

<https://doi.org/10.3799/dqkx.2022.314>



浙江省大地热流及其地热资源意义

毛官辉¹, 张立勇¹, 陈俊兵², 吕清², 彭鹏², 韦毅¹

1. 浙江省工程勘察设计院集团有限公司, 浙江宁波 315012

2. 浙江省水文地质工程地质大队, 浙江宁波 315012

摘要: 为深入了解浙江区域地热背景, 本文整理了浙江53眼中深层地热井的连续测温资料, 并实测、收集相关岩石热导率数据110组, 最终筛选并计算了23个新的大地热流值, 取值区间在61.7~87.9 mW/m², 平均值73.7 mW/m², 高于全国均值。结果表明, 在东北向和北西向深大断裂的控制下, 形成了浙东北嘉兴-慈溪-宁波、浙西南遂昌-兰溪-浦江高热流值地热单元和浙中安吉-新昌-温岭低热流值地热单元。上述地热单元的分布与浙江莫霍面、居里面等地壳结构的特征面分布特征基本一致, 与浙江大型白垩纪断陷盆地和新生代沉积盆地在空间上吻合度较高, 与现代地壳运动和构造活动性密切相关。

关键词: 大地热流; 传导型; 对流型; 地温梯度; 热导率; 地热系统; 地热能。

中图分类号: P612

文章编号: 1000-2383(2023)03-1030-10

收稿日期: 2022-04-26

Terrestrial Heat Flow in Zhejiang Province and Its Significance of Geothermal Resources

Mao Guanhu¹, Zhang Liyong¹, Chen Junbing², Lü Qing², Peng Peng², Wei Yi¹

1. Zhejiang Engineering Survey and Design Institute Group Co. Ltd., Ningbo 315012, China

2. Zhejiang Hydrogeological Engineering Geological Brigade, Ningbo 315012, China

Abstract: In order to deeply understand the regional geothermal background in Zhejiang, the continuous temperature measurement data of 53 deep geothermal wells in Zhejiang are sorted out, and 110 groups of related rock thermal conductivity data are measured and collected. Finally, 23 new terrestrial heat flow values are screened and calculated, with an average 73.7 mW/m² of 61.7–87.9 mW/m², which is higher than the national average. The results show that controlled by NE-trending and NW-trending deep faults, there are Jiaying-Cixi-Ningbo high heat flow geothermal unit in northeast Zhejiang, Suichang-Lanxi-Pujiang high heat flow geothermal unit in southwestern Zhejiang and Anji-Xinchang-Wenling low heat flow geothermal unit in central Zhejiang. The distribution of the above geothermal units is highly consistent with that of large Cretaceous faulted basins and Cenozoic sedimentary basins, and the analysis may be closely related to modern crustal movement and tectonic activity.

Key words: terrestrial heat flow; conductivity; convection; geothermal gradient; thermal conductivity; the geothermal system; geothermal energy.

大地热流是反映地热背景的主要参数, 是开展地热地质工作的基础。大地热流在数值上等于单位

面积、单位时间内由地表散发到大气中的热量, 它比地温梯度更能确切地反映一个地区的热状态。

基金项目: 浙江省地质专项资金项目(No. 2018010); 中国科学院学部咨询评议项目(No. 2020-DX03-B-007)。

作者简介: 毛官辉(1985—), 男, 高级工程师, 主要从事地热资源勘查评价与开发研究。ORCID: 0000-0003-4709-1424. E-mail: 349228047@qq.com

引用格式: 毛官辉, 张立勇, 陈俊兵, 吕清, 彭鹏, 韦毅, 2023. 浙江省大地热流及其地热资源意义. 地球科学, 48(3): 1030–1039.

Citation: Mao Guanhu, Zhang Liyong, Chen Junbing, Lü Qing, Peng Peng, Wei Yi, 2023. Terrestrial Heat Flow in Zhejiang Province and Its Significance of Geothermal Resources. *Earth Science*, 48(3): 1030–1039.

全国现有1 230个实测大地热流数据(含海域)(胡圣标等,2001;姜光政等,2016).浙江在此方面研究程度较低,一直沿用1992年中国科学院与浙江石油勘探处合作开展的浙江大地热流测量工作成果,大地热流数据点仅29个(阮万才等,1994).

本文系统收集了浙江2010年以来施工的地热井(72眼)的测温成果资料(53组)、浅层地温调查评价项目成果资料、补充测试了典型岩石类型热导率31组,在对收集和实测数据进行筛选、校正和质量评定的基础上,新增大地热流值等数据23组,并进行了数据质量评估,充实了浙江大地热流数据库和浙江省大地热流值.在此基础上,结合浙江省居里面(何长友,1987)及地质构造研究(孔祥儒等,1995)成果,对浙江省寻找中深层地热资源的方向进行了探讨.

