

中国东南沿海水热系统的壳构热控特征研究

王贵玲^{1,2}, 甘浩男^{1,2}, 蔺文静^{1,2}, 岳高凡^{1,2}, 闫晓雪^{1,2},
李亭昕^{1,2}, 张 薇^{1,2}, 马 峰^{1,2}

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北石家庄, 050061;
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)

摘 要: 东南沿海位于西太平洋构造域, 晚中生代以来受古太平洋俯冲作用, 经历了一系列构造-岩浆活动, 区域应力场影响下形成多条 NE-NNE 走向断裂带, 并且沿断裂发育了大量温泉。前人开展了东南沿海的水热系统的成因研究, 但研究多集中在局部地热田, 缺乏地热系统的整体分析。本文通过典型地热田水热活动和地球化学特征分布, 主要讨论了水热活动、热化学类型和区域断裂间的关系。并分析了东南沿海典型地热田的热储温度特征、热物性以及热岩石圈厚度。在此基础上, 总结了东南沿海典型水热系统的“热源、流体通道、热储和盖层”特征, 基于壳构热控理论改进了东南沿海板缘俯冲带型水热系统的热控成因模式。

1 引言

地热系统是构成相对独立的热能储存、运移、转换的系统, 水热型地热系统则是以水或蒸汽为主的地热系统(王贵玲等, 2020; Jolie et al., 2021; 祁士华, 2021)。东南沿海是我国中低温地热资源的重要分布地区。地热、地震、火山以及断裂的分布, 都严格受控于大地构造特征, 东南沿海位于亚洲大陆东部边缘南段, 是濒太平洋地区构造-岩浆带的重要组成部分(Li and Li, 2007; Li et al., 2019)。中新生代以来大洋板块俯冲形成一系列广泛分布的构造-岩浆活动, 为形成众多水热系统提供了地质条件(Sun et al., 2020; Zhou et al., 2020)。

东南沿海地区是我国改革开放的前哨, 能源消费所占全国比重很大, 但对外能源依赖度较高, 而且还带来一系列的环境问题。分析不同地热系统的运移条件与热源机制, 因地制宜提出地方地热勘查开发方案, 对于科学指导区域地热资源科学开发利用具有重要现实意义。东南沿海地区构造复杂, 传统的地热利用以温泉、地热井洗浴为主(陈墨香等, 1994; 王贵玲等, 2017)。以往学者观点对于东南沿海地区是否存在高温地热资源意见不一(庄庆祥, 2010; 廖志杰等, 2012), 近年来, 随着在东南沿海地区实施了多口深部地热井, 结合

地热深井成果, 认为局部构造赋存造成的地壳内物质的分异性对热量的聚集和传递起着重要作用, 水热兼顾是区域找热的有效方法(王贵玲等, 2020)。基于以上理论和技术, 在广东惠州施工的惠热 1 井成功探获 118℃ 的自喷水热资源, 该井是迄今为止中国东部钻孔水温最高、自喷流量最大的地热勘探井, 施工深度达 3009.17 米, 于 2900 米测得热水温度为 127.7℃(李亭昕等, 2020)。

有所区别的是, 福建工作区普遍盖层缺失, 而广东工作区在出露岩体之间可发育数千米厚的沉积盖层。2015 年在福建漳州施工的 HDR-1 井, 井深 4002m, 井底温度 109.6℃, 与预计的井底温度 130℃ 相差 20℃, 复杂的断裂构造导致岩石差异性导热可能是造成钻探结果与设计误差的主要因素(蔺文静等, 2020)。东南沿海地区的区域性深断裂对热的传导起着重要作用。因此, 在东南沿海寻找浅部高温点仍然应该以寻找导热构造为主。从区域钻孔测温结果来看, 缺失盖层的福建工作区地温梯度要低于广东工作区(李亭昕等, 2020), 但需要进一步研究判断是否由于盖层厚度的不同而导致地温梯度差异。王贵玲等(2020)将东南沿海地区主要归纳为板缘俯冲带型水热系统, 并提出典型地热系统的成因模式。然而东南沿海地区总体水热活动特征与地热系统的“源、通、储、盖”的

研究尚存在不足,需要对东南沿海板缘俯冲带热控构造型水热系统进一步完善。

2 东南沿海地质背景

东南沿海地区最强烈的岩浆活动发生在燕山期,形成了巨型的火山-侵入杂岩带。目前对这一期地质事件的动力学机制上的认识已达成共识,即受到中生代古太平洋板片俯冲作用的影响,俯冲方向主要为 NW 向,并在俯冲过程中略有调整(Li et al., 2019; Sun et al., 2021)。中侏罗世板块俯冲作用开始,陆内出现逐步岩浆活动;晚侏罗世-早白垩世岩浆活动达到高峰,晚白垩世构造发生转换,大陆拉张解体(Li et al., 2014; Suo et al., 2019)。晚中生代以来太平洋板块向欧亚大陆的俯冲,以及菲律宾板块的碰撞对控制整个亚洲大陆东部的岩浆-火山活动至关重要(图 1),但大陆东南沿海地区是否存在与台湾地区类似的高温地热资源尚不清楚。

