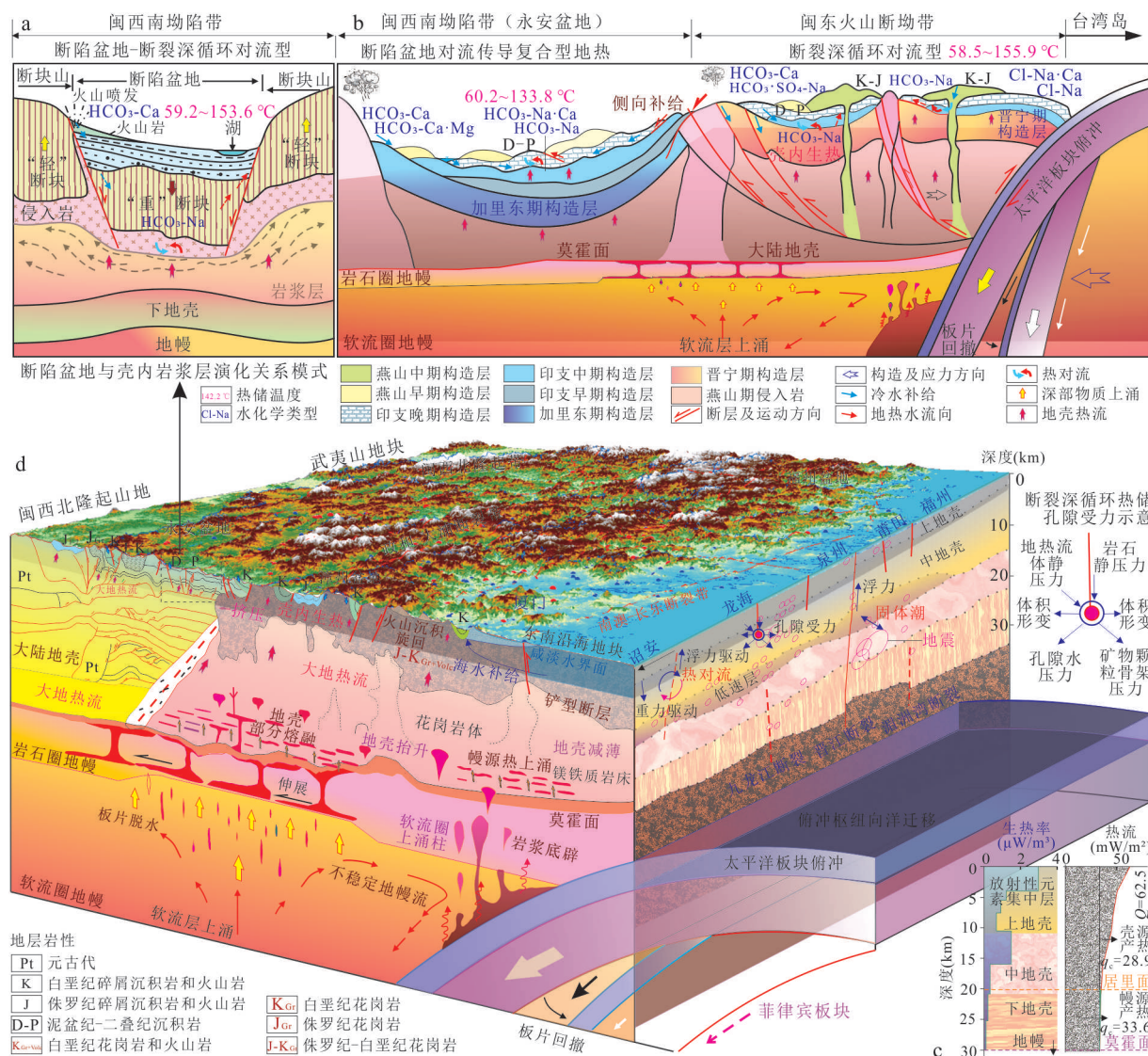


图9 福建省域地热成藏模式概念立体图

Fig.9 Genetic mechanism model of geothermal resources in Fujian Province

图据熊绍柏等(2002)、Chen and Grapes(2007)、王晶等(2011)、祖辅平(2012)、汪啸(2018)、Dong *et al.* (2020)、Zhou *et al.* (2020b)、蔺文静等(2024)等

岭地区和东南沿海岩石圈热结构分别为“热壳冷幔”(地壳热流对地表热流值的贡献率为60%~65%)和“冷壳热幔”(地壳热流对地表热流值贡献率为40%~45%);王贵玲等(2023)指出华南地块区域壳幔产热比例接近,为壳幔热源平衡区。以上研究表明华南不同地区地壳并非皆为“冷壳热幔”型热结构,但总体而言闽西南武夷山隆起区为“冷壳热幔”岩石圈热结构,地热系统热源主要为幔源热;沿海火山拗陷带岩石圈为“热壳冷幔”热结构,壳内岩体放射性衰变产热对浅部聚热的贡献相对较高。

4.1.2 水热运移通道 从岩石圈尺度与大地构造角度而言,武夷隆起带与东南沿海陆缘带热通道具

有统一的形式,均受控于深大断裂构造。深大断裂控制了幔源物质的上涌与热量的释放,在古太平洋板块NW向俯冲的挤压构造环境下,深部的幔源物质上涌,储存在地壳较深处。在古太平洋板块伸展后撤时期,软流层的上升流导致上覆大陆岩石圈地幔部分熔融,由此产生的热物质向上运动导致华夏地块下地壳底侵,并导致伸展减压期间下地壳变薄。燕山期运动形成的岩浆岩俯冲摩擦、岩浆侵位或喷发、底侵的热量沿深大断裂上侵(图1e),造成了断裂位置及中生代侵入岩-火山杂岩体展布区带的大地热流高异常(Hu and Wang, 2000; Zhou and Li, 2000)。大范围软流圈上隆产生的相对较高地幔热流

以及侵入岩与“同源异相”火山岩放射性衰变生热导致的较高地壳热流,加之深大断裂连通的水体热对流相互叠加作用,为区域地热异常的形成提供了有利条件.

中生代以来太平洋构造域板块俯冲碰撞的复杂构造演化形成了横贯华夏地块、深入上地幔硅铝层或硅镁层的 NE 向深大断裂.断裂系统为深部玄武质岩浆的溢出提供通道,携带的深部热能也随之释放,加之侵入花岗岩体较高的放射性与岩石圈减薄导致的较浅居里面埋深(17~18 km),为沿海陆缘高热流和地热异常的形成提供了有利条件.与此同时,华夏地块白垩纪以来显著伸展变形,使得区内广泛分布伸展盆地和穹窿构造,伴生的大规模岩浆活动也构成了区内巨大的“伸展盆地-岩浆省”(Dong *et al.*, 2020; Shu *et al.*, 2021; Xu *et al.*, 2021, 2024).经过中生代强烈构造-岩浆活动改造后的断裂系统,成为了区域现今水热系统的控热构造;深部热能可以通过深大断裂更直接传递至浅部,导致导水断裂带附近的地温异常.地表温泉出露亦表现出高度的有序性,主要沿深大断裂与浅部张性断裂交汇带分布.省域范围内 82.5% 温泉点分布于区域张剪性 NW 向断裂周边, NW 向断裂是地热流体运移、富集、上涌与深部热对流的良好通道(万天丰等, 1988; 廖志杰, 2012; 王贵玲等, 2023).多期构造运动形成的不同类型的花岗岩、沉积盆地以及构造断裂系统,为东南沿海深部热量聚敛创造了有利条件.以古火山口为中心的环状构造为岩石圈地幔与大陆地壳形变的上升区,环状构造与张剪性 NW 向断裂的复合部位亦多为较高温度温泉的分布区.

另一方面,区域性深大断裂的“阻水”或“导热”性质主要由断裂在地表的出露特性表征.地表观测表现为压扭性质的 NE 向断裂,其断裂属性可能随其延伸深度增大而有所改变,导水断裂在不同构造区段的破裂延伸深度也并不统一.已有证据表明,东南沿海晚中生代以来经历了复杂的挤压-伸展构造体制转换,包括政和-大埔断裂、长乐-南澳断裂在内的 NE 向断裂都可能经历了多期活化与走滑作用(图 1c)(Dong *et al.*, 2020; Shu *et al.*, 2021);这些断裂切割深度达到中下地壳,在形态上表现为铲状滑脱面,指示了断裂向深部延伸并可能同样具有走滑伸展属性.因此, NE 向断裂的“阻水”特性可能仅对地壳浅部而言才有意义,而其在深部可能具有导水特性.同样地, NW 向断裂在切割深度较深的区段,其亦可具备

“导热通道”性质.深部热源的热量顺铲形逆冲断层向上传输到地表,浅部热源的热量经由地下水汇集到地热田中心(廖志杰, 2012; 张健等, 2018, 2024).

4.2 地热流体循环与地热成因模式

地热资源成藏受到地质结构(地层岩性、储层盖层,地质发展史),构造(火山机构,断裂力学性质、规模、延伸深度和活动性,储水构造(褶皱)的发育,储水裂隙发育程度等)、地热地质和水文地质条件(地下水流系统水动力条件-径流途径和水交替强度)等控制(Sun *et al.*, 2023; Zhou *et al.*, 2023).除壳幔热源差异外,闽西北隆起带、闽西南坳陷带和闽东火山断拗带内地热形成受储层盖层岩性、地热水补给来源、径流路径和地热驱动力等因素控制.综合地热异常分布及地热系统构成差异,福建省地热成因模式可分为闽西北(NW-I区)武夷隆起山地断裂深循环对流型,闽西南断陷盆地对流传导复合型(碳酸盐岩-碎屑岩复合热储层 SW-III 与部分 SW-II 区地热水),闽东及闽西南断拗带断裂深循环对流型(根据热储地质建造可分为:闽东火山岩-侵入岩构造残余盆地-深循环断裂对流型、闽东-闽西南花岗岩裂隙型断裂深循环对流型以及侵入岩-碎屑沉积岩断陷盆地-断裂深循环对流型三个子类)(图 9b, 9d).

4.2.1 闽西隆起山地断裂深循环对流型地热

闽北及西北地层以元古代变质岩为主,局部具变质结晶基底与地槽型巨厚碎屑岩沉积岩盖层二元结构,温泉主要出露于深大断裂及其次级断裂交汇处,以及岩浆岩与变质结晶基底接触带,分布于武夷隆起莫霍面坳陷与隆起、大地热流显著升高的深部构造变异带内(Hu and Wang, 2000; Guo *et al.*, 2021; 王贵玲等, 2023).岩石圈具“冷壳热幔”热结构特征,地热系统热源主要为幔源热;热储类型主要为断裂开放型热储,沿控热断裂、节理裂隙、岩浆岩与围岩接触带呈脉状或带状分布于基岩山区及山前地带,存在较薄盖层或未发育盖层(Zheng and Luo, 2024).在相对偏高大地热流背景下,丰沛的大气降水、地表水或浅层地下水在深大断裂地势较高的开启处入渗补给地下水,沿岩浆岩、变质岩断裂破碎带入渗与断层面或岩浆岩围岩接触获得地幔热量增温,并通过导水断裂深循环在构造交汇带等地质条件有利的部位涌出形成温泉或在地壳浅部形成地热异常区.隆起山地断裂深循环对流型地热水主要为富 HCO_3^- 外围水,但受变质结晶岩中硫化物金属矿物氧化影响,地热水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 型和

HCO₃·SO₄-Na·Ca型为主. 地热水出露温度相对较低(中位数 36.5 °C), 补给区高程在 84.3~1 117.3 m (平均为 535.2 m), 循环深度平均为 1 946.4 m. 热储温度平均为 117.3 °C (85.3~146.9 °C), 地热水循环过程中冷水混入比例相对最高, 平均为 84.78%, 混入冷水前地热母流体温度为 85.8~170.7 °C (平均为 131.2 °C).