1 深部热背景

地表热流值分布与地幔热流在上导过程中因地质结构不同而发生热流再分配有关,也与高放射性地质体、岩浆活动等高热流背景有关,通常以地幔热流和放射性生热为主(旷健等,2020).

浙江省岩石圈的相关研究结果表明,浙江整体地壳厚度变化具有西厚东薄的趋势,在浙西北区域(扬子板块)厚约37.7 km,浙东南区域(华南褶皱系)厚约31 km.居里面由浙西北向浙东南亦自深变浅.莫霍面、居里面的变化与深部构造、岩浆活动及深大断裂密切相关,全省被江山-绍兴拼合带、温州-镇海深断裂带分隔成三块,呈现明显的块断性,奠定了我省深部热结构的基础.

岩浆与火山作用也是影响区域热背景的重要条件之一(张森琦等,2021).浙江火山与岩浆活动强烈,全省范围内分布有10个岩浆房,但以中生代时期为主,距今最近一次火山活动发生在250万年前,已和周围地层温度达到了平衡,对现今的地热热源影响不大.

岩石生热率是影响大地热流的另一主要因素,浙江暂无系统研究成果,但根据李海亭(2015)对浙江干热岩的研究,浙东南地区高于浙西北地区.

总体而言,浙江地区无特殊的局部强放射性高热岩体,无近期岩浆活动和火山活动的高温岩浆热源;在正常或略为偏高的大地热流背景值的基础上,地热水沿岩石孔隙或深大断裂径流过程中,将岩层中的热流“收集”起来,形成热水和温水.深部

热水在上涌通道的浅部形成局部热流异常,其温度的高低主要取决于地下水的循环深度,在成因上多属于板块内部基岩裂隙深循环对流型的水热系统(徐梓矿等,2021).研究浙江省大地热流的分布及其与地质构造环境的关系是浙江地热资源勘查的重要手段之一.

2 钻孔测温数据

2.1 数据筛选

地热增温模式主要分为传导型和对流型.传导型即不受地下水垂向对流的影响,以正常的地温梯度线性(或分段线性)增温的模式;对流型指钻孔全孔或部分井段受到地下水涌或下渗的影响产生非线性增温的模式.传导型地热井的连续稳态测温数据是大地热流研究的前提条件(何丽娟等,2001;徐明等,2010;徐明等,2011;李卫卫等,2014;胡圣标和黄少鹏,2015).

在本次研究中主要结合温度-深度曲线形态及实际钻孔的结构、岩性特征进行科学的区分和筛选.理论上,全孔岩性均一的情况下,传导型地热井测温曲线为直线型,实际在不同深度会出现因岩性变化而导致的地温梯度分段线性特征,这种岩性变化引起的分段线性不会对地温场的研究产生干扰.

据胡圣标和黄少鹏(2015)的研究成果,受地下水对流等影响的测温曲线,可呈现多种形态(图1):(1)地下水水头高的自流井表现为“三角型”测温曲线特征,不能用于大地热流计算;(2)地下水水头较高的非自流井表现为某一段测温曲线的“上凸型”,一般不用于大地热流计算;(3)地下水水头低的地热井表现为突变的左偏拐角形态,该类型若对流段浅,对深部温度影响小可取深部温度数据进行研究,否则不能用于计算.

另外,本次研究表明,部分地热井井温曲线的变化和井结构有关,固井段和裸孔段在短时间未达到热平衡的情况下,固井材料会产生类似岩性的变化.

本次共收集53组钻孔测温数据,均为成井结束24 h后采用测井仪进行连续测温的成果,钻孔测温深度在800~3 200 m之间,均为非稳态测温.测温数据曲线表明,多数钻孔的测温曲线属传导型,其温度-深度曲线或者全井段线性或者分段线性或近底段呈线性,处理后可用于地温场的研究,部分钻孔受地下水活动(热对流)影响较大,不适宜用作地

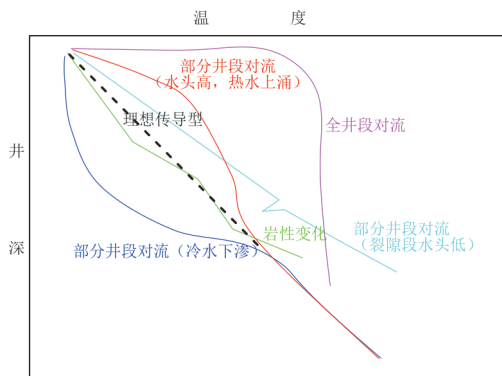


图1 典型测温曲线变化类型

Fig.1 Variation type of typical temperature measurement curve

温场研究. 本次按照地级市进行了逐一的统计、分类, 最终得出地热井测温曲线的类型, 并对测温数据质量进行评价、筛选. 筛选原则如下: (1) 有智能数字测井系统连续的测温数据; (2) 测温曲线形态接近直线型, 没有明显由地下水对流引起的波动; (3) 井深较深, 浅部受地下水对流影响, 深部无影响的测温曲线. 在此基础上选择高质量的测温数据 23 组进行后期的研究和计算, 具体见图 2~图 5.