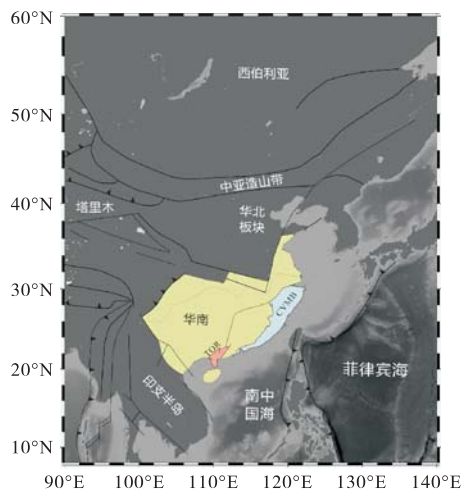


图 1 东亚地区构造框架图(修改自 Faure et al., 2017)
CVMB: 沿海白垩纪火山-岩浆带; TOR: 后期构造叠置区

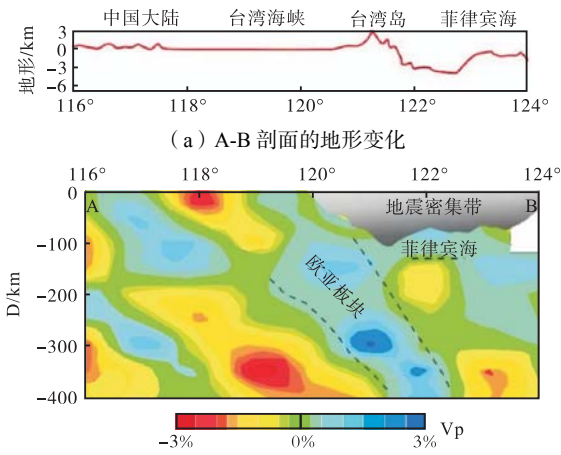
其中福建至广东沿海的构造单元中,存在一定厚度沉积盖层,且地热资源分布广泛,以温泉为主要表现形式。长乐-南澳断裂带、莲花山-政和-大埔断裂带穿区而过,具有深断裂赋存背景。在福建至广东沿海的白垩纪火山-岩浆带西侧存在一系列小型盆地,佛冈岩体作为我国东南沿海出露面积最大的花岗岩体之一,同时兼具高生热率值(赵平等, 1995),从化-永汉地区温泉出露广泛;惠州横

沥地区是地热异常集中地区,温泉出口温度达到 90℃ 以上(Qiu et al., 2018; 旷健等, 2020; 甘浩男等, 2020),出露在寒武系地层中,为典型小盆地。赣南地区地热异常出露与区域北北东和北东东走向深断裂分布相关,出露水温在 26~88℃(孙占学等, 2014)。湖南汝城地区温泉出露水温达到 91.5℃,主要受北东向断裂控制(Long et al., 2021)。后期构造叠置区位于云开造山带南侧,以雷州半岛、琼北发育的新生代大规模玄武岩浆活动为主要特征(Tian et al., 2020; Hu et al., 2022)。玄武岩属于基性幔源来源,生热率远低于花岗岩,且活动时代较新,具备了较好的火山型干热岩赋存条件(史兰斌等, 2003)。其中徐闻地区位于雷南隆起和迈陈凹陷转换区域,发育有厚层第三系沉积层,更新世发生大规模玄武岩溢流,根据已有石油井资料,该地区地温梯度较高(陈墨香等, 1991);老城-灵山地区位于琼北福山凹陷中,具有全新世玄武岩喷发盖在厚层第三系沉积层上,是东南沿海地区幔源火山活动的最新最大规模活动地区。

现今东南沿海地区以欧亚大陆与菲律宾板块的碰撞挤压作用为主。欧亚板块下插在菲律宾板块之下,以及菲律宾板块位于台湾地区之下引起的碰撞,是形成地区内地震的主因,区域主应力方向与板块俯冲碰撞方向一致(Zhao et al., 2009; Lallemand et al., 2013; Huang et al., 2015)。现今台湾海峡地区 P 波层析成像的结果也支持这一结论(图 2; Zheng et al., 2013)。这一发现说明菲律宾板块的 NW 向挤压作用在福建东部以至东南沿海地热系统的形成起到了重要作用。

在东南沿海地区所有花岗岩中,燕山期尤其是燕山晚期花岗岩具有最高的平均单位体积生热率(Lin et al., 2022a),显著高于晋宁期、加里东期和印支期花岗岩的平均单位体积生热率,而且数据亦显示花岗岩形成时代越新,平均单位体积生热率。中国东南部花岗岩体的放射性生热率高于全球花岗岩的平均产热率,这是影响该地区浅层地热田的主要因素之一(蔺文静等, 2016; Zhou et al., 2020)。然而,漳州地区同时代火山岩大量发育,其中晚中生代火山岩平均体积产热值高达 $2.45\mu\text{W}/\text{m}^3$,可作为该地区未来开发地热资源的重