4.2.2 闽西南断陷盆地对流传导复合型地热 华南陆块发育诸多中新生代构造残余盆地, 包含后造山磨拉石盆地和陆内伸展盆地两种类型, 陆内伸展盆地内多显示有地热异常, 闽西南永安盆地为区内典型陆内伸展盆地(陈廷东, 2018; Xu *et al.*, 2019). 加里东期之后, 闽西南拗陷在晚古生代至中三叠世期间沉降明显, 是福建海相和近岸海相地层的主要分布区. 印支期和燕山期强烈的构造活动使得区内 NNE 向和 EW 向褶皱和挤压断层广泛发育, 而褶皱和断层的结合有利于温泉的形成(图 9a; 王晶等, 2011; Zhou *et al.*, 2023), 区内地热温泉即主要沿盆地内青柳、永安、大田和龙岩等 EW 向挤压和 NS 向张性断层的交汇处及 NE 向挤压断层沿线分布. 区内地热形成模式为断陷盆地对流传导复合型, 热储类型为断裂半圈闭的岩溶裂隙与碎屑沉积岩孔隙裂隙层状复合型. 典型地热异常区永安盆地位于政和-大埔断裂带的核心部位, 兼具晚古生代海相沉积地层和中-新生代陆相火山沉积与河湖相沉积地层, 是典型多期复式叠合盆地. 盆地基底呈 NE-SW 走向展布, 沉积沉降中心位于龙岩和梅县地区. 早侏罗世拉张构造环境下的火山活动被局限在火山构造洼地(盆地)内, 构造断块升降差异使得盆地内形成一套紫红沉积火山建造体系. 盆地东部主要出露古近系-新近系红层碎屑沉积岩、火山碎屑沉积岩, 西北部为二叠纪灰岩碳酸盐岩. 断块作用改造了盆内晚古生代地层, 形成了断褶复合地层(祖辅平, 2012; Xu *et al.*, 2019), 为碳酸盐岩-火山碎屑沉积岩复合热储的有利储水构造(图 9b). 断陷盆地中部层状灰岩上覆热导率相对较低的火山岩与碎屑沉积岩建造, 构成地热系统的盖层; 断陷盆地内传热方式在古近系-新近系盖层以传导为主, 在基岩储层以对流为主.

永安盆地是在新元古代华南地块形成之后因 Robinia 超大陆裂解而形成的, 盆地演化具隆起-伸展构造发育特点(廖志杰, 2012; 祖辅平, 2012). 盆地 NE 端永安-大田段较为开阔, SW 端梅县区段以串

珠状与盆地主体连成一体, 组成永梅拗陷(图 1c), 地热异常较为明显. 盆地次级大地构造自西向东可划分为明溪-长汀拗陷带, 三明-上杭、古田水下隆起带, 大田-龙岩拗陷带, 组成“二凹一隆”的构造格局. 盆地地处闽中地幔拗陷带, 基底构造展布与区域深部构造变化具有一致性. 盆地内莫霍面等值线呈环状封闭, 其中华安幔凹处深达 34 km(图 2f). 以永安盆地为中心从东到西, 刚性地幔、岩石圈底面(软流圈顶面)与地壳具有同向的隆凹形态, 均呈现出深凹陷(陡坡带)-狭窄隆起带(拗陷带)-隆起带(缓隆带)的分区特点(图 9b). 盆地东部存在 NE 向的深凹陷, 软流圈顶面在永春-南靖一线呈 NE 向狭窄隆起, 埋深在 60~80 km; 同时在华安、福州两处局部隆起, 以华安为中心呈近等轴状的局部隆起, 在福州附近则呈 NW 向短轴状局部隆起, 软流圈顶面两侧埋深达 100 km 以上; 西部以永安为中心存在范围较大的隆起, 软流圈顶面埋深约 79 km(Huang *et al.*, 2015; 黄昌旗等, 2018). 岩石圈厚度减薄、软流圈隆起为区内地热异常的形成提供了较高的大地热流背景, 盆地边缘花岗岩的放射性生热也为地热成藏提供了部分热量. “二凹一隆”的盆地基底构造格局与岩石热导率差异驱动大地热流在向上传导时, 对来自地壳深部较均一的大地热流在地壳浅部进行重新分配, 产生了热折射效应——热流向热导率高、热阻小的灰岩凸起区偏转聚集(王贵玲和蔺文静, 2020; 康凤新等, 2024).

盆地发育以左旋剪切为主-间有右旋剪切的边界构造, 表现出压剪与张剪交变复合特征. 盆地 NW 和 SE 边界多与火成岩呈断层接触关系, NW 向则为过渡相沉积边界, 其 SE 边界总体沿德化-华安一线为正断层构造带, SE 方向显示为拉张环境. 断陷盆地内 NE-NNE 向与 NW 向断裂交汇形成的格子状构造格架, 与拉张性质的 SE 断裂共同构成地热系统的控热构造与导水通道; 压扭性质的 NW 向断裂构成地下水流动系统的阻水边界, 使得断陷盆地与阻水断裂构成断裂半圈闭型热储(万天丰等, 1988; 王贵玲等, 2023), 地热系统具“断褶复合层控热储-侧向径流补给-大地热流供热”的中低温对流特征. 盆内水系发育, 低洼处分布若干狭长条形谷地, 加之盆地东侧为闽中戴云山脉, 西侧为武夷山东南坡, 地表水与山前浅层地下水补给地热水水力梯度大, 为地热系统提供了良好的补给水动力条件. 显著重力势能差驱动地下水流系统从浅循环、中循环

地下水动力系统演变为深循环地热水动力系统,从局部地下水流系统、中间地下水流系统演变为区域地下水流系统(康凤新等,2024).碳酸盐岩-火山岩断陷盆地地下水系统可被划分为盆地上缘浅循环-开放式地下水动力系统、盆地中部中循环-半开放式地下水动力系统与盆地下游(阻水断裂)深循环-弱开放式岩溶地热水动力系统.碎屑岩夹碳酸盐岩基岩裂隙含水岩组富水性较强,单孔涌水可高于 $1\,000\text{ m}^3/\text{d}$.由于地表水与浅循环地下水强烈的交互作用,以及盆地上缘与中部浅层地下水的“近源补给-近源排泄”特征,使得区内地热水循环路径相对较短,循环交替强烈,地热水升流过程中受冷水补给混合影响较为明显,地热温泉出露时具有流量大但温度相对较低的特点,如永安市城关西桥头单个天然岩溶暗河温泉露头最大流量达 155.1 L/s ($1.34\times 10^4\text{ m}^3/\text{d}$),但水温仅为 $35\text{ }^\circ\text{C}$,永定县与连城县地热资源总水量可达 $108.95\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ 和 $420.95\times 10^4\text{ m}^3/\text{a}$ (1996~1999 年数据)(庄庆祥等,2019).

在较大地下水重力势能差的驱动下,丰沛的大气降水、地表水和浅层孔隙裂隙水沿断裂开启部位或褶皱盆地轴部向深层补给,经深循环增温,在断裂带与盆地边缘接触带涌出成泉,或赋存于盆地层状孔隙裂隙发育的热储层中(埋藏型深循环-半圈闭弱开放地热水动力系统).高大地热流传导聚热、深大断裂带/侵入岩体-火山岩-灰岩接触带带状对流聚热、盆地基底(软流圈顶面)凸起区高热导率分流聚热、盖层低热导率保温聚热、地下水深循环运移传导-对流聚热共同驱动永安盆地地热异常的形成.闽西南 SW-III 区水样 TDS 浓度平均值(91.13 mg/L)在不同地热分区中相对最低,水化类型主要为 HCO_3 型($\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}$).部分地热水呈现出大气降水入渗稀释(古沉积水) Cl-HCO_3 型水化学特征($\text{HCO}_3\cdot\text{Cl-Na}\cdot\text{Ca}$ 型).水体 ^{18}O 重同位素富集相对富集,水岩作用成熟度相对较低,受河流渗漏的浅层地下冷水混合影响程度相对较高. SW-III 与 SW-II 区地热热储温度在 $60.2\sim 153.6\text{ }^\circ\text{C}$ (平均 $108.7\text{ }^\circ\text{C}$). SW-III 区地热水补给区高程为 $186.3\sim 1\,425.8\text{ m}$ (平均 626.5 m),地热流体循环深度平均为 $2\,073.0\text{ m}$.受控于断陷盆地结晶基底,地热水循环深度相对最小,地热热储温度与出露温度亦相对较低.地热流体循环过程中冷水混入比例平均 80.3% ($54.8\%\sim 93.5\%$),混入冷水前地热流体温度平均 $120.5\text{ }^\circ\text{C}$ ($46.5\sim$

$170.7\text{ }^\circ\text{C}$).盆地西侧永梅坳陷内,碎屑沉积红层-碳酸盐岩地质建造制约的断陷盆地中部存在对流-传导复合型中高温地热资源利用潜力.

相对陆内伸展盆地,形成于晚三叠世-早侏罗世时期的后造山磨拉石盆地(南平盆地、尤溪盆地、漳平盆地、大浦盆地、长泰盆地和同安盆地等)早期多为山前近源快速堆积环境,稍后为远源河流-湖滨环境;盆地下部主要发育近东西向展布的焦坑组(T_3j)砂岩、砂砾岩夹煤层及碎屑火山沉积岩建造(祖辅平,2012; Xu *et al.*, 2019),基本无温泉出露,地热异常显示不明显.

4.2.3 闽东及闽西南断拗带断裂深循环对流型

闽东火山断拗带侵入岩-火山岩建造(E-IV 区)与滨海变质带侵入岩-第四系建造区(E-V 区),闽西南侵入岩建造(SW-I 区)与侵入岩-碎屑沉积岩建造区(SW-II 区部分)地热成因均为断拗带断裂深循环对流型.地热异常主要分布于陆内伸展盆地(裂谷盆地、火山断陷盆地和沉积断陷盆地)的凸起处,盆地深部热储层及深部构造异常带(地壳减薄,地幔隆起、软流圈顶面隆起)的侵入岩体断裂构造破碎带内,热储层主要为新生代火山-沉积断陷盆地(漳州盆地、福州盆地)砂岩、砂砾岩储层、火山岩及中生代花岗岩裂隙带状储层,地热系统盖层(古近系-新近系和第四系碎屑沉积建造)空间异质性较强或不存在盖层.福建省陆内拉伸盆地主要沿区域 NW 向深大断裂(政和-大浦断裂与南澳-长乐断裂)呈串珠状分布,盆地长轴与地层展布多呈 NE-SW 走向,两侧(双断型)或一侧(单断型)发育朝盆地中心的引张性正断层(祖辅平,2012; Shu *et al.*, 2021);而与拉分盆地相关的断层为地下水活动和热物质上涌提供通道,是东南地热异常带最根本的控热构造(Zhang *et al.*, 2023).裂谷盆地与沉积断陷盆地空间展布上呈半地堑式或箕状,多远离海岸线分布在大陆腹地.裂谷盆地地热系统热源以幔源热为主导,白垩纪红层孔隙裂隙含水层富水处地热涌水量在 $100\sim 700\text{ m}^3/\text{d}$ 范围.