2.2 数据处理

稳态的测温数据是决定大地热流计算可信度的关键因素. 由于孔内温度受钻探的影响, 必须在停钻后相当长时间才能达到平衡时的稳态温度. 据胡圣标和黄少鹏 (2015): 稳态时间随钻井深度呈现指数增加, 钻进扰动温度幅度恢复 90%, 所需时间相当于钻探时间的 0.5~1.5 倍, 钻井温度扰动幅度恢复 99%, 所需时间为钻探时间的 10~20 倍. 由于浙江绝大部分的地热钻探是生产性钻探, 测温数据均为停钻 24 h 后测量, 成井后不再复测, 为非稳态测温数据, 必须经过科学的处理才能用作地温场研究.

本次利用胡圣标和黄少鹏 (2015) 提出的替代方案即利用井底温度、中性点温度、恒温层温度来确定准稳态测温曲线. 相对而言, 井底段受到的干扰最小、恢复较快, 理论上停钻 24 h, 可以恢复 75%~80%; 同一钻孔, 在同一深度不同时间的两次以上的测温曲线的交点称作中性点, 该点井液与围岩温度处于平衡, 无需恢复较长时间; 恒温层温度是一个浅部的稳态温度, 相当于一个已知的参数, 因此, 在没有稳态测温数据的情况下, 可根据已有资料梳理出单个钻孔不同深度不同时间测量的井底温度、同一深度不同时间测温曲线的交点即中性

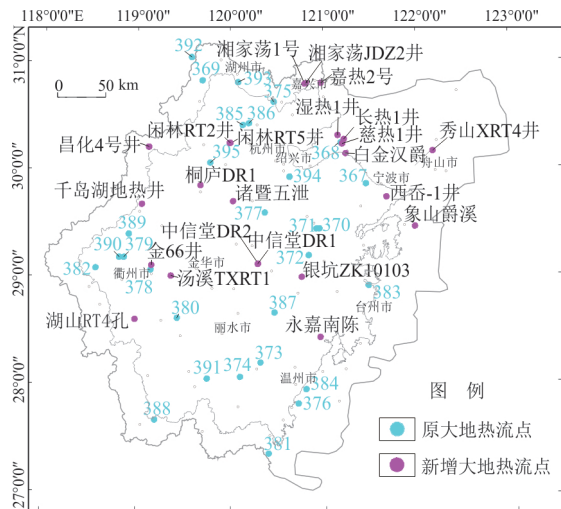


图2 浙江大地热流点分布

Fig.2 Distribution map of geodetic heat flow points in Zhejiang

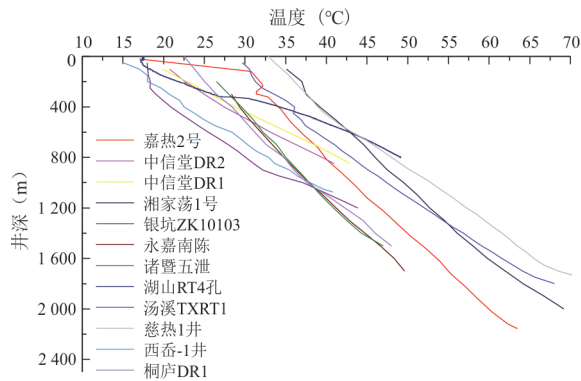


图3 传导型地热井测温曲线

Fig.3 Temperature measurement curve of conductive geothermal well

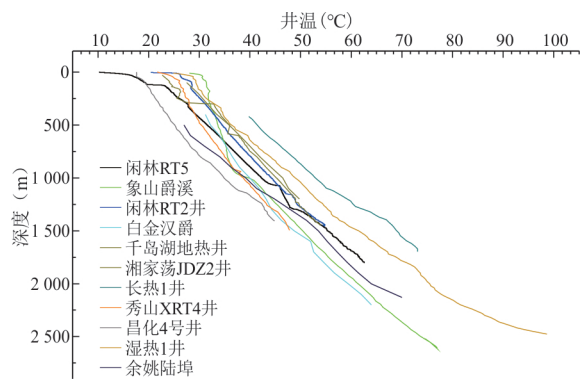


图4 传导型为主(部分井段弱对流)地热井测温曲线

Fig.4 Temperature measurement curve of geothermal well with main conductive type

点温度, 再结合恒温层温度绘制准稳态曲线, 再进行线性拟合求取所需段的地温梯度.