要发热和聚集条件(林乐夫等, 2017; Lin et al., 2022a)。



(b) A-B 剖面的 P 波层析成像解译结果, 其中灰色部分为地震密集分布带位置

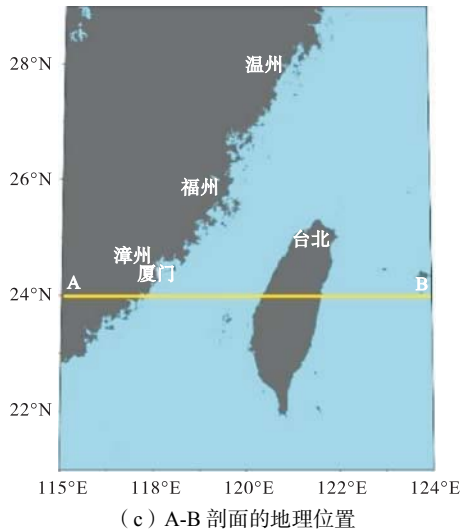


图 2 福建-台湾 P 波层析成像剖面图(修改自 Zheng et al., 2013)

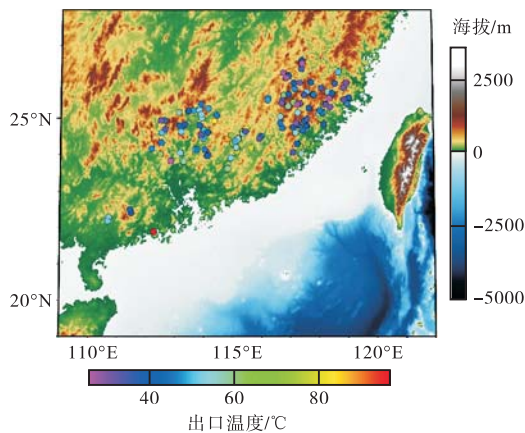


图 3 我国东南沿海温泉分布图(数据来自 Lin et al., 2022a)

3 东南沿海水热活动及热物性特征

3.1 水热活动分布特征

中国东南地区是中国水热系统的主要分布区(图 4), 东南沿海地表出露的温泉表现出了高度的有序性, 温泉形成的环型区在形态与空间位置上与区域地震等烈度线以及构造应力场分布高度一致(王贵玲等, 2020)。

东南沿海的地热井/温泉存在一定的经纬度相关性, 主要集中在纬度 23-27°N, 经度 112-119°E (图 4)。初步估算经纬度存在近似线性关系式: 经度 = $4 \times \text{纬度} + 16$ 。这与区域主要发育的 NE 向断裂近似一致, 可能说明了区域断裂对水热系统具有控制作用。

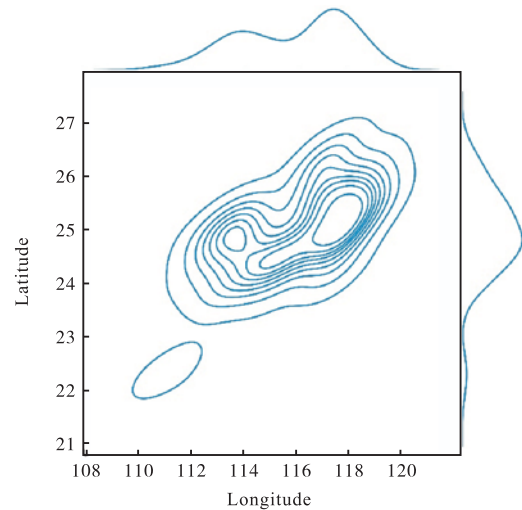


图 4 东南沿海水热系统经纬度关系图(数据来自 Lin et al., 2022a)

根据东南沿海以往钻孔测温及研究结果(庞忠和, 1987; 袁玉松等, 2006; Gan et al., 2017; 蔺文静等, 2022b; 蔺文静等, 2021; Gan et al., 2022), 华南地区的平均地热梯度取为 $2.4^{\circ}\text{C}/100$ 米, 这些典型地热田的热热水循环深度为 3700 ~ 5300 米, 其中 5300 米是福建漳州深处计算的储层最高温度 149°C (Lin et al., 2022a)。从东南沿海典型水热系统统计结果来看(图 5), 出口水温主要集中在 $40 \sim 60^{\circ}\text{C}$, 石英温标(无蒸汽损失)计算热储温度以 $100 \sim 140^{\circ}\text{C}$ 为主, CO_2 值主要集中在 $0 \sim 20\text{mg/L}$, 极少数地热井样品表现出极高的 pH, Li 和 SiO_2 的极高值。