(1)火山岩-侵入岩构造残余盆地断裂深循环对流型.主要分布于闽东火山断陷盆地与闽西裂谷盆地内,火山断陷盆地多发育晚侏罗世-早白垩世活动大陆边缘型巨厚沉积-火山岩系及陆相红色火山喷发沉积和复陆屑建造.滨海地区主要表现为大规模流纹质火山堆积盆地,在大陆腹地则表现为火山碎屑-沉积断陷盆地,或火山堆积-陆缘碎屑物充

填复合型盆地.盆地内火山岩常与花岗岩密切共生,二者呈(正)断层不整合接触,或火山碎屑岩不整合覆盖于花岗岩体之上.省域内典型火山断陷盆地包括永泰盆地(永泰-德化-仙游环状火山机构)、福鼎盆地,火山沉积盆地包括明溪盆地、龙海盆地、建瓯盆地、宁德盆地、闽侯盆地、福清盆地和涵江盆地等,火山堆积-陆缘碎屑沉积盆地包括漳州盆地、海沧盆地、大田盆地、翔安盆地、上杭盆地等.裂谷盆地包括闽西北浦城盆地、万成盆地、大田盆地和将乐盆地,闽西连城盆地、湖雷盆地和龙岩盆地等.火山岩裂谷盆地多呈长条形,中心发育双峰式火山岩、拉斑质玄武岩,边缘则主要出露A型花岗岩(余明刚等,2021).区域继承性逆冲活动NE-NNE向及NW向断裂控制着沿海断陷盆地和断陷海湾的形成和发育,亦即沿海地热异常带的分布(Huang and Golf, 1986; 庞忠和, 1987; 蔺文静等, 2024).

(2)侵入岩-碎屑沉积岩断陷盆地-断裂深循环对流型.主要分布于闽西沉积断陷红层盆地内,沉积断陷盆地(举岚盆地、长汀盆地、上杭-连城盆地和漳平盆地等)多形成于晚白垩世-新生代时期,出露地层以砖红色粗砂岩、粉砂岩和泥岩为主.

(3)闽东-闽西南花岗岩裂隙型断裂深循环对流型.除火山-沉积断陷盆地型地热外,局部花岗岩中发育有网状裂隙深循环对流型地热.省内结晶岩地区温泉多于岩浆岩体边缘、后期入侵岩脉或岩体与其他地层的接触带上出露.大型侵入岩体内断裂及裂隙本身即是地热水运移、富集、上涌的通道,同时也是热水的储存空间,因此在断裂构造发育地带,尤其是深大断裂带附近和多个断裂带的交叉部位,亦可形成裂隙介质深循环对流型地热水异常带(汪啸, 2018; Zheng and Luo, 2024).但相对盆地地下水系统,花岗岩裂隙富水性相对较差,钻孔涌水量多小于 $100\text{ m}^3/\text{d}$.

在深部构造异常带(地壳减薄、莫霍面隆起)相对较高的热流背景下,盆地周缘或花岗岩断裂构造裂隙开启处的大气降水、地表水与浅层地下水沿岩石的节理、构造裂隙,以及侵入岩、火山岩、碎屑沉积岩接触面向下渗透并向盆地中心或断层深部运移,并与断层面或岩浆岩围岩接触获得地幔热量、地壳深部“低速-高导层”及花岗岩壳放射性产热增温,或与深部(古火山通道、导水断裂)高焓流体、气体等组分混合获得热量,并在黏度-盐度-密度差形成的额外压力水头驱动下

通过导水断裂深循环在构造交汇带等地质条件有利部位涌出形成温泉或在地壳浅部形成地热异常区.

东南沿海自新近系以来受到菲律宾大洋板块的强烈挤压,使相对脆性的、固结的闽台陆壳发育铲状断层系统,断裂网格发育.平缓东倾的铲状断裂在近地表表现为NW、NE向的高角度断裂,张性破裂为主的NW向断裂构成地热系统的导水通道,而以压性破裂为主的NE向断裂则构成地热系统热聚敛的阻水-导热通道(王贵玲等, 2023; 张健等, 2024).侵入岩与围岩接触带的密闭性研究亦表明,闽东沿海侵入岩-火山岩水热系统只能通过岩体中断裂带提供的通道进行深循环(Zheng and Luo, 2024).滨海断陷盆地内地热水在入渗或升流过程中在盆地中心附近的基岩深处与海水发生混合,流体循环受到海水混合影响相对最为明显.相对闽西北隆起带、闽西南拗陷带地热系统,闽东火山断拗带具有更高的地热温泉出露温度,这与其区内“热”而活跃的岩石圈热结构、较高的花岗岩,以及“同源异相”火山岩放射性衰变生热有关.

闽东E-IV区地热水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 型为主,长英质火山岩与侵入岩建造地热系统流体水岩作用的长期供应端元为斜长石.闽西北NW-I区地热水同时接受武夷山东麓与鹫峰山-戴云山-博平岭西麓大气降水补给,而福州北部经由闽江与闽西北地区贯通,大气降水与地表水对地热流体的补给贡献相对较高.E-IV区地热水补给高程平均为 $1\,248.1\text{ m}$ ($64.5\sim 2\,149.5\text{ m}$),大部分地热水样 $\delta^{18}\text{O}$ 和 δD 值显著偏负,指示其补给区位于海拔较高的闽中戴云山-博平岭山脉东麓,而不是当地大气降水的邻近补给,其径流路径相对较长,地热水循环深度平均为 $2\,255.9\text{ m}$ ($771.8\sim 4\,064.8\text{ m}$).地热流体升流过程中冷水混入比例平均为 82.9% ($51.2\%\sim 97.3\%$),冷水混入前热储温度平均为 $144.3\text{ }^\circ\text{C}$ ($110.5\sim 179.6\text{ }^\circ\text{C}$),在不同分区中相对最高.闽西南SW-I区与SW-II区地热水化学类型及TDS平均浓度与E-IV区较为接近,水化学类型以 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4\text{-Na}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Na}\cdot\text{Ca}$ 和 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 为主.断陷盆地中部古沉积水混合对地热流体水化学形成演化存在影响,局部呈现出稀释 Cl-HCO_3 型水化学特征.SW-I区地热热储温度在 $93.5\sim 138.8\text{ }^\circ\text{C}$,补给高程在 $868.8\sim 1\,482.1\text{ m}$,循环深度为 $837.9\sim 3\,254.2\text{ m}$,平均为 $2\,974.6\text{ m}$,相对最深;地热流体升流过程中冷水混入比例为 $51.1\%\sim 95.9\%$,混入冷

水前地热流体温度为 88.9~145.4 °C。SW-II 区地热系统热储温度在 59.2~153.6 °C, 补给高程在 460.5~1 223.2 m。地热水循环深度平均为 2 406.9 m (1 169.0~3 596.3 m), 升流过程中冷水混入比例为 68.3%~97.3% (平均 82.9%), 混入冷水前地热流体温度为 88.3~178.9 °C (平均 137.2 °C)。

滨海 E-V 区水样 TDS 质量浓度平均达 7 188.6 mg/L, 水化学类型以 Cl-Na·Ca 和 Cl-Na 型为主。地热系统同时接受闽中戴云山-博平岭东麓大气降水与浅层地下水及东侧海水补给, 海水补给通道主要为 NW 向区域导水断裂。受控于深部构造, E-V 区地热水热储温度、补给高程与循环深度总体与 E-IV 区相近, 热储温度平均为 116.3 °C (58.5~155.9 °C), 地热水补给高程为 43.4~1 216.3 m (平均 643.9 m), 循环深度平均为 2 255.9 m (771.8~4 064.8 m), 升流过程中冷水混入比例均为 76.3% (50.5%~92.5%)。受海水混合影响, 冷水混入前热储温度为 113.8~170.9 °C, 平均为 138.5 °C, 相对低于 E-IV 区。滨海地热水在形成过程中经历了两次主要的混合过程: 深循环地热水与埋藏很深亦或经过深循环海水的第一次混合, 以及由深部上涌的热咸水与浅部含水层冷水的第二次混合。福州、莆田和泉州湾、厦门湾、漳州地区地热流体中海水混入比例分别为 22.54%~81.77%、8.87%~34.69%、5.83%~31.65% 和 1.28%~33.17% (平均为 13.32%)。在热田相对高温中心, 深部上来的高温、高矿化度热咸水占主导地位, 而在热田外围则以温度不同的中低温热水为主。

E-IV 与 E-V 区 NW-NE 走向深大断裂 (福安-南靖深断裂为主, F_3) 交汇处与断陷盆地中部 (福州盆地、漳州盆地), 及永泰-德化-仙游大型环状火山机构放射性断裂带与 NE 走向深大断裂交汇处部分水样具火成岩矿物流体包裹体及火山机构内生水 (Cl^- - SO_4^{2-} 混合型) 水化学特征, 呈现出高温、低 Mg^{2+} , H_2SiO_3 和 F^- 高异常 HCO_3^- -Na 和 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4^-$ -Na 型水化学特征, 深大断裂带与古火山机构深部高温地热流体的升流冷凝混合对福建省内高温地热的形成具有重要影响。漳州盆地、泉州德化南埕、安溪龙门、福州永泰、断陷盆地中部及 NE 向深大断裂与 NW 向大断裂交汇处的富水部位, 即沿海断陷盆地-断陷海湾为中高温地热资源成藏潜力区。

4.3 地热系统流体循环驱动力差异讨论

地下水流动系统中, 水头差产生的重力势是地

下水运移的主要驱动力 (Tóth, 1999)。但在有深部热源提供额外能量的对流水热系统中, “嵌套式多级次水流系统”的补给区与排泄区温度场、化学场具有非对称性, 地热水排泄区 (升流段) 的高温流会产生密度、盐度与黏度变化, 导致地热水循环压力水头的非线性变化。重力势、温度、盐度与黏度等非对称变化引起的压力水头与流速额外增大“地热驱动力”, 与地球固体潮导致的储层介质压实势及构造地应力场挤压作用共同影响着地热流体的循环运动 (Batzle and Wang, 1992; 毛绪美等, 2022; 叶建桥和毛绪美, 2024)。

4.3.1 区域构造地应力 区域地应力制约着导水控热构造的展布和水力-热力学性质, 影响着地热资源的成藏、空间分异及流体循环演化。中国东部应力区应力源自太平洋板块向西部欧亚大陆俯冲和菲律宾板块向北西朝欧亚大陆俯冲的联合作用, 华南地区现代构造应力场的主体特征表现为以 SE-NW 到 SEE-NWW 方向的挤压 (陈园田等, 1998; Wang *et al.*, 2013; Zhang *et al.*, 2023; Zhao *et al.*, 2023)。在地应力作用下, 东南沿海晚更新世大幅度的地壳下降与全新世以来的地壳显著上升差异运动, 晚白垩世以来古太平洋板块的后撤及新生代南海海盆张裂的发生, 架构了区域 NW 向高角度倾滑型张性活动断裂与陆内伸展盆地、平原、断陷海湾展布走向一致的构造地貌格局。在地应力制约下, 构造运动形成的拉伸-断陷盆地具有典型的大陆热盆地双层结构, 即韧性剪切流变的软流圈和脆性破裂的岩石圈以及岩浆侵入壳内形成的岩墙构造; 而与拉分 (断陷) 盆地相关的 NW 深大断裂为地下水活动、海水补给混合和热物质上涌提供了通道, 也是本区最根本的控热构造 (Guo *et al.*, 2021; Zhang *et al.*, 2023)。

华南地块总体为一个弧后伸展裂谷盆地型地热区, 而张扭性的断层应力环境有利于高温地热资源的成藏。福建省温泉分布也印证了区域最大主应力的方向, 温泉分布呈南密北疏、东多西少的显著特征, 与 NW 向断裂有关的温泉点数量占 82.5%, 沿海温度较高的地热田主要分布于 NE 或 NEE 向张扭性断裂带沿线 (万天丰等, 1988; 庄庆祥等, 2019)。深部热物质上涌、运移、调整、分异、变异、交换 (能源) 活动与区域地应力场异常地质响应的强度, 自西往东、由北向南梯度增强趋势十分明显, 在闽东南台湾海峡沉降带内构造应力 (地应力) 相对最大,