本文对于3个关键点数据选取说明如下:恒温点温度数据来源于浙江省主要城市浅层地温能调查项目测量成果;有两次以上相同深度连续测温数据的井(例如长热1井)求取中性点温度(图6);部分地热井有不同深度的两次测温数据,则利用两次井底的测温数据(例如湖山RT4井)(图7);对于大部分没有两次测温数据的,本次选取井底50~200 m段的2~3个数据作为关键点(例如西岙1井)(图8).关键点数据提取后,采用Origin软件进行趋势拟合,求取准稳态曲线,再进行线性回归分析,求取所需的地温梯度(图6~图8).

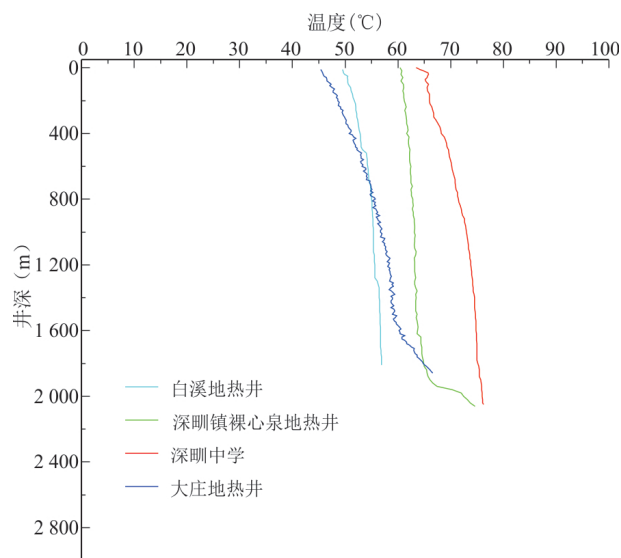


图5 部分典型对流型地热井测温曲线

Fig.5 Temperature measurement curves of some typical convective geothermal wells

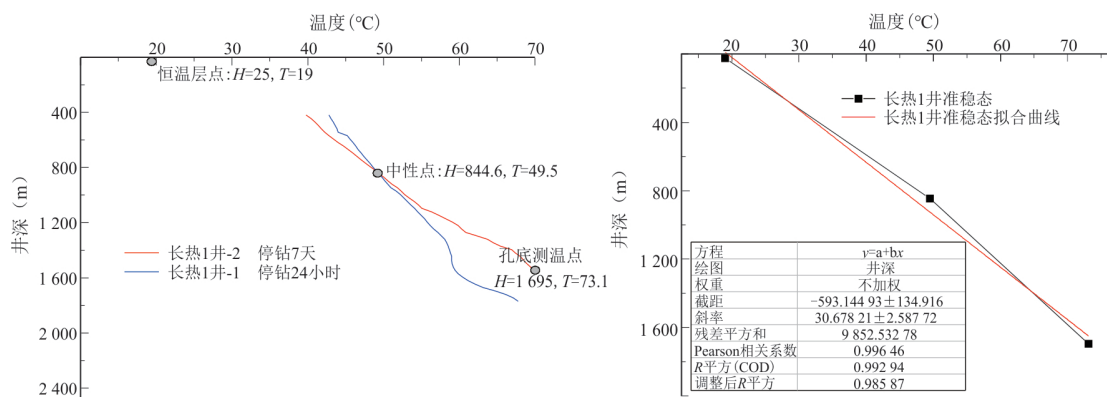


图6 通过恒温点、中性点、井底测温点求解的地温梯度

Fig.6 The geotemperature gradient diagram is solved by constant temperature point, neutral point and bottom hole temperature measurement point

以宁波长热1井为例

3 地温梯度

地温梯度是指地球内部恒温带以下地温随深度的变化率,准确的地温梯度是由特定深度段内稳态或准稳态的温度-深度曲线即测温曲线进行线性回归来求取(胡圣标和黄少鹏,2015).井底段线性拟合得出的地温梯度和该井段岩性相对应的热导率被一起用于大地热流值的计算.本次利用上述整理的准稳态测温曲线共计求取井底段地温梯度数据23个,结合公开发表的1992年石油勘探处的29组数据,共获得全省大地热流计算段地温梯度52组,测点分布较均匀.

4 岩石热导率

岩石热导率值的测试和选取是大地热流研究工作中十分重要的问题.岩石热导率表示岩石导热能力的大小,主要取决于岩石的化学成分、矿物成分、结构和构造、孔隙度、含水状况、温度和压力等.同一类岩石热导率由于矿物组成、结构差异等也会在一定范围内变化.对于采集岩石样品较少,甚至无岩石样品的热流估算孔,各类岩石的平均热导率值可采用邻孔或本构造单元其他钻孔同类岩石的平均热导率值代替(熊亮萍等,1993).选取替代的热导率值时,需根据岩石实际矿物含量、孔隙度等物化性质的差异做调整.浙江省地热井岩心热导率系统性测量很少,本次计算的数据来源主要有以下3个方面:

(1)在浙东南地区针对不同地层进行岩石采样并测试数据,共计采取31块岩性标本,其中浅部新

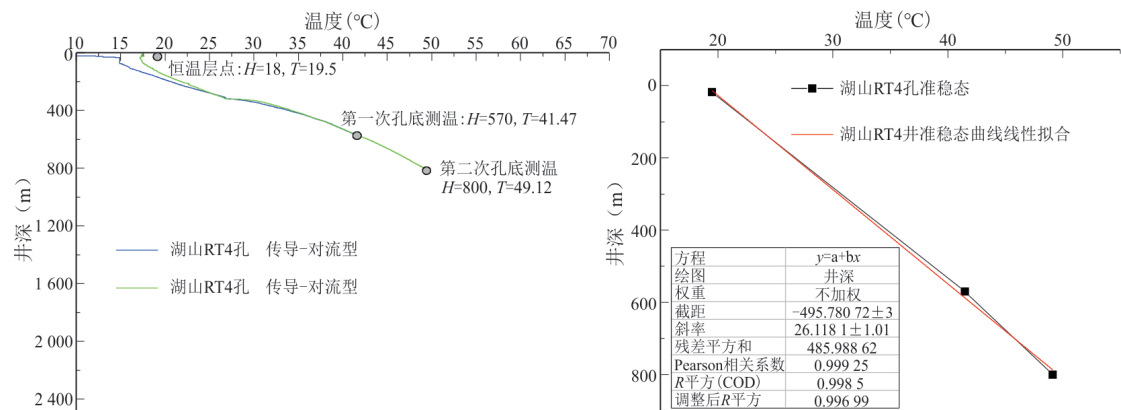


图 7 通过恒温点、2次不同深度井底测温点求解的地温梯度

Fig.7 The geothermal gradient map is solved by constant temperature points and two bottom hole temperature measurement points of different depths

以遂昌湖山 RT4 孔为例

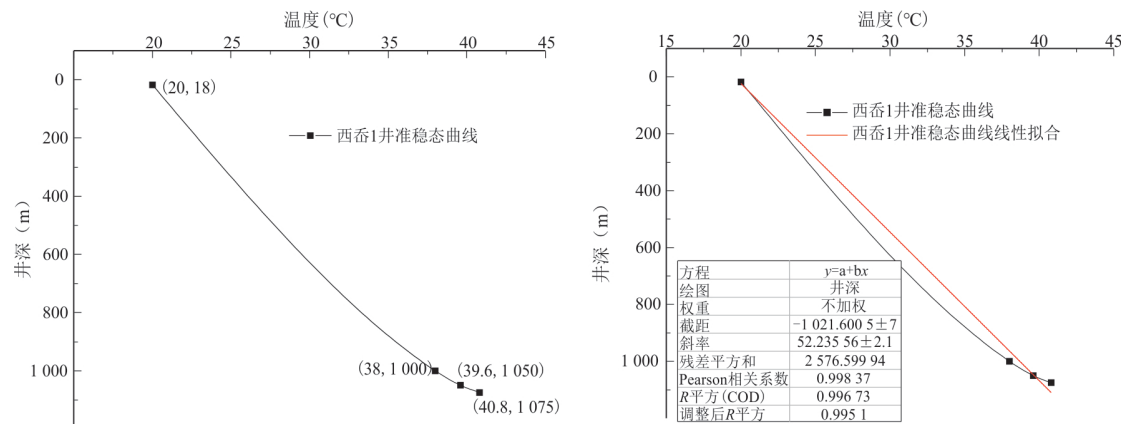


图 8 通过恒温点、井底段 2 个测温点求解地温梯度

Fig.8 The geothermal gradient map is solved by two temperature measuring points of constant temperature point and bottom hole section

以宁波东钱湖西岙 1 井为例

鲜基岩 26 块,深部岩心样品 5 块,主要为浙东南地区火山岩和侵入岩,样品在实验室进行标准化处理后采用 HotDiskTPS2500s 热常数分析仪进行测试分析.对于 26 个浅部新鲜基岩,属非原位样,热导率受温度、压力、孔隙度、饱水率等影响,与深部原位岩心存在差异(王一波等, 2019),需经过矫正后使用.由于本次采取的 26 块新鲜基岩全部是凝灰岩或花岗岩,所以根据王一波等(2019)的研究成果,本次主要进行温度和压力校正,校正后的热导率值才参与计算.

(2) 1992 年中国科学院地质研究所与浙江石油勘探处合作,测定的 29 组石油孔代表性岩石的数据,数据质量高.临孔或相同构造单元的孔与之对比取值.

(3)熊亮萍等(1993)针对中国东南地区岩石热导率的研究成果中对区内 109 个钻孔 721 块样品进行了多种方法的检测、核验,结果十分一致,数据可靠,用于相同岩性取值的参考.