热储温度分布表现出从内陆到沿海逐渐增大的趋势(图 6)。热储温度最高的地区集中在广东

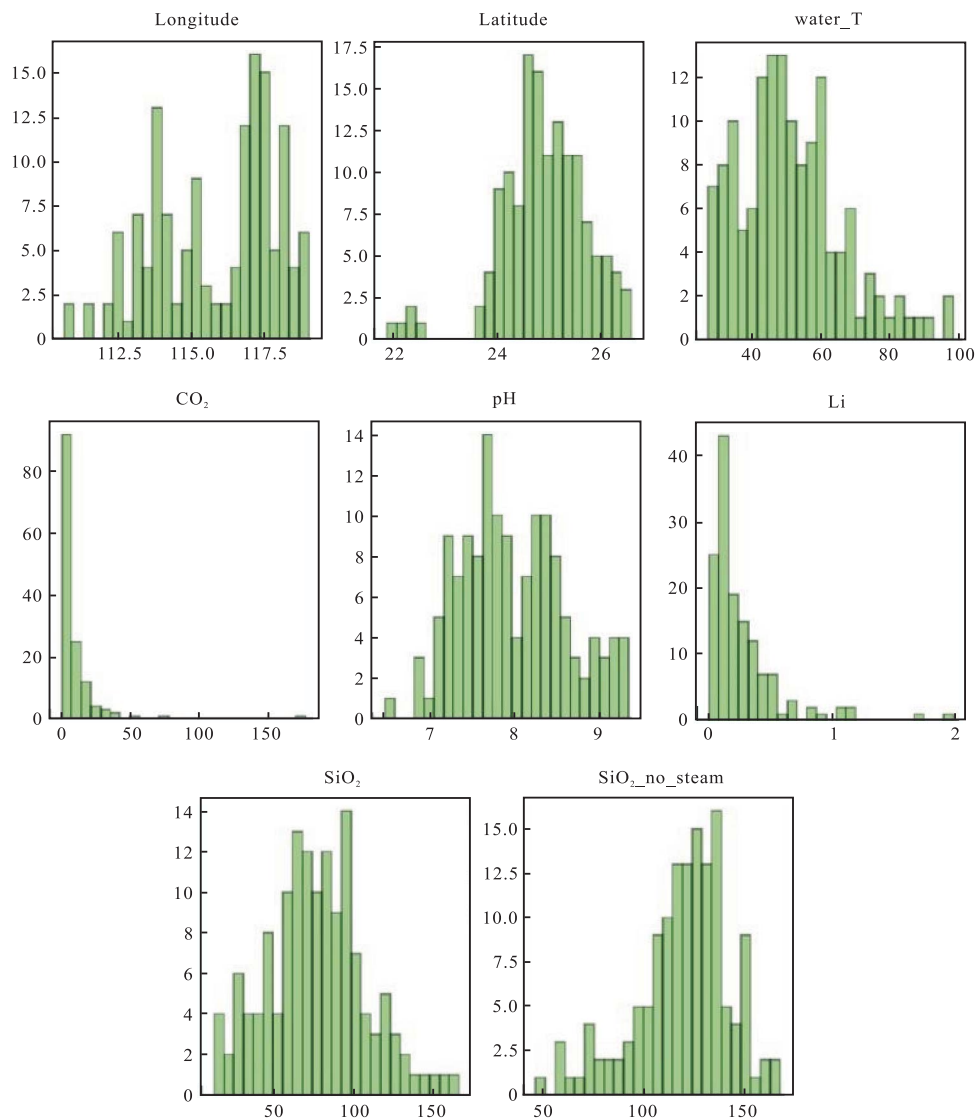


图5 东南沿海水热系统地热流体特征统计直方图(据不完全统计,数据来自 Lin et al., 2022a, 其中 water_T、CO₂、Li 和 SiO₂ 的单位为 mg/L; SiO₂_no_steam 指石英温标无蒸汽损失的热储温度计算结果,单位为℃)

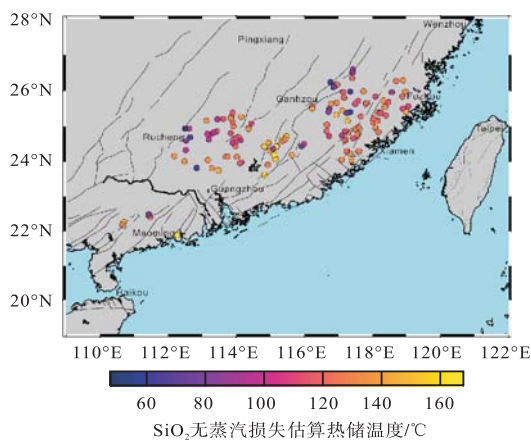


图6 我国东南沿海水热系统 SiO₂ 无蒸汽损失估算热储温度分布(不完全统计,数据来自 Lin et al., 2022a)

河源-横沥地区,热储温度相对较低的地区远离沿海。尽管热储温度较高并不能代表同深度地温较高,但可能代表着越靠近沿海的水热系统沿断裂循环的深度越大。假设东南沿海水热系统,则水热系统热储温度的变化规律可能与菲律宾板块与欧亚板块碰撞造成的断裂效应有关,随着内陆地区远离碰撞前沿,引起的断裂效应越小,因此水热系统的循环深度逐渐变小,热储温度呈现出逐渐降低的趋势。对于湖南汝城等内陆中温水热系统的形成,推测可能是局部构造应力条件下岩石破裂尺度增加,使得地下水循环深度增加所致(Long et al., 2021)。

3.2 热物性与热岩石圈厚度分布

3.2.1 岩石放射性生热率分布

我们获取东南沿海地区不同位置岩石放射性生热率数据, U、Th、K 数据来自 GEOROC (<https://georoc.eu/>), 2022/9/21 数据下载, 参数选择: 地理筛选, 经度 120/109; 纬度 28/20; 密度数据来自 Daly.R.A., 1966; 赵平等, 1995; 董杰等, 2001; <https://rocks.comparenature.com>。生热率分布表现出在东南沿海相对均匀的分布, 其中靠近沿海的生热率相对高于内陆地区, 高生热率地区主要集中在 110-120°E, 22-25°N 范围内, 纬度 26°以北则基本无高放射性生热率岩石赋存(图 7)。