温泉出露温度与热储温度亦相对最高;而地应力较小的闽西北隆起区温泉出露数量与温度、热储温度均相对较低。台湾海峡西岸地应力方向表现为从北向南由NNW方向转向EW方向的扇形分布,沙县-南日岛断裂以北下降、永安-晋江断裂带以南上升的差异地壳运动使得泉州永安-晋江断裂带应力已积累到较高水平(李冉等,2016;李全力,2021),一定程度上导致了其与福安-南靖阻水断裂交汇处的德化安溪-南埕塔兜地区热储温度相对较高。华南沿海温泉与地震关系研究(吕浩江等,1989;张珂等,2002)表明,区域内控制温泉的断层以张性蠕滑为主,通透性较好,不积累大的应力;控制大震的断层以压性黏滑为主,封闭性较强,积累应力较强。在区域NWW-SEE方向主压应力下,NW向断层以张扭性活动为主,而NE向断层以压扭性活动为主;因此温泉多沿NW向成群出现,而大地震则多受NE向断层的控制。此外,在NE和NW两组断层的交会部位,因交切方式的不同亦可能分别出现局部拉张或挤压区,局部挤压区可能控制地震的发生,而局部拉张区则控制温泉的出露。

地壳差异运动导致的地应力场是区域火山岩成分变异、环状火山机构发育的主要控制因素,中国东部中生代陆相火山岩是印支旋回以来亚洲大陆东部发展成为滨太平洋构造域的产物,其岩石成分主要受构造应力和基底组分的控制,故此火山岩呈NNE向展布(王晶等,2011;Xu *et al.*, 2021, 2024;Zhao *et al.*, 2023)。闽东规模较大的华安、古田、永泰环状火山构造带及规模相对较小的政和、罗源、云霄环状火山构造带的形成与地壳深部构造变异密切相关,其在地质历史时期多有地壳断裂通过并经历过强烈的火山岩浆活动。环状火山构造可能是软流圈岩浆底辟上涌、地幔楔形区发展波及至上地壳的结果(Guo *et al.*, 2021;余明刚等,2021;Liang *et al.*, 2022)。东南沿海温泉形成的环形区在形态与空间位置上也与区域构造应力场分布高度一致,古火山环状构造与地壳差异升降塑造的含水介质格架制约着地下水运动的渗流路径,火山构造沉积盆地、火山机构(古火山口等)交叉分布的多变隆升微倾斜地貌,加大了山区地下水径流水力梯度(孙厚云,2023),火成岩及其之上展布的地堑式活动断裂是地热能储存与传导上升至地表的良好通道与载体,环状火山机构的放射性导水导热断裂与倾斜地貌造就的水力梯度差异使得福

州-闽清-德化环状火山-侵入杂岩构造带与漳州盆地周缘环状火山构造带地热异常较明显。

4.3.2 地形地貌控制的水力梯度差异 地壳浅部,饱水带地下水流动的主要驱动力是补给区和排泄区水头差产生的重力势,地形地貌通过影响温泉水热系统的补给和排泄条件控制着温泉的出露特征(Tóth, 1999;Zhou *et al.*, 2023)。华南沿海温泉深循环动力学模拟表明(张珂等,2002),较大地形反差和张性大断裂是温泉形成的两个有利条件,即合适的水头压力保证流体得到合适的流速,较大的循环深度使得地下水获得较高的温度;张性大断裂(小地形反差,表征地下水循环深度)比大地形反差(小断裂,表征水头压力)更有利于获得较高的泉水温度。政和-大埔断裂带东西两侧地形地貌变化具有明显的不对称性,鹫峰山-戴云山-博平岭掀斜隆升区西陡东缓,西部以强烈切割的中低山为主,第四纪河谷盆地不发育,河流深切呈狭谷型,纵比降大,如龙岩一带河流穿过断裂时形成了近20 m落差的瀑布(庄庆祥等,2019)。东部地形呈阶梯状递降,地表径流于闽东沿海差异活动地块交界处常见跌水。鹫峰山-戴云山掀斜隆升带两侧地热水系统补给水力梯度差异制约着地热流体的循环与水岩作用程度(孙厚云等,2025b),西部地热水补给水力梯度大,丰富的降雨及较快的循环更新速率使得含水层内溶滤作用较强,主要形成低焓低矿化度的 HCO_3^- -Ca型地热水。永安盆地断裂半圈闭碳酸盐岩地热水系统断裂开启段水体重力势能能量差驱动地下水向势能低的中下游径流,循环交替强烈;而断陷盆地中部补给埋藏型岩溶区演变为深循环-弱开放地热水动力系统,更新循环速率相对放缓。闽东浅层地下水补给与深部地热水系统结晶基底面水力梯度较缓,径流路径较长,有足够的热传导时间,水岩作用相对较充分,地热流体获取的热量与岩源离子组分均相对较高,地热水温度与热矿水离子浓度均相对较高。

4.3.3 流体密度变化形成的地热驱动力 水热系统中,地下水补给区与排泄区的流体速度分布具有不对称性(Saar, 2011),在径流区高温高压驱动力下,排泄段地下水流速会明显大于补给段,地热驱动力的额外加持作用可以加快水热系统中地下水的循环。由于温度升高导致地热水密度减小和压力增大,使得地热水的实际压力水头增大,因此在一些沉积盆地揭露深层热水的钻井中会出现动水位高于静水位的现象,滨海平潭与诏安湾出现了地热

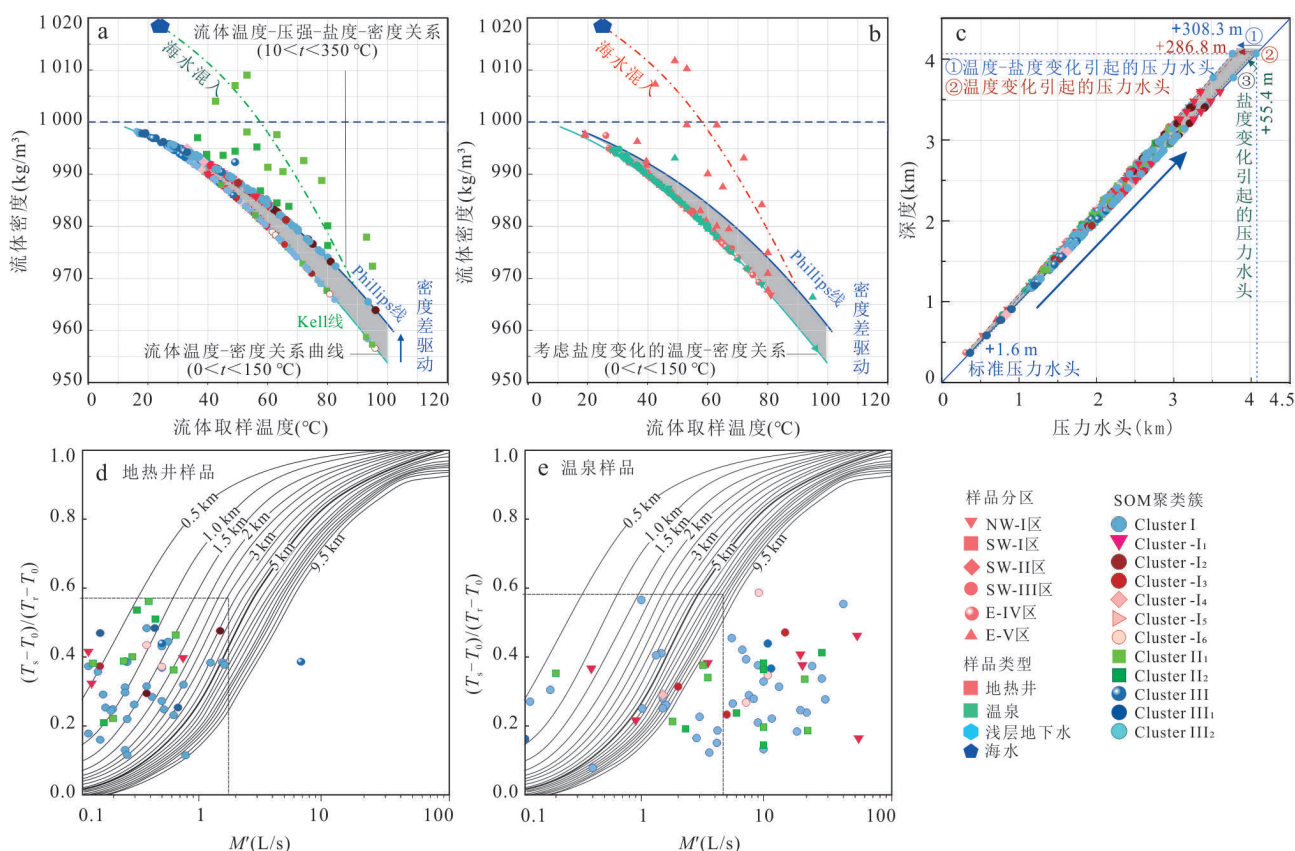


图 10 福建省地热水温度和盐度变化引起的压力水头变化与管道模型确定的地热水循环深度

Fig.10 Pressure head change resulted from the changes of temperature and salinity of geothermal water and the groundwater circulation depth determined by pipeline model in Fujian Province

图 d 和图 e 中 $(T_s - T_0)/(T_r - T_0)$ 为管道模型无量纲温度参数, 其中 T_0 为流体补给初始温度, T_s 为流体出露温度, T_r 为流体热储温度; M' 为地下热水上涌流速

水出露高程相对高于补给区的“反重力”现象。参照毛绪美等 (2022)、叶建桥和毛绪美 (2024) 建立的地热水运移额外非重力作用“地热驱动力”定量计算方法, 研究区不同分区地热水温度和盐度变化引起的压力水头变化见图 10c。

水生系统中地下水的温度升高, 会使其密度、盐度和黏度等发生变化, 仅考虑温度影响时, 流体密度与温度的变化关系 (Kell, 1977) 为:

$$\rho_T = (999.8427 + 67.8782 \times 10^{-8}t + 103.1412 \times 10^{-6}t^3 + 15.95835 \times 10^{-9}t^5 + 636.8907 \times 10^{-15}t^7) \div (1 + 9.090169 \times 10^{-6}t^2 + 1.4511976 \times 10^{-9}t^4 + 134.84863 \times 10^{-15}t^6 + 2.008615 \times 10^{-18}t^8), \quad (4)$$

其中, 无地热蒸汽分离和相变系统, $0 < t < 150$ °C; 叠加盐度 (TDS) 变化后流体密度为 $\rho_s = \rho_T + \text{TDS}$ 。根据室内 NaCl 溶解等效实验得到的流体密度随温度、孔隙水压力与盐度变化经验公式 (Phillips *et al.*, 1981, 非饱和蒸汽无相变流体, $10 < T < 350$ °C) 为:

$$\rho_G = -3.033405 + 10.128163x - 8.750567x^2 + 2.663107x^3, \quad (5)$$

$$x = -9.9595e^{-0.004539m} + 7.0845e^{-0.0001638T} + 3.9093e^{0.00002551P}, \quad (6)$$

其中, ρ_G 为地热流体密度, g/cm^3 ; T 为温度 (°C); P 为孔隙水压力 (1~500 bar); m 为 NaCl 等效盐度 (0.2~5.0 mol/L)。

以 Kell 公式获取的地热水出露时密度均相对较低, 低于 Phillips 公式计算的密度, E-V 区部分水样 (SOM 第 II 组) 偏离密度随温度与压力变化曲线 (图 10a~10b), 与流体受海水混合影响导致的盐度与温度升高梯度不协调有关, 亦印证了 SOM-KM 聚类簇第 II 组水样水化学形成控制因素为海水补给混合。以地热水的循环深度 (图 6b) 和冷水混入前的热储温度 (图 7a) 作为地热驱动力计算的起始点, 在仅考虑流体密度发生变化时, 可以通过伯努利方程 $\rho_1gh_1 = \rho_2gh_2$ 或 $\rho_1h_1 = \rho_2h_2$ (ρ_1 和 ρ_2 为地热流体补给时的初始密度和径流变化后的密度, g/cm^3 ; h_1 和 h_2 为

流体补给初始压力水头和释压出露后的流体压力水头, m), 结合流体密度变化, 可以计算出密度变化导致的压力水头变化值(图 10c). 以 Kell 公式计算的密度差引起的压力水头变化范围为 $+1.19 \sim +286.85$ m, 平均为 $+104.25$ m. 仅考虑盐度变化导致的密度差引起的压力水头变化为 $-55.42 \sim -0.10$ m, 以温泉出露与以地热井揭露形式地热水样点补给、径流、释压排泄过程中由密度变化引起的压力水头变化平均值分别为 1.38 m 和 4.55 m, 与广东阳江新洲由盐度增加产生的地热驱动力的标准水头 -2.78 m 相近.