根据以上原则,本次工作实测浙东地区火山岩花岗岩类热导率数据 31 组,收集整理与我省多种岩性相类似的中国东南地区岩石热导率值、浅层地温能钻孔岩性热导率值以及前人石油钻孔岩石热导率值等不同岩性热导率 79 组.将本次筛选的 23 眼地热井热流计算段岩性与得到的 110 组热导率数据对应岩性进行详细地对比、分析不同岩性的加权平均,结合岩石的矿物组成、时代、密度、埋藏深度(温度和压力环境)等因素综合考虑,科学校正后,尽量合理取值.

结果表明,本次用于分析的 52 个钻孔(含前人 29 个)岩石样品的热导率值在 2.0~4.0 W/m/K 范围之内。

侵入岩、火山碎屑岩的热导率变化幅度较小,其中 50% 样品的热导率值为 3.0~4.0 W/m/K,砂岩和泥岩热导率值的变化幅度较大。

5 大地热流值

大地热流数值上等于垂直地温梯度与岩石热导率的乘积,根据目前国内外通用的大地热流值数据质量的评价标准,可将大地热流值数据分为 4 类(姜光政等,2016)(表 1),本次也参考该标准对计算的热流值数据质量进行质量评价(表 2)。

表 1 大地热流值数据质量分类

Table 1 Data quality classification table of large geothermal flow values

分类	质量级别	分类依据
A 类	高质量	测温曲线属稳态热传导型,岩石热导率数据或来自测试段岩心样品测试结果,或通过测区综合热物性柱状图确定;热流计算段深度区间一般大于 50 m
B 类	较高质量	资料情况基本同上,但或是测温段(或热流计算段)长度较小;或是岩石热导率样品数量不足,岩石热导率数据采用邻区测试结果或文献值
C 类	较差质量或不明	测量结果不确定性较大或热流测试参数报道不齐,无法判定其真实质量类别
D 类	局部异常	测试结果明显存在浅层或局部因素的干扰,或测点位于明显地热异常区

表 2 本次新增地热钻孔大地热流计算及质量评价综合

Table 2 Comprehensive table of geothermal heat flow calculation and quality evaluation of newly added geothermal boreholes

序号	井号	位置	计算深度(m)	主要岩性	地温 梯度 (℃/ m)	热导 率 (W/ m/ K)	实测 热流 (mW/ m ²)	数据质量评价	评级
1	嘉热 2 号	120°58′32″E 30°48′48″N	2 000~2 155	O ₃ c 泥岩、含 泥质粉细砂岩	2.33	3.21	74.79	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性变化大,热导率取值参考文献值,不确定性较大	C
2	湘家荡 1 号	120°48′09″E 30°48′27″N	1 900~2 000	S ₂ t 含硅质粉 砂质泥岩	2.40	3.20	76.80	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性变化大,热导率取值参考文献值,不确定性较大	C
3	湘家荡 JDZ2 井	120°48′56″E 30°48′40″N	1 100~1 200	C ₂ h 碳酸盐岩	2.20	3.20	70.40	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性变化小,热导率取值参考邻区及文献值	B
4	闲林 RT5 井	119°59′29″E 30°15′15″N	1 795~1 805	Є ₂ y 灰岩	2.41	3.00	72.36	测温曲线浅部微对流,井深较深,井底段影响小,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性变化小,热导率取值参考邻区及文献值	B
5	闲林 RT2 井	119°59′55″E 30°15′22″N	1 400~1 450	Є ₃ hy 条带状 灰岩	2.38	2.80	66.75	测温曲线传导型,中深部弱对流影响,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性变化大,热导率取值参考文献值,不确定性较大	C
6	昌化 4 号井	119°7′22″E 30°13′05″N	1 360~1 404	K ₁ h 玻屑熔结 凝灰岩	2.43	2.90	70.35	测温曲线传导型,局部受摩擦热影响,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性差异大,热导率取值参考相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
7	千岛湖地热井	119°3′03″E 29°40′59″N	1 400~1 450	Z ₂ l 白云岩、泥 质白云岩	2.67	3.00	80.10	测温曲线浅部微对流,井深较深,井底段影响小,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B