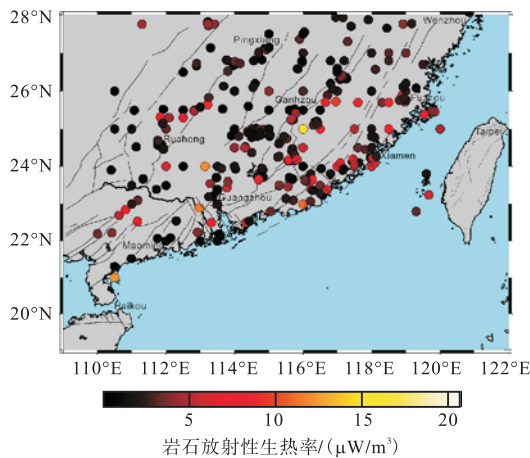


图 7 东南沿海岩石放射性生热率分布 (U、Th、K 数据来自 GEOROC (<https://georoc.eu/>), 2022/9/21 数据下载, 参数选择: 地理筛选, 经度 120/109; 纬度 18/20; 密度数据来自 Daly.R.A., 1966; 赵平等, 1995; 董杰等, 2001; <https://rocks.comparenature.com>)

将获取的岩石分类为超基性、基性、中性和酸性四种类型可以看出, 主体中性和酸性岩石相对于基性岩石的经度偏大, 即中酸性岩石的分布更靠东部沿海, 而基性岩则倾向于靠近内陆(图 8)。密度则表现出超基性和基性岩显著高于中酸性岩石的特征, 其中密度 2.6-2.7g/cm³ 表现出相比其他密度异常的生热率高值。放射性生热率则表现出酸性岩高于中性岩高于基性岩的特征。且从沿海到内陆, 酸性岩体生热率随纬度和经度增大具有略微减小的趋势, 而中性岩和基性岩则并不明显。

3.2.2 钻孔热结构揭示的热岩石圈厚度变化

岩石圈热结构研究是认识热源背景的重要方

式 (Wan et al., 1989; Furlong and Chapman, 2013), 岩石圈厚度是岩石圈非均质性及地球动力学过程的重要表现形式, 钻孔获取的实测大地热流值及生热率值, 为岩石圈热结构及热岩石圈厚度的构建提供了参数依据。本文收集了东南沿海位于福建漳州 (HDR-1)、广东惠州 (HR1)、江西赣州 (GX01)、雷琼 (X-4、L15X) 五个钻孔的地温、热导率和生热率数据 (陈墨香等, 1991; 赵迎东等, 2016; Lin et al., 2022b; Gan et al., 2022)。一维稳态热传导条件下, 热结构的准确性受分圈层岩石热物性的制约, 主要包括热导率和生热率的赋值, 其中热导率通过公式进行校正具有较好的效果 (Furlong and Chapman, 2013; Gan et al., 2022), 而生热率尚未有较好的经验公式。本文将钻孔岩心及捕掳体实测生热率作为数据集进行训练, 采用随机森林 (RF)、Adaboost 迭代 (Ada)、多层感知器 (MLP) 以及邻近算法 (KNN) 进行深部热导率预测, 并与传统生热率指数和常数赋值方法进行对照, 图 9 显示了不同方法生热率预测的纵向变化。

前人研究显示, 从内陆向沿海热岩石圈厚度逐渐减小 (张健等, 2018), 至福建沿海末端出现岩石圈加厚 (图 10; Deng et al., 2021)。此外, 台湾向 NW 至内陆存在一系列铲状断裂, 规模达到地壳尺度, 受板块俯冲影响, 在靠近板块边缘部位大陆岩石圈发生伸展作用减薄, 壳内普遍存在的 15-20km 的低速带, 可能是受产状断裂和壳幔活动综合影响形成 (Zhou and Li, 2000; Guo et al., 2019)。我们的结果对前人的结果进行了修正, 从内陆至沿海, 在华夏地块赣州盆地表现出显著的热岩石圈低值, 而靠近沿海的漳州盆地表现出显著热岩石圈高值。热岩石圈高值与低值的变化过程缺乏钻孔数据约束, 但表现出了显著的热岩石圈厚度增大现象, 推测可能与政和-大浦断裂的构造分区作用有关, 造成两侧的热岩石圈厚度差异, 但仍需要更多的证据进行佐证。从福建至海南, 热岩石圈厚度亦表现出减小的趋势 (图 11), 其中雷琼地区表现出明显的低值, 与地球物理揭示的海南岩石圈厚度相近 (55km, Wu et al., 2004) 推测与海南可能的地幔柱构造有关, 引起热岩石圈厚度减小 (Zhou and Fan, 2010)。