综合考虑盐度、孔隙水静水压力和温度非相变引起的密度变化(Phillips 公式), 获得非重力作用“地热驱动”压力水头范围为 $+1.59 \sim +308.32$ m, 地热井与温泉压力水头变化平均为 112.23 m 和 115.86 m, 较为相近. 广东阳江新洲地热田地热钻井水样平均温度为 93.9°C , 温泉平均温度为 83°C , 由温度和盐度升高产生的地热驱动力标准水头为 $+348.81$ m(毛绪美等, 2022), 福建省中高温地热温泉驱动力压力水头最大值 $+308.32$ m 与其相近. NW-I 区驱动压力水头最大为 $+218.75$ m, 多集中在 $75.38 \sim 95.09$ m. SW 区承压水(地热井)驱动压力水头为 $202.24 \sim 250.60$ m, 泉水则相对较低为 $+158.13 \sim +185.09$ m. 断陷沉积盆地揭露的地热井水平均压力水头 ($+133.93$ m) 显著高于盆地边缘泉水 ($+59.21$ m), 与泉水升流过程中的释压及冷水混入导致的温度-密度下降有关. E-IV 区与 E-IV 区泉水/地热井地热驱动力压力水头为 $+189.40$ m / $+261.72$ m 和 $+308.32$ m / $+196.75$ m, 均相对高于闽西地区. 从 SOM-KM 分类来看, 第 I 组相对高温地热流体驱动力压力水头为 $+250.60 \sim +308.32$ m; 第 II 组水样驱动力压力水头为 $+196.75 \sim +200.21$ m, 海水补给混合导致深部流体盐度与密度显著增大(图 10a~10b), 产生的驱动力水头为负值, 故其温度-密度叠加的压力水头相对低于第 I 组水样; 第 III 组水样受浅层地下水混合明显, 水体驱动力水头为 $+64.35 \sim +104.35$ m, 相对最低. 通过管道模型获取的温泉循环深度多大于 5.0 km(图 10e), 地热井水循环深度主要集中在 3.0 km(图 10d), 显著低于温泉样品, 可能与泉水升流排泄段流速高于地下水补给段与径流区段有关(Saar, 2011). 与此同时, 地热系统中热源位置通常偏向排泄段, 温泉升流过程的温度分布与地温梯度及重力势能的能量转化有关. 在地下水自补给至地热驱动力启动点的运移段, 水头变化几

乎不会发生, 但是由于地热驱动力启动点之后地热水的加速运动, 可能会带动补给运移段地下水的运动加速(毛绪美等, 2022). 地热水上涌的速度越快, 热量损失越小, 出露温度越高. 温泉在升流释压出露过程中, 地热流体与温度较低围岩的热传导损失、压力变化产生的绝热冷却、浅层温度较低地下水的混入等会导致地下水排泄区流体温度(即温泉出露温度)相对降低. 地热驱动力压力水头计算表明, 温泉出露相对钻孔揭露地热井释压更为明显, 而其出露管道面积和实际流速相对高于钻孔揭露区, 导致估算的循环深度偏大.

滨海地热系统断裂带不同位置地热流体密度差产生的非重力“地热驱动力”会导致深部高温低密度流体产生大规模的“自由对流”, 在深大断裂带及其周边区域形成了一个高温、低压、密度低的漏斗, 从而使得断裂带四周地下水流下沉并往热源方向流动, 也使得侵入内陆的海水深循环进入地下深部(Lu *et al.*, 2017; 徐钊一鸣和卢国平, 2017). 深大断裂控制的滨海断陷盆地-海湾展布格局与海水盐度-密度变化支配的压力势驱动, 为现代海水沿 NE 向深大断裂入侵、补给并与深部地热流体混合提供了有利水动力条件. 区域深大断裂多延伸至地壳深处, 具有很高的导水能力, 东南沿海典型地热田测压体系呈现出穹窿状的测压水头面, 使得深大断裂成为地热水快速流动的通道和热传输的有利途径. 深大断裂伴随的优先流动通道亦具有高渗透性, 使得断裂深部流场的影响半径能够达到 $10 \sim 20$ km, 从而驱动深部流体上升到浅层部位甚至溢流出露地表(汪啸, 2018). 故此, 东南沿海内陆地热流体仅由山地边缘的雨水补给, 而沿海地区地热流体经历了海水补给-大气降水入渗补给两次混合过程.

5 结论

(1) 福建省地热资源成藏模式可分为闽西北隆起山地断裂深循环对流型、闽西南断陷盆地对流传导复合型、闽东-闽西南断拗带断裂深循环对流型三种类型, 闽东-闽西南断拗带地热成因根据热储地质建造又可分为闽东火山岩-侵入岩构造残余盆地-深循环断裂对流型、闽东-闽西南花岗岩裂隙型断裂深循环对流型与侵入岩-碎屑沉积岩断陷盆地-断裂深循环对流型三个子类.

(2) 闽西北隆起山地断裂深循环地热水循环深度平均为 $1\,946.4$ m, 热储温度平均为 117.3°C . 地热

水升流过程中冷水混入比例平均为 84.78%, 冷水混入前地热母流体温度平均为 131.2 °C。闽西南断陷盆地对流传导复合型地热热储温度平均为 108.7 °C, 地热水循环深度在 837.9~3 254.2 m, 升流过程中冷水混入比例为 54.8%~93.5%, 混入冷水前地热流体温度平均为 120.5 °C。闽东侵入岩-火山岩建造区地热水循环深度平均为 2 255.9 m (771.8~4 064.8 m), 升流过程中冷水混入比例平均为 82.9%, 冷水混入前地热母流体温度平均为 144.3 °C。闽西南侵入岩建造区地热热储温度平均为 123.2 °C, 循环深度平均为 2 974.6 m; 升流过程中冷水混入比例为 51.1%~95.9%, 混入冷水前地热流体温度为 88.9~145.4 °C。闽西南侵入岩-碎屑沉积岩建造区地热热储温度在 59.2~153.6 °C, 地热水循环深度平均为 2 406.9 m, 升流过程中冷水混入比例为 68.3%~97.3%, 混入冷水前地热流体温度平均为 137.2 °C。

(4) 滨海侵入岩-火山岩建造区地热热储温度平均为 116.3 °C (58.5~155.9 °C), 循环深度在 771.8 m~4 064.8 m, 升流过程中冷水混入比例平均为 76.3% (50.5%~92.5%)。深循环地热水升流过程中经历了与高密度高盐度海水及浅层地下水(大气降水)的两次混合过程, 滨海地区 89.19% 地热水样受到海水补给混合影响, 福州、莆田和泉州湾、厦门湾, 以及漳州地区地热流体中海水混入比例分别为 22.54%~81.77%、8.87%~34.69%、5.83%~31.65% 和 1.28%~33.17%。

(5) 福建省政和-大浦断裂以西武夷隆起带与断裂以东东南沿海陆缘带具有不同的热源机制, 但水热通道形式相对统一。闽西武夷隆起区地热系统热源主要为幔源热, 闽东沿海火山坳陷带岩石圈为“热壳冷幔”热结构, 壳内岩体放射性衰变产热对浅部聚热的贡献相对较高。区域张性-张扭性 NW 向断裂构成地热系统的导水通道, 而压性破裂为主的 NE 向断裂则构成了地热系统热聚敛的阻水-导热通道。

(6) 由温度和盐度变化导致的闽西北、闽西南和闽东火山断坳带与滨海地区地热驱动力的标准水头为 +218.75 m、+202.24~+250.60 m、+261.72 m 和 +308.32 m。闽中地幔坳陷向闽西北地幔隆起带过渡区域的永梅坳陷带, 闽东 NW 向与 NE 向深大断裂交汇处, 福州盆地、漳州盆地等断陷盆地基底隆起带, 永泰-德化-仙游等环状火山构造带与 NE 向深大断裂交汇处(德化南埕等)地热热储温度超过 150 °C,

为福建省域内中高温地热资源成藏潜力区。

References

- Bath, A. H., Williamson, K. H., 1983. Isotopic and Chemical Evidence for Water Sources and Mixing in the Cerro Pando Geothermal Area, Republic of Panama. *Geothermics*, 12(2-3): 177-184. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(83\)90028-7](https://doi.org/10.1016/0375-6505(83)90028-7)
- Batzle, M., Wang, Z. J., 1992. Seismic Properties of Pore Fluids. *Geophysics*, 57(11): 1396-1408. <https://doi.org/10.1190/1.1443207>
- Chen, G. N., Grapes, R., 2007. Granite Genesis: In Situ Melting and Crustal Evolution. Springer, Dordrecht. <https://doi.org/10.1007/978-1-4020-5891-2>
- Chen, J. C., Chen, J., Zhang, X. C. J., et al., 2024. Stable Hydrogen Isoscape in Precipitation Generated Using Data Fusion for East China. *Science in China (Series D)*, 54(9): 3023-3039 (in Chinese with English abstract).
- Chen, L. M., 2019. Isotopic Characteristic Analysis of Hydrogen-Oxygen Environment in Geothermal Water in Fujian Province. *Geology of Fujian*, 38(1): 61-68 (in Chinese with English abstract).
- Chen, T. D., 2018. Petroleum Geology Condition Analysis and Exploration Targets in Fujian, Zhejiang and Jiangxi Area (Dissertation). China University of Petroleum, Dongying (in Chinese with English abstract).
- Chen, Y. T., Wang, Z. P., Huang, Q. T., et al., 1998. Downfaulted Basin, Plain, Bay and Earthquakes of Coastland in Fujian Province. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 18(4): 55-61 (in Chinese with English abstract).
- Craig, H., 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science*, 133(3465): 1702-1703. <https://doi.org/10.1126/science.133.3465.1702>
- Dansgaard, W., 1964. Stable Isotopes in Precipitation. *Tellus*, 16(4): 436-468. <https://doi.org/10.1111/j.2153-3490.1964.tb00181.x>
- Dong, S. W., Li, J. H., Cawood, P. A., et al., 2020. Mantle Influx Compensates Crustal Thinning beneath the Cathaysia Block, South China: Evidence from SINO-PROBE Reflection Profiling. *Earth and Planetary Science Letters*, 544: 116360. <https://doi.org/10.1016/j.epsl.2020.116360>
- Faure, M., Chen, Y., Feng, Z. H., et al., 2017. Tectonics and Geodynamics of South China: An Introductory Note. *Journal of Asian Earth Sciences*, 141: 1-6. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2016.11.031>
- Fournier, R. O., 1977. Chemical Geothermometers and Mix-