续表 2

序号	井号	位置	计算深度(m)	主要岩性	地温 梯度 (℃/ m)	热导 率 (W/ m/ K)	实测 热流 (mW/ m ²)	数据质量评价	评级
8	桐庐 DR1	119°40′40″E 29°51′37″N	1 400~1 500	S _{2t} 岩屑长石 石英砂岩	2.00	3.50	70.00	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性矿物含量不确定,变化大,热导率取值参考文献值,不确定性较大	C
9	长热 1 井	121°13′13″E 30°17′10″N	836~1 695	E _{3ch} 泥质 粉砂岩	2.78	2.90	80.53	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区实测值	B
10	慈热 1 井	121°12′02″E 30°14′45″N	1 700~1 791	K ₁ 泥岩、 粉砂岩	3.69	2.38	87.92	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B
11	白金汉爵	121°14′14″E 30°09′16″N	2 000~2 200	K ₁ 凝灰岩	2.30	3.30	75.90	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值,不确定性较大	C
12	湿热 1 井	121°09′16″E 30°19′31″N	2 380~2 475	K ₁ 玻屑 凝灰岩	3.14	2.70	84.64	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B
13	象山爵溪	121°58′17″E 29°28′07″N	2 554~2 606	K ₁ 花岗岩	2.77	3.15	87.35	测温曲线浅部微对流,井深较深,井底段影响小,地温梯度井底段准稳态拟合,热导率取值参考邻区及文献值	B
14	西岙-1 井	121°40′16″E 29°44′44″N	900~1 075	K ₁ 流纹岩	2.88	2.85	82.08	测温曲线浅部微对流,井深较深,井底段影响小,地温梯度井底段准稳态拟合,流纹岩样品较少,热导率取值不确定性较大	C
15	诸暨五泄	120°1′38″E 29°42′39″N	1 400~1 500	K ₁ 流纹斑岩	2.70	3.20	86.40	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性矿物含量不清,参考值较多,热导率取值参考邻区及文献值	C
16	汤溪 TXRT1	119°21′50″E 29°00′47″N	1 400~1 800	K ₁ 凝灰岩	2.50	3.30	82.50	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
17	中信堂 DR2	120°17′32″E 29°07′33″N	800~850	K ₁ 流纹质玻 屑熔结凝灰岩	2.59	3.30	85.47	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
18	中信堂 DR1	120°17′24″E 29°07′24″N	800~850	K ₁ 流纹质玻 屑熔结凝灰岩	2.56	3.30	84.48	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
19	银坑 ZK10103	120°45′33″E 29°00′06″N	840~900	K ₁ 流纹质晶 屑玻屑凝灰岩	2.15	3.23	69.44	测温曲线中段对流,井底段受影响较小,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
20	永嘉南陈	120°57′11″E 28°26′15″N	20~1 700	K ₁ 流纹质晶 屑玻屑凝灰岩	1.76	3.50	61.67	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,凝灰岩岩性变化大,热导率取值参考浅部相同岩性实测值及文献值,不确定性较大	C
21	湖山 RT4 孔	118°58′51″E 28°36′23″N	750~800	K ₁ 钾长 花岗斑岩	3.40	2.51	85.34	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B
22	金 66 井	119°9′20″E 29°06′42″N	1 300~1 400	C ₂ 碳酸盐岩	2.56	3.20	81.92	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B
23	秀山 XRT4 井	122°10′27″E 30°10′14″N	1 400~1 495	K ₁ 霏细斑岩	2.02	3.50	70.52	测温曲线传导型,地温梯度井底段准稳态拟合,岩性明确,热导率取值参考邻区及文献值	B

注:前人 29 组大地热流值数据中 A 级 6 个、B 级 10 个、C 级 13 个,具体数据不在本文中列出,可参见《中国大陆地区大地热流数据汇编第三版》(胡圣标等,2001)。

本次计算出 23 个新的大地热流值(表 2), 结合前人的 29 个大地热流值数据, 重新绘制了浙江省大地热流等值线图(图 9)。

浙江省 52 个实测热流值在 $61.67\sim 87.92\text{ mW/m}^2$, 平均 73.74 mW/m^2 , 高于中国东南部大陆的平均热流值 68 mW/m^2 。本次热流测点虽遍及省内各构造单元, 但测点仍不够多, 仅从总体上勾画全省热流分布的格局。

整体来看, 存在 3 个较为明显的地热单元, 可以理解为受不同构造控制的相对独立的 3 个地热系统(庞忠和等, 2015):

(1) 浙东北嘉兴-慈溪-宁波北西向高热流值地热单元。该区主要受长兴-奉化北西向断裂和湖州-嘉善东西向断裂约束, 在地质单元上与浙江的杭嘉湖平原和宁波盆地范围大部分重叠, 以

白垩系断陷盆地和新生代沉积盆地为主要地质构造单元。莫霍面埋深小于 30 km , 居里面埋深小于 28 km , 在慈溪平原和象山的强烈热流区, 居里面埋深多小于 26 km , 是典型的居里面浅埋区。区内现有地热点 20 余处, 是省内地热资源最丰富的地区。地热点多受北东向断裂或北东向与北西向、东西向断裂交汇控制, 其中嘉兴热 1 井为省内目前温度最高的地热点($64\text{ }^{\circ}\text{C}$)。