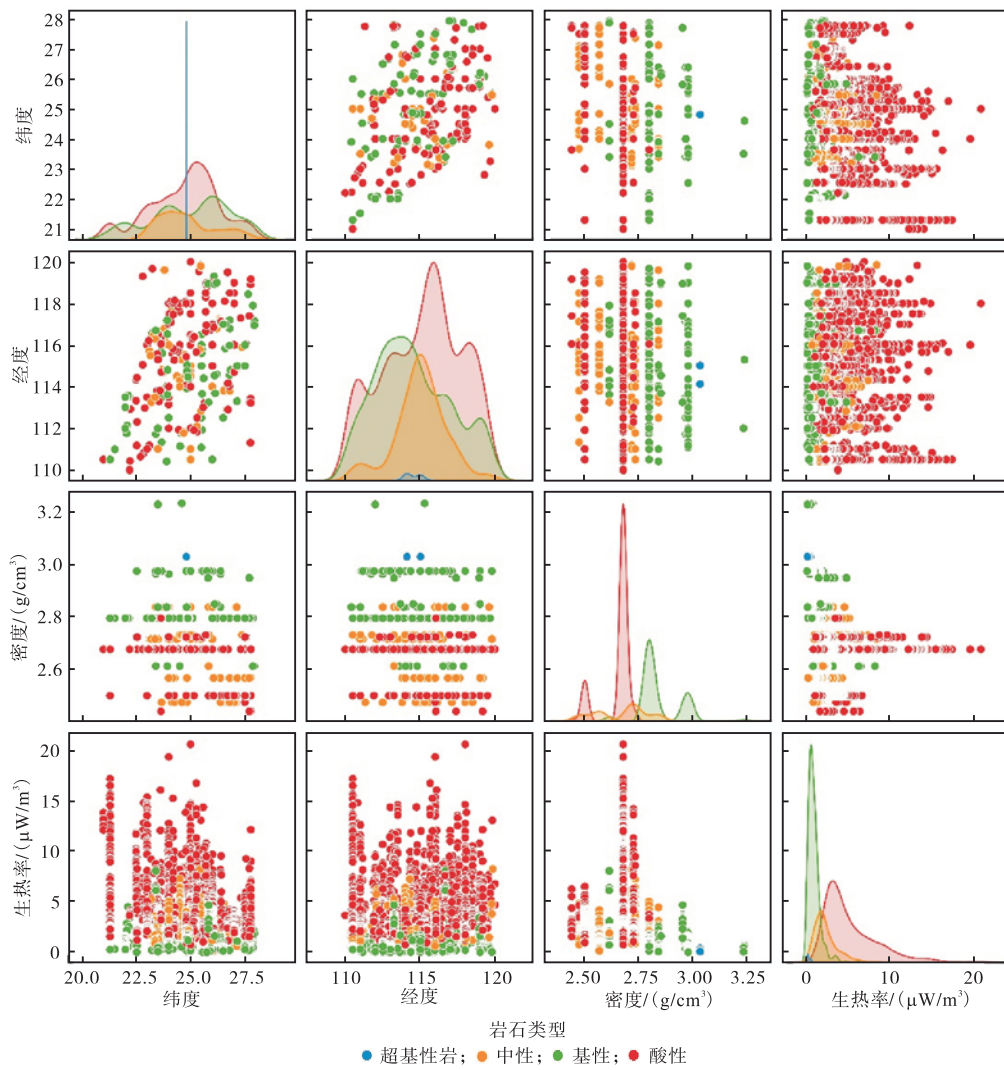


图 8 东南沿海岩石放射性生热率特征统计(数据来源同图 7)

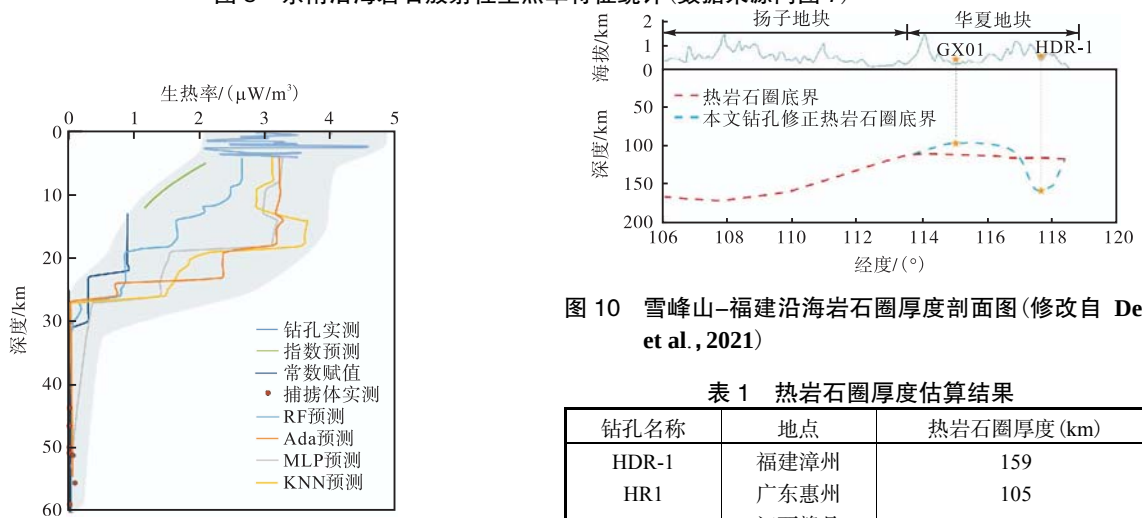


图 9 东南沿海岩石放射性生热率特征统计

图 10 雪峰山-福建沿海岩石圈厚度剖面图(修改自 Deng et al., 2021)