- ing Models for Geothermal Systems. *Geothermics*, 5(1—4): 41—50. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(77\)90007-4](https://doi.org/10.1016/0375-6505(77)90007-4)
- Fournier, R. O., Truesdell, A. H., 1973. An Empirical Na-K-Ca Geothermometer for Natural Waters. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 37(5): 1255—1275. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(73\)90060-4](https://doi.org/10.1016/0016-7037(73)90060-4)
- Gan, H. N., 2023. Thermo-Rheological Structure of the Lithosphere and Geodynamic Evolution of the Coastal Fujian and Adjacent Region, China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).
- Gan, H. N., Wang, G. L., Wang, X., et al., 2019. Research on the Hydrochemistry and Fault Control Mechanism of Geothermal Water in Northwestern Zhangzhou Basin. *Geofluids*, 2019: 3925462. <https://doi.org/10.1155/2019/3925462>
- Gan, Q. L., 2023. Preliminary Exploration of Geological Characteristics and Metallogenic Regularity of Feiluan Geothermal Resources in Ningde City, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 42(1): 48—55 (in Chinese with English abstract).
- Ghomshei, M. M., Clark, I. D., 1993. Oxygen and Hydrogen Isotopes in Deep Thermal Waters from the South Meager Creek Geothermal Area, British Columbia, Canada. *Geothermics*, 22(2): 79—89. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(93\)90048-R](https://doi.org/10.1016/0375-6505(93)90048-R)
- Giggenbach, W. F., 1988. Geothermal Solute Equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca Geoindicators. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 52(12): 2749—2765. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(88\)90143-3](https://doi.org/10.1016/0016-7037(88)90143-3)
- Giggenbach, W. F., 1992. Isotopic Shifts in Waters from Geothermal and Volcanic Systems along Convergent Plate Boundaries and Their Origin. *Earth and Planetary Science Letters*, 113(4): 495—510. [https://doi.org/10.1016/0012-821X\(92\)90127-H](https://doi.org/10.1016/0012-821X(92)90127-H)
- Guo, F., Wu, Y. M., Zhang, B., et al., 2021. Magmatic Responses to Cretaceous Subduction and Tearing of the Paleo-Pacific Plate in SE China: An Overview. *Earth-Science Reviews*, 212: 103448. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2020.103448>
- Hochstein, M. P., Yang, Z. K., Ehara, S., 1990. The Fuzhou Geothermal System (People's Republic of China): Modelling Study of a Low Temperature Fracture-Zone System. *Geothermics*, 19(1): 43—60. [https://doi.org/10.1016/0375-6505\(90\)90065-J](https://doi.org/10.1016/0375-6505(90)90065-J)
- Hu, S. B., Wang, J. Y., 2000. Heat Flow, Deep Temperature and Thermal Structure across the Orogenic Belts in Southeast China. *Journal of Geodynamics*, 30(4): 461—473. [https://doi.org/10.1016/S0264-3707\(00\)00010-7](https://doi.org/10.1016/S0264-3707(00)00010-7)
- Huang, C. Q., Lin, F. J., Ye, B. F., 2018. The Characteristics of Radioactive Heat Production Rate and Assessment of Hot Dry Rock in High-Value Areas of Heat Flow, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 37(3): 227—237 (in Chinese with English abstract).
- Huang, H. F., Goff, F., 1986. Hydrogeochemistry and Reservoir Model of Fuzhou Geothermal Field, China. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 27(3—4): 203—227. [https://doi.org/10.1016/0377-0273\(86\)90014-4](https://doi.org/10.1016/0377-0273(86)90014-4)
- Huang, R., Xu, Y. X., Zhu, L. P., et al., 2015. Detailed Moho Geometry beneath Southeastern China and Its Implications on Thinning of Continental Crust. *Journal of Asian Earth Sciences*, 112: 42—48. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2015.09.002>
- Institute of Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 1992. Geothermal Geophysical Research in Fujian Province. China Science and Technology Press, Beijing (in Chinese).
- Jia, W. H., Liu, K., Yan, J. K., et al., 2024. Characteristics of Geothermal Waters in Eastern Wugongshan Based on Hydrogen, Oxygen, and Strontium Isotopes. *Applied Geochemistry*, 161: 105874. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2023.105874>
- Jiang, G. Z., Gao, P., Rao, S., et al., 2016. Compilation of Heat Flow Data in the Continental Area of China (4th Edition). *Chinese Journal of Geophysics*, 59(8): 2892—2910 (in Chinese with English abstract).
- Jiang, G. Z., Hu, S. B., Shi, Y. Z., et al., 2019. Terrestrial Heat Flow of Continental China: Updated Dataset and Tectonic Implications. *Tectonophysics*, 753: 36—48. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2019.01.006>
- Kang, F. X., Sui, H. B., Zheng, T. T., et al., 2024. Formation Mechanism of Cold Springs and Hot Springs in Karst Groundwater Systems in North China: A Study of Baotu Spring. *Earth Science*, 49(8): 2862—2878 (in Chinese with English abstract).
- Kell, G. S., 1977. Effects of Isotopic Composition, Temperature, Pressure, and Dissolved Gases on the Density of Liquid Water. *Journal of Physical and Chemical Reference Data*, 6(4): 1109—1131. <https://doi.org/10.1063/1.555561>
- Li, C. L., 2019. Geological and Geochemical Characteristics of Tangyang Geothermal Anomalies Area in Zhangzhou, Fujian Province (Dissertation). China University of Mining and Technology, Xuzhou (in Chinese with English abstract).

- Li, J. X., Sagoe, G., Yang, G., et al., 2018a. Evaluation of Mineral-Aqueous Chemical Equilibria of Felsic Reservoirs with Low-Medium Temperature: A Comparative Study in Yangbajing Geothermal Field and Guangdong Geothermal Fields. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 352: 92–105. <https://doi.org/10.1016/j.jvolgeores.2018.01.008>
- Li, K. F., Zhu, C. Q., 2023. Heat Generation Rate of Granite in the Cathaysia Block and Its Influence on Geothermal Fields, SouthEast China. *Petroleum Science Bulletin*, 8(3): 259–289 (in Chinese with English abstract).
- Li, Q. L., 2021. Geothermal Characteristics and Prospect Analysis of Longmen Canyon in Dehua County, Fujian Province. *Geology of Fujian*, 40(4): 305–313 (in Chinese with English abstract).
- Li, R., Chen, Q. C., Zhang, C. Y., et al., 2016. In Situ Stress Characteristics in the Western Coast of Taiwan Strait. *Acta Geologica Sinica*, 90(8): 1703–1714 (in Chinese with English abstract).
- Li, S., Han, J. T., Liu, L. J., et al., 2022. The Deep Electrical Structure and Thermal Characteristics of the Zhangshu - Ningde Magnetotelluric Profile in South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 65(4): 1354–1375 (in Chinese with English abstract).
- Li, Z., Wang, X. C., Wilde, S. A., et al., 2018b. Role of Deep-Earth Water Cycling in the Growth and Evolution of Continental Crust: Constraints from Cretaceous Magmatism in SouthEast China. *Lithos*, 302: 126–141. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2017.12.028>
- Liang, C. H., Xu, X. S., He, Z. Y., 2022. Connected Volcanic and Plutonic Association by Crystal-Melt Segregation in the Daiyunshan Volcanic Field, SE China. *Tectonophysics*, 836: 229409. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2022.229409>
- Liao, Z. J., 2012. Deep-Circulation Hydrothermal Systems without Magmatic Heat Source in Fujian Province. *Geoscience*, 26(1): 85–98 (in Chinese with English abstract).
- Lin, L. F., Sun, Z. X., Wang, A. D., et al., 2017. Radioactive Geochemical Characteristics of Mesozoic Granites from Nanling Region and Southeast Coastal Region and Their Constraints on Lithospheric Thermal Structure. *Acta Petrologica et Mineralogica*, 36(4): 488–500 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W. J., Chen, X. Y., Gan, H. N., et al., 2020. Geothermal, Geological Characteristics and Exploration Direction of Hot Dry Rocks in the Xiamen Bay-Zhangzhou Basin, Southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 2066–2077 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W. J., Wang, G. L., Gan, H. N., et al., 2023. Heat Source Model for Enhanced Geothermal Systems (EGS) under Different Geological Conditions in China. *Gondwana Research*, 122: 243–259. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2022.08.007>
- Lin, W. J., Wang, G. L., Gan, H. N., 2024. Differential Crustal Thermal Structure and Geothermal Significance in the Igneous Region of Southeastern China. *Acta Geologica Sinica*, 98(2): 544–557 (in Chinese with English abstract).
- Lin, W. J., Yin, X. X., 2022. Temperature Estimation of a Deep Geothermal Reservoir Based on Multiple Methods: A Case Study in Southeastern China. *Water*, 14(20): 3205. <https://doi.org/10.3390/w14203205>
- Liu, C. L., Li, Y. S., Cao, S. W., et al., 2022. Effects of Seawater Recharge on the Formation of Geothermal Resources in Coastal Areas and Their Mechanisms: A Case Study of Xiamen City, Fujian Province, China. *Frontiers in Earth Science*, 10: 872620. <https://doi.org/10.3389/feart.2022.872620>
- Liu, C. L., Zhang, Y. J., Li, Y. S., 2025. Distribution Characteristics and Genesis of Seawater-Replenished Geothermal Systems on the Western Coast of the Taiwan Strait. *Geothermics*, 131: 103368. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2025.103368>
- Liu, J. R., Song, X. F., Yuan, G. F., et al., 2009. Characteristics of $\delta^{18}\text{O}$ in Precipitation over Eastern Monsoon China and the Water Vapor Sources. *Chinese Science Bulletin*, 54(22): 3521–3531 (in Chinese).
- Liu, K. K., Yui, T. F., Shieh, Y. N., et al., 1990. Hydrogen and Oxygen Isotopic Compositions of Meteoric and Thermal Waters from the Chingshui Geothermal Area, Northern Taiwan. *Proceedings of the Geological Society of China*, 33(2): 143–165.
- Lu, G. P., Wang, X., Li, F. S., et al., 2017. Deep Geothermal Processes Acting on Faults and Solid Tides in Coastal Xinzhou Geothermal Field, Guangdong, China. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 264: 76–88. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2016.12.004>
- Luo, J., Li, Y. M., Tian, J., et al., 2022. Geochemistry of Geothermal Fluid with Implications on Circulation and Evolution in Fengshun - Tangkeng Geothermal Field, South China. *Geothermics*, 100: 102323. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102323>
- Lyu, H. J., Yang, Z. H., Chen, H. Q., 1989. The “Earthquake Window” and Its Mechanism at Zhangzhou - Huaan, Fujian Province. *Seismology and Geology*, 11(2): 33–38 (in Chinese with English abstract).

- Ma, F., Wang, G. L., Sun, H. L., et al., 2022. Indication of Hydrogen and Oxygen Stable Isotopes on the Characteristics and Circulation Patterns of Medium-Low Temperature Geothermal Resources in the Guanzhong Basin, China. *Journal of Groundwater Science and Engineering*, 10(1): 70–86. <https://doi.org/10.19637/j.cnki.2305-7068.2022.01.007>
- Mao, X. M., Ye, J. Q., Dong, Y. Q., et al., 2022. Geothermal Driving Force: A New Additional Non-Gravity Action Driving the Migration of Geothermal Water in the Xinzhou Geothermal Field of Yangjiang, Guangdong. *Bulletin of Geological Science and Technology*, 41(1): 137–145 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Z. H., 1987. Zhangzhou Basin Geothermal System-Genesis Model, Energy Potential and the Occurrence of Thermal Water (Dissertation). Institute of Geology and Geophysics, CAS, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Pang, Z. H., Fan, Z. C., Wang, J. Y., 1990. Isotope Evidence for Geothermal Water Genesis and Seawater Involvement in Zhangzhou Basin, Southeast China. *Geochimica*, 19(4): 296–302 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Z. H., Kong, Y. L., Li, J., et al., 2017. An Isotopic Geoinicator in the Hydrological Cycle. *Procedia Earth and Planetary Science*, 17: 534–537. <https://doi.org/10.1016/j.proeps.2016.12.135>
- Phillips, S. L., Igbene, A., Fair, J. A., et al., 1981. A Technical Databook for Geothermal Energy Utilization. Lawrence Berkeley National Laboratory, Berkeley.
- Qi, S. H., 2021. Geothermal Geochemical Exploration. Science Press, Beijing (in Chinese).
- Rybach, L., Muffler, L. J. P., 1987. Geothermal Systems Principles and Case Histories. Translated by Geothermal Research of Department of Geology, Peking University. Geological Publishing House, Beijing.
- Saar, M. O., 2011. Review: Geothermal Heat as a Tracer of Large-Scale Groundwater Flow and as a Means to Determine Permeability Fields. *Hydrogeology Journal*, 19(1): 31–52. <https://doi.org/10.1007/s10040-010-0657-2>
- Shi, Z. D., Mao, X. M., Ye, J. Q., et al., 2024. Source Analysis of Sodium of Low-Salinity High-Sodium Geothermal Water in Huangshadong Geothermal Field from East Guangdong. *Earth Science*, 49(1): 271–287 (in Chinese with English abstract).
- Shu, L. S., Yao, J. L., Wang, B., et al., 2021. Neoproterozoic Plate Tectonic Process and Phanerozoic Geodynamic Evolution of the South China Block. *Earth-Science Reviews*, 216: 103596. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2021.103596>
- Stefánsson, A., Arnórsson, S., Sveinbjörnsdóttir, Á. E., et al., 2019. Isotope (δD , $\delta^{18}O$, $3H$, $\delta^{13}C$, ^{14}C) and Chemical (B, Cl) Constrains on Water Origin, Mixing, Water-Rock Interaction and Age of Low-Temperature Geothermal Water. *Applied Geochemistry*, 108: 104380. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.104380>
- Sun, H. Y., 2023. Mechanism of Strontium Enrichment in Sallow Groundwater Driven by the Coupling of Rock Weathering and Water-Rock Interaction in Central Chengde (Dissertation). China University of Geosciences, Beijing (in Chinese with English abstract).
- Sun, H. Y., Ma, F., Wang, G. L., et al., 2025a. Spatial Variation Characteristics and Source Apportionment of Geothermal Hydrochemical Components with Therapeutic Benefits in Fujian Province Based on Machine Learning. *Acta Geologica Sinica*, Online (in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024440>
- Sun, H. Y., Ma, F., Zhu, X., et al., 2025b. Hydrogeochemical Evolution of Geothermal Fluids and Its Indications in the Yanshan Uplift-North China Fault Basin, Northern Hebei. *Acta Geologica Sinica*, 99(5): 1711–1742 (in Chinese with English abstract).
- Sun, H. Y., Sun, X. M., Wei, X. F., et al., 2023. Geochemical Characteristics and Origin of Nuanquanzi Geothermal Water in Yudaokou, Chengde, Hebei, North China. *Journal of Earth Science*, 34(3): 838–856. <https://doi.org/10.1007/s12583-022-1635-z>
- Temizel, E. H., Gültekin, F., Ersoy, A. F., et al., 2021. Multi-Isotopic (O, H, C, S, Sr, B, Li) Characterization of Waters in a Low-Enthalpy Geothermal System in Havza (Samsun), Turkey. *Geothermics*, 97: 102240. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2021.102240>
- Teng, J. W., Si, X., Zhuang, Q. X., et al., 2017. Abnormal Structure of Crust and Mantle and Analysis of Deep Thermal Potential in Fujian Continental Margin. *Science Technology and Engineering*, 17(17): 6–38 (in Chinese with English abstract).
- Tian, J., Stefánsson, A., Li, Y. M., et al., 2023. Geochemistry of Thermal Fluids and the Genesis of Granite-Hosted Huangshadong Geothermal System, SouthEast China. *Geothermics*, 109: 102647. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2023.102647>
- Tóth, J., 1999. Groundwater as a Geologic Agent: An Overview of the Causes, Processes, and Manifestations. *Hy-*

- drogeology Journal*, 7(1): 1–14. <https://doi.org/10.1007/s100400050176>
- Wagner, W., Kretzschmar, H. J., 2008. International Steam Tables: Properties of Water and Steam Based on the Industrial Formulation IAPWS—IF97 (Second Edition). Springer-Verlag, Berlin.
- Wan, T. F., Chu, M. J., Chen, M. Y., 1988. Thermal Regimes of the Lithosphere and Geothermal Resources Potential in Fujian Province. *Acta Geological Sinica*, 62(2): 178–189 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Lin, W. J., Liu, F., et al., 2023. Theory and Survey Practice of Deep Heat Accumulation in Geothermal System and Exploration Practice. *Acta Geologica Sinica*, 97(3): 639–660 (in Chinese with English abstract).
- Wang, G. L., Lin, W. J., 2020. Main Hydro-Geothermal Systems and Their Genetic Models in China. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923–1937 (in Chinese with English abstract).
- Wang, J., Chen, G. N., Grapes, R., et al., 2011. The Relationship between Evolution of the Intracrustal Magma Layer and Development of Basins: An Example from the Mesozoic Basins in SouthEast China. *Earth Science Frontiers*, 18(1): 24–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang, K., Xiong, X., 2012. Refining Thermal Structure of the Lithosphere in Eastern Section of Heishui-Quanzhou Geotranssect with Geodetic Observations. *Progress in Geophysics*, 27(4): 1366–1376 (in Chinese with English abstract).
- Wang, S. J., Zhang, M., Huang, X. L., et al., 2024. Geothermometry Calculation and Geothermal Fluid Evolution of Karst Geothermal Reservoir in Longmen County, Guangdong Province. *Earth Science*, 49(3): 992–1004 (in Chinese with English abstract).
- Wang, X., Lu, G. P., Hu, B. X., 2018. Hydrogeochemical Characteristics and Geothermometry Applications of Thermal Waters in Coastal Xinzhou and Shenzao Geothermal Fields, Guangdong, China. *Geofluids*, 2018(1): 8715080. <https://doi.org/10.1155/2018/8715080>
- Wang, X., 2018. Formation Conditions and Hydrogeochemical Characteristics of the Geothermal Water in Typical Coastal Geothermal Field with Deep Faults, Guangdong Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Wang, Y. J., Fan, W. M., Zhang, G. W., et al., 2013. Phanerozoic Tectonics of the South China Block: Key Observations and Controversies. *Gondwana Research*, 23(4): 1273–1305. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2012.02.019>
- Wei, S. Y., Liu, S. C., Ao, G. H., et al., 1988. The Geothermal Activity and the Characteristics of Geophysics Field in Continental Margin of Fujian Province. *North-western Seismological Journal*, 10(3): 74–81 (in Chinese with English abstract).
- Wu, C. F., Xu, D., Yang, S. J., et al., 2025. Deep Thermal State on the Southern Margin of the Zhangzhou Basin Based on the Electrical Conductivity Model. *Geothermics*, 125: 103188. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.103188>
- Xiao, Z. C., Wang, S., Qi, S. H., et al., 2023. Crustal Thermo-Structure and Geothermal Implication of the Huangshadong Geothermal Field in Guangdong Province. *Journal of Earth Science*, 34(1): 194–204. <https://doi.org/10.1007/s12583-021-1486-z>
- Xie, Y. N., Cheng, F. P., He, R. Y., et al., 1986. Hydrogen and Oxygen Isotopes of Precipitation and Geothermal Water in Taiwan Province. *Geology-Geochemistry*, 14(3): 42–46 (in Chinese).
- Xiong, S. B., Liu, H. B., Wang, Y. X., 2002. A Study on Velocity Distribution in Upper Crust and Tectonics of Basement and Cover in South China. *Chinese Journal of Geophysics*, 45(6): 784–791, 902–904 (in Chinese with English abstract).
- Xu, F. Y. M., Lu, G. P., 2017. Hydrochemical Characteristics of Xinzhou Geothermal Field, Coastal Guangdong and the Hydrodynamic Characteristics of Seawater Intrusion in the Field. *Safety and Environmental Engineering*, 24(1): 1–10 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Q. J., Liu, S. F., Wang, Z. F., et al., 2019. Provenance of the East Guangdong Basin and Yong'an Basin in SouthEast China: Response to the Mesozoic Tectonic Regime Transformation. *Journal of Asian Earth Sciences*, 185: 104024. <https://doi.org/10.1016/j.jseaes.2019.104024>
- Xu, X. S., Wang, X. Y., Ma, Z. W., et al., 2024. Petrogenesis of Episodic Volcanic-Intrusive Rocks in SE China: Crystal-Melt Segregation and Magma Mixing. *Chemical Geology*, 670: 122457. <https://doi.org/10.1016/j.chemgeo.2024.122457>
- Xu, X. S., Zhao, K., He, Z. Y., et al., 2021. Cretaceous Volcanic-Plutonic Magmatism in SE China and a Genetic Model. *Lithos*, 402: 105728. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105728>
- Ye, J. Q., Mao, X. M., 2024. Changes of Temperature and Driving Force during Phase Change in High Temperature Hydrothermal System. *Earth Science*, 49(10): 1273–1305.