表 1 热岩石圈厚度估算结果

钻孔名称	地点	热岩石圈厚度(km)
HDR-1	福建漳州	159
HR1	广东惠州	105
GX01	江西赣县	98
X-4	广东徐闻	73
L15X	海南福山	49

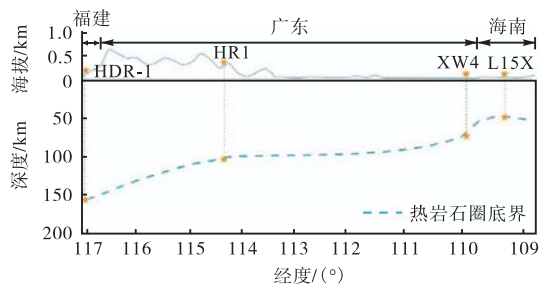


图 11 福建漳州-海南福山岩石圈厚度剖面图

4 讨论

4.1 板缘俯冲带型水热系统热控构造

东南沿海地区的水热系统是壳构作用的浅部响应。地表出露的温泉表现出了高度的有序性,温泉形成的环型区在形态与空间位置上与构造应力场分布高度一致(王贵玲等, 2020)。新生代以来,受菲律宾板块挤压,东南沿海地区出现平缓东倾的铲状断裂系统。断裂网格系统发育,在地表表现为 NW、NE 向的高角度断裂。东南沿海地区由于具有深断裂的存在,局部熔融或深部热流的热能可以通过深断裂更直接传递至浅部,因此会形成地温等值线的上扬,深断裂与浅部张性断裂交汇周围往往具有温泉出露。

从地壳尺度而言,东南沿海地区的水热系统是壳内构造作用下的浅部响应。地表出露的温泉表现出了高度的有序性,温泉形成的环型区在形态与空间位置上与构造应力场分布高度一致(姚足金等, 1990)。东南沿海地区由于具有区域性深断裂的存在,局部熔融或深部热流的热能可以通过深断裂更直接传递至浅部,因此会形成地温等值线的上扬,深断裂与浅部张性断裂交汇周围往往具有温泉出露(Tannock et al., 2020; 王贵玲, 2020)。

活动断裂是深部地下热水运移、富集、上涌的通道,绝大多数天然温泉都在断层破碎带或不同方向的活动断裂交叉复合部位,说明活动断裂很大程度上控制着温泉的分布。在以前的研究中,已经系统地讨论了地热资源的构造控制(王贵玲等, 2004)。华南地区从加里东期构造阶段开始活动,经历了海西-印支构造阶段、燕山构造阶段和喜马拉雅构造阶段,新构造运动较强烈,表现为主要表现为强烈的继承性断裂活动,并引起差异断块升降。晚第三纪以来,华南地区地壳运动相当频繁、

强烈、显著,先存断裂的复活都深深的切割了多期的地层和岩石,使该区具备了形成热源、控热构造和储热空间等地质条件及水热对流要素。华南地区温泉的分布与活动断裂密切相关,总体上呈 NEE 向分布,是 NEE 向断裂对其他方向构造应力调整的结果(图 12)。东南沿海水热系统周围的莲花山-政和-大埔断裂带、河源断裂带、紫金-博罗断裂带等为活动断裂,也是东南沿海主要的发震断裂之一,表现为频繁的低震级地震活动,尤其以河源断裂新丰江水库附近最为频繁(Tannock et al., 2020; Zhang et al., 2021)。

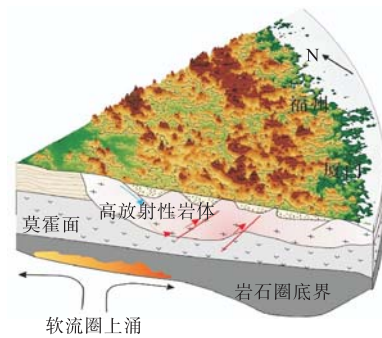


图 12 板缘俯冲带热控构造模式图

综上所述,在区域上,水热系统分布主要受 NE 向区域大断裂构造控制,局部上受衍生的次一级 NW 向断裂或羽状断裂群影响。区内经历过多次剧烈的构造运动和多期次岩浆入侵,致使断裂带及附近产生次级断层或岩体破碎、张性节理裂隙,为地热流体的储存和运移提供了空间和通道。