- 3773—3783 (in Chinese with English abstract).
- Yu, M. G., Hong, W. T., Yang, Z. L., et al., 2021. Classification of Yanshanian Volcanic Cycle and the Related Mineralization in the Coast Area of Southeastern China. *Geological Bulletin of China*, 40(6): 845—863 (in Chinese with English abstract).
- Yuan, H. W., Jing, T. Y., Yin, Y. L., et al., 2024. Geothermal Model and Development Area of a Fault-Controlled Geothermal Zone along the Fujian Coastal Area of Southeastern China. *Natural Gas Industry B*, 11(1): 28—41. <https://doi.org/10.1016/j.ngib.2024.01.005>
- Zhang, C. R., Zhang, G. B., Jiang, G. M., et al., 2021. Seismic Pumping for Mineralization in Southern Fujian, Cathaysia Block: New Insights from a Teleseismic Full Waveform Inversion. *Ore Geology Reviews*, 131: 104036. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2021.104036>
- Zhang, C. Y., Li, B., Li, H. L., et al., 2023. Stress Estimation in a 3 km-Deep Geothermal Borehole: A Snapshot of Stress State in Southern Cathaysia Block, China. *Tectonophysics*, 864: 230031. <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2023.230031>
- Zhang, J., He, Y. B., Fan, Y. X., 2024. Geophysical Analysis of Heat Source Composition in the Fujian Coastal Geothermal Anomaly Area. *Earth Science Frontiers*, 31(3): 392—401 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, J., Wang, B. Y., Tang, X. C., et al., 2018. Temperature Structure and Dynamic Background of Crust and Mantle beneath the High Heat Flow Area of the South China Continental Margin. *Chinese Journal of Geophysics*, 61(10): 3917—3932 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, K., Ma, H. M., Cai, J. B., 2002. Discussion on the Origins of Hot Spring along the Coast of South China. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 41(1): 82—86 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, F. Y., Suo, Y. H., Liu, L. J., et al., 2023. Fine Lithospheric Structure Controlling Meso-Cenozoic Tectono-Magmatism in the South China Block: Inference from a Multidisciplinary Analysis. *Earth - Science Reviews*, 244: 104524. <https://doi.org/10.1016/j.earsci-rev.2023.104524>
- Zhao, L. L., 2011. Analysis on Gui'an Geothermal Resource Potential in Lianjiang County of Fujian Province (Dissertation). China University of Geosciences, Wuhan (in Chinese with English abstract).
- Zhao, P., Wang, J. Y., Wang, J. A., et al., 1995. Characteristics of Heat Production Distribution in SE China. *Acta Petrologica Sinica*, 11(3): 292—305 (in Chinese with English abstract).
- Zhao, Y. H., Yang, J. Y., Wang, H., et al., 2017. Hydrogen and Oxygen Isotope Distribution Characteristics of Geothermal Water. *Progress in Geophysics*, 32(6): 2415—2423 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, H. R., Luo, J., 2024. Progress in Research on the Exploration and Evaluation of Deep Geothermal Resources in the Fujian - Guangdong - Hainan Region, China. *Energy Geoscience*, 5(2): 100232. <https://doi.org/10.1016/j.engeos.2023.100232>
- Zhou, P. X., Xia, S. H., Hetényi, G., et al., 2020a. Seismic Imaging of a Mid-Crustal Low-Velocity Layer beneath the Northern Coast of the South China Sea and Its Tectonic Implications. *Physics of the Earth and Planetary Interiors*, 308: 106573. <https://doi.org/10.1016/j.pepi.2020.106573>
- Zhou, X. M., Li, W. X., 2000. Origin of Late Mesozoic Igneous Rocks in Southeastern China: Implications for Lithosphere Subduction and Underplating of Mafic Magmas. *Tectonophysics*, 326(3—4): 269—287. [https://doi.org/10.1016/S0040-1951\(00\)00120-7](https://doi.org/10.1016/S0040-1951(00)00120-7)
- Zhou, X., Song, C., Li, T., 2016. Estimation of the Inland Extending Length of the Freshwater-Saltwater Interface in Coastal Unconfined Aquifers. *Hydrological Sciences Journal*, 61(13): 2367—2375. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1111516>
- Zhou, X., Zhuo, L. Y., Wu, Y. Q., et al., 2023. Origin of Some Hot Springs as Conceptual Geothermal Models. *Journal of Hydrology*, 624: 129927. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129927>
- Zhou, Z. M., Ma, C. Q., Qi, S. H., et al., 2020b. Late Mesozoic High-Heat-Producing (HHP) and High-Temperature Geothermal Reservoir Granitoids: The Most Significant Geothermal Mechanism in South China. *Lithos*, 366: 105568. <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2020.105568>
- Zhuang, Q. X., Li, D. W., Zheng, S. G., et al., 2019. Study on Geothermal Resources and Geological Response of Deep High Temperature Rock Mass in Zhangzhou Basin and Its Adjacent Areas. Geological Publishing House, Beijing (in Chinese).
- Zu, F. P., 2012. Evolution Features of Sedimentary and Structural Environment of Representative Basins since Late Palaeozoic in Southeast China (Dissertation). Nanjing University, Nanjing (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

- 陈佳澄, 陈杰, Zhang, X. C. J., 等, 2024. 基于数据融合的中国东部降水氢稳定同位素数据集. 中国科学(D辑), 54(9): 3023—3039.
- 陈礼明, 2019. 福建地热水氢氧环境同位素特征浅析. 福建地质, 38(1): 61—68.
- 陈廷东, 2018. 闽浙赣地区油气地质条件分析与勘探选区(硕士学位论文). 东营: 中国石油大学(华东).
- 陈园田, 王志鹏, 黄卿团, 等, 1998. 福建沿海的断陷盆地、平原、海湾与地震. 地壳形变与地震, 18(4): 55—61.
- 甘浩男, 2023. 福建沿海及邻区岩石圈热-流变结构及其构造演化(博士学位论文). 南京: 南京大学.
- 甘秋玲, 2023. 福建宁德飞鸾地热资源地质特征及成矿规律探讨. 福建地质, 42(1): 48—55.
- 黄昌旗, 林锋杰, 叶冰斐, 2018. 福建大地热流高值区岩体岩石放射性生热率特征及与干热岩有关的指标评价. 福建地质, 37(3): 227—237.
- 中国科学院地球物理研究所, 1992. 福建地热地球物理研究. 北京: 中国科学技术出版社.
- 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). 地球物理学报, 59(8): 2892—2910.
- 康凤新, 隋海波, 郑婷婷, 等, 2024. 岩溶地下水系统冷泉和热泉的形成机制: 以趵突泉群为例. 地球科学, 49(8): 2862—2878.
- 李成龙, 2019. 福建漳州汤洋地温异常区的地质与地球化学特征研究(硕士学位论文). 徐州: 中国矿业大学.
- 李科甫, 朱传庆, 2023. 华夏地块花岗岩生热率特征及其对地温场的影响. 石油科学通报, 8(3): 259—289.
- 李全力, 2021. 福建德化龙门大峡谷地热特征及前景分析. 福建地质, 40(4): 305—313.
- 李冉, 陈群策, 张重远, 等, 2016. 台湾海峡西岸地应力特征研究. 地质学报, 90(8): 1703—1714.
- 李帅, 韩江涛, 刘立家, 等, 2022. 华南地区樟树-宁德大地电磁测深剖面深部电性结构及热特征. 地球物理学报, 65(4): 1354—1375.
- 廖志杰, 2012. 福建无岩浆热源的深循环水热系统. 现代地质, 26(1): 85—98.
- 林乐夫, 孙占学, 王安东, 等, 2017. 南岭地区与东南沿海地区中生代花岗岩放射性地球化学特征及岩石圈热结构对比研究. 岩石矿物学杂志, 36(4): 488—500.
- 蔺文静, 陈向阳, 甘浩男, 等, 2020. 东南沿海厦门湾-漳州盆地地热地质特征及干热岩勘查方向. 地质学报, 94(7): 2066—2077.
- 蔺文静, 王贵玲, 甘浩男, 2024. 华南陆缘火成岩区差异性地壳热结构及地热意义. 地质学报, 98(2): 544—557.
- 柳鉴容, 宋献方, 袁国富, 等, 2009. 中国东部季风区大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 的特征及水汽来源. 科学通报, 54(22): 3521—3531.
- 吕浩江, 杨志辉, 陈辉琼, 1989. 漳州-华安“地震窗”及其机制. 地震地质, 11(2): 33—38.
- 毛绪美, 叶建桥, 董亚群, 等, 2022. 地热驱动力: 广东阳江新洲地热田驱动地热水运移的一种额外非重力作用的分析方法. 地质科技通报, 41(1): 137—145.
- 庞忠和, 樊志成, 汪集旻, 1990. 漳州盆地地下热水成因与海水混入的同位素证据. 地球化学, 19(4): 296—302.
- 庞忠和, 1987. 漳州盆地地热系统-成因模式、热能潜力与热水分布规律的研究(博士学位论文). 北京: 中国科学院地质与地球物理研究所.
- 祁士华, 2021. 地热地球化学勘查. 北京: 科学出版社.
- 史自德, 毛绪美, 叶建桥, 等, 2024. 中低温地热系统低盐度地热水高含量钠的地球化学成因: 以广东惠州黄沙洞地热田为例. 地球科学, 49(1): 271—287.
- 孙厚云, 2023. 承德中部浅层地下水铀富集的岩石风化与水岩作用驱动机制(博士学位论文). 北京: 中国地质大学.
- 孙厚云, 马峰, 王贵玲, 等, 2025a. 基于机器学习的福建省地热温泉理疗热矿水元素空间分异特征与物源解析. 地质学报, 在线出版. <https://doi.org/10.19762/j.cnki.dizhixuebao.2024440>.
- 孙厚云, 马峰, 朱喜, 等, 2025b. 冀北燕山隆起-华北断陷盆地地热流体地球化学特征及地热能意义. 地质学报, 99(5): 1711—1742.
- 滕吉文, 司芴, 庄庆祥, 等, 2017. 福建陆缘壳幔异常结构与深部热储潜能分析. 科学技术与工程, 17(17): 6—38.
- 万天丰, 褚明记, 陈明佑, 1988. 福建省岩石圈的热状态与地热资源的远景评价. 地质学报, 62(2): 178—189.
- 王贵玲, 蔺文静, 刘峰, 等, 2023. 地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践. 地质学报, 97(3): 639—660.
- 王贵玲, 蔺文静, 2020. 我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式. 地质学报, 94(7): 1923—1937.
- 王晶, 陈国能, Grapes, R., 等, 2011. 壳内岩浆层演化的盆地效应: 以中国东南部中生代盆地为例. 地学前缘, 18(1): 24—31.
- 王恺, 熊熊, 2012. 利用大地测量和地热资料联合确定黑水-泉州地质断面东段岩石圈热及强度结构. 地球物理学进展, 27(4): 1366—1376.
- 王思佳, 张敏, 黄学莲, 等, 2024. 广东省龙门岩溶热储温度计算及流体演化特征. 地球科学, 49(3): 992—1004.
- 汪啸, 2018. 广东沿海典型深大断裂带地热水系统形成条件及水文地球化学特征(博士学位论文). 武汉: 中国地质大学.
- 魏斯禹, 刘绍成, 敖光华, 等, 1988. 我国福建陆缘地带的地热活动与地球物理场特征. 西北地震学报, 10(3): 74—81.
- 谢越宁, 程枫萍, 何瑞因, 等, 1986. 台湾大气降水和地热水的氢、氧同位素研究. 地质地球化学, 14(3): 42—46.

- 熊绍柏,刘宏兵,王有学,等,2002.华南上地壳速度分布与基底、盖层构造研究.地球物理学报,45(6):784—791,902—904.
- 徐钊一鸣,卢国平,2017.广东海岸带型新洲地热田水化学及海水入侵水动力特征.安全与环境工程,24(1):1—10.
- 叶建桥,毛绪美,2024.高温水热系统中相变时温度和驱动力的变化.地球科学,49(10):3773—3783.
- 余明刚,洪文涛,杨祝良,等,2021.东南沿海燕山期火山活动旋回划分及其成矿规律.地质通报,40(6):845—863.
- 张健,何雨蓓,范艳霞,2024.福建沿海地区地热异常热源成因的地球物理分析.地学前缘,31(3):392—401.
- 张健,王蓓羽,唐显春,等,2018.华南陆缘高热流区的壳幔温度结构与动力学背景.地球物理学报,61(10):3917—3932.
- 张珂,马浩明,蔡剑波,2002.华南沿海温泉成因探讨.中山大学学报(自然科学版),41(1):82—86.
- 赵亮亮,2011.福建省连江县贵安地热资源潜力分析(硕士学位论文).武汉:中国地质大学.
- 赵平,汪集旸,汪缉安,等,1995.中国东南地区岩石生热率分布特征.岩石学报,11(3):292—305.
- 赵永红,杨家英,王航,等,2017.地热水氢氧同位素分布特性.地球物理学进展,32(6):2415—2423.
- 庄庆祥,李德威,郑霜高,等,2019.漳州盆地及邻区地热资源与深部高温岩体的地质响应研究.北京:地质出版社.
- 祖辅平,2012.中国东南部晚古生代以来典型盆地沉积构造环境演化特征(博士学位论文).南京:南京大学.