4.2 板缘俯冲带型水热系统热源分析

东南沿海地区经历新生代以来太平洋构造域的板缘俯冲活动,发生岩石圈减薄与软流圈上涌,提供了地幔来源热。我国东南沿海地区是一种典型的“冷壳热幔”结构,与喜马拉雅山区的“热壳冷幔”热源结构完全不同(Jiang et al., 2019),地幔热在热源中扮演了重要的作用。但最近对漳州、惠州地区的研究表明,地表热流值中很大一部分热贡献来自于放射性元素生热贡献,地幔贡献与地壳略偏低,属于“热壳冷幔”型热结构(Gan et al., 2022; Lin et al., 2022b)。中国东南地区地壳厚度的总体变化范围为 28 至 33 公里,沿东南沿海地区较薄(邓阳凡等, 2011)。漳州和惠州地区的热通量分析结果表明,其地幔源热通量贡献分别为 33.6 和 31.01mW/m²。这些数值基本

相同,漳州地区由于地壳相对较薄,热通量贡献略大。对广东北部、江西南部 and 福建漳州不同时期收集的花岗岩样本的测试分析表明,其平均体积产热值在 3.5 至 $7.11\mu\text{W}/\text{m}^3$ 之间(林乐夫等, 2017; Zhou et al., 2020; Lin et al., 2022a),这进一步证明了中国东南地区地壳内岩石的放射性衰变产热对浅层热积累的贡献。

4.3 板缘俯冲带型水热系统盖层分析

为了保存好基底热量,防止大气降水渗入冷却岩体,需要在基底之上覆盖有低导热率的盖层,这种盖层通常主要是沉积岩或火山岩,有时候也可以是合适厚度的风化壳层。标准一维稳态热传导方程模拟显示,在其它物理参数相同的条件下,在大约 5km 深度处,有沉积盖层覆盖的花岗岩基底比没有沉积物盖层的温度要高 $30\sim 40^\circ\text{C}$,由此可见盖层对于干热岩热量保持的重要性(Lin et al., 2022b)。据统计,我国东南地区岩石热导率的平均值,特别是沉积岩热导率的平均值高于地壳岩石的平均值(赵平等, 1995),此种类型盖层对防止热量的散失方面作用相对有限。

4.4 板缘俯冲带型水热系统热储分析

东南沿海地区干热岩热储层以高放射性花岗岩体为主,仅在雷琼地区存在厚层沉积岩热储(陈墨香等, 1991; 李亭昕等, 2020)。放射性生热是岩石圈产热的主要来源之一,U、Th 和天然放射性同位素 ^{40}K 是主要的生热元素。东南沿海水热系统热储温度以 $100\sim 140^\circ\text{C}$ 为主,出口温度以 $40\sim 60^\circ\text{C}$ 为主,表现为中低温水热系统。根据东南沿海地区现有的钻孔测温推算,东南沿海地区地温梯度为 $20\sim 40^\circ\text{C}/\text{km}$ (Gan et al., 2019; Zhou et al.,

2020),可以初步得出东南沿海热储层深度集中在 $3\sim 5\text{km}$,结合花岗岩体在东南沿海的广泛分布,可以推测东南沿海板缘俯冲带型水热系统的热储主要为隐伏花岗岩体(图 12)。

5 结 论

东南沿海特殊的板缘地质构造背景造就了特殊的水热活动分布特征,发育的水热系统具备类型相似的热储特征,因此,东南沿海的水热系统具有板缘俯冲带特有的壳构热控构造成因,广东惠州黄沙洞地热田是一个典型的实例,可以得出板缘俯冲带热控构造型水热系统的典型模式,即中新代以来太平洋构造域对区内的俯冲作用使得岩石圈伸展减薄,软流圈上涌提供幔源来热,且广泛分布花岗岩类岩石具有高放射性生热,成为区域地温异常场的另一重要热源;NE 向区域性断裂带对区域火山喷发带、侵入岩等有显著控制作用,是形成区域热异常的重要壳构热控背景,新生代以来由于板缘挤压形成的壳内 NW 向张扭性断裂,为地表水的下渗、运移加热创造了良好的条件,成为了控制地区性温泉出露的主要构造,深部的地下热水沿其上升至地表而形成一系列板缘俯冲带热控构造型水热系统。需要指出的是,本文是基于部分温泉和地热井数据进行分析的,并未涵盖所有东南沿海地区温泉,但我们认为分析的成因及模式可以适用于东南沿海区域构造背景条件下的同类型地区。

参考文献略

译自《Acta Geologica Sinica(English Edition)》, 2023, 97(4): 1003-1013

下接第 14 页

程示范,即现有水热型地热田内或附近的低渗透性或低产井、具有地热发电潜力但目前未进行地热开发的低渗透性地热异常区、具有地热发电潜力的低渗透性超高温(温度高于 375°C)地热资源、以及美国东部具有地热梯级利用潜力的低渗透性高温地热异常区。

美国能源部此次重点针对前三类区域的增强型地热系统工程示范提供资助,具体包括:由雪佛龙新能源公司采用创新性钻探和增产改造技术开

采加利福尼亚州北部 Sonoma 县现有地热田附近的地热能;由 Fervo Energy 公司在邻近 FORGE 计划犹他州干热岩示范项目没有开展商业化地热发电的场地利用 3 口井实现每口井至少 8 兆瓦的地热发电量;由 Mazama Energy 公司在俄勒冈州 Newberry 火山西侧建造首个超高温增强型地热系统,将有助于促进在极端高温条件下实现地热开发所需的科学认识。

转自 地热能在线