(2) 浙西南北东向遂昌-兰溪-浦江高热流值地热单元。该区与北东向江山-绍兴拼合带走向一致, 在中部区域被北西向孝丰-三门湾断裂截断, 整个高背景区与浙江最大的白垩系金衢盆地几乎套合。西南的衢州段莫霍面小于 30 km , 居里面埋深均小于 28 km , 是典型的地壳隆升区域。区内已有地热点及异常点 30 多处, 绝大多数与萤石矿伴生, 属于浙

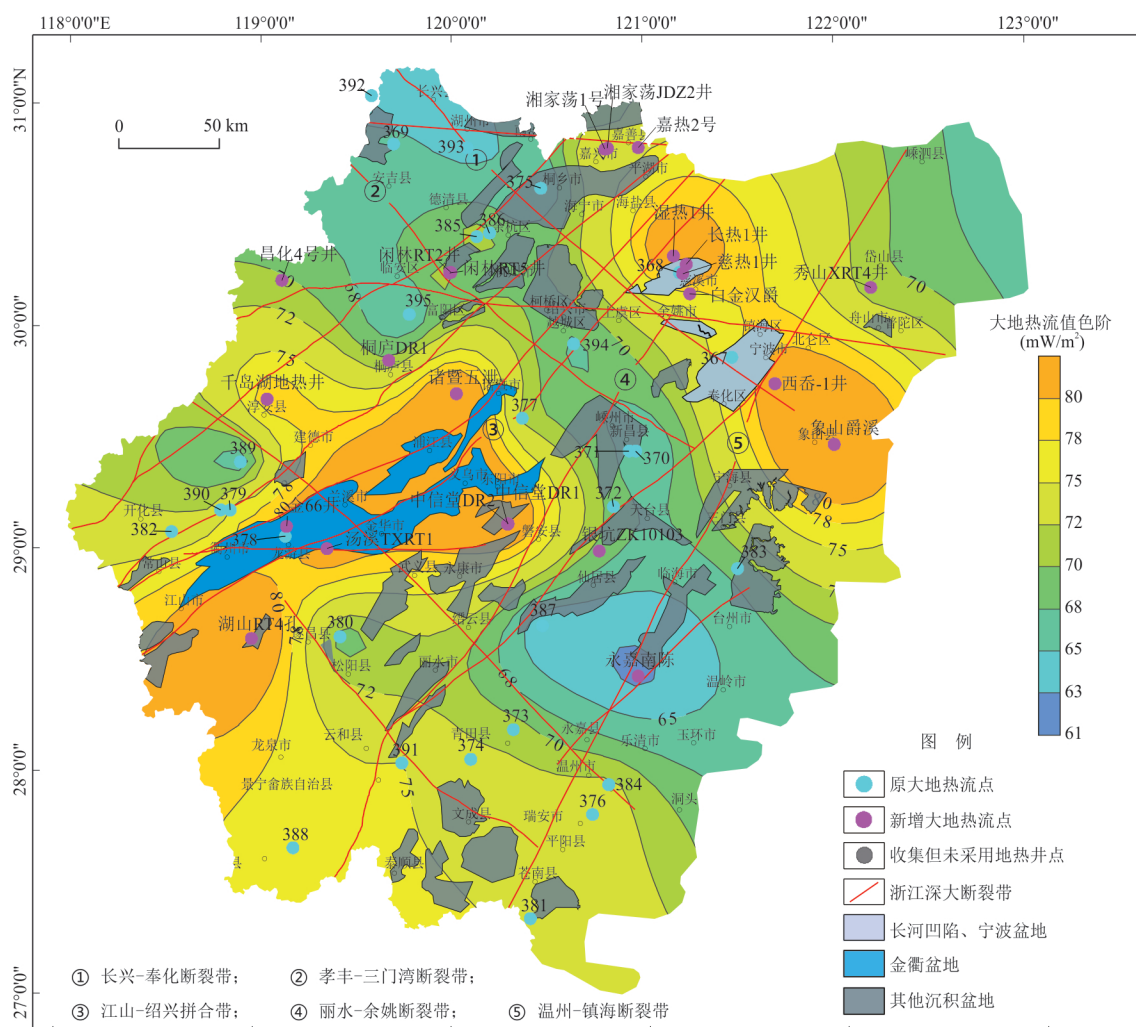


图 9 浙江省最新大地热流值等值线

Fig.9 Isoline map of the latest geodetic heat flow in Zhejiang Province

据 52 组数据拟合

江古泉华最为集中区域,反映了从古至今热液的强烈活动特征.地热点多受北东向控盆断裂和盆内规模较大的北西向次级断裂控制,目前揭露地热水深度多在 1 000 m 以浅,平均温度 40 °C 左右,整体表现出北东向断裂控热,北西向断裂控水的基本特征,深部具有探出中高温地热资源潜力.该区是省内目前已探明水热型地热资源最丰富的区域之一,浙江唯一的中国温泉之城武义就位于该区.

(3) 浙中安吉-闲林-新昌-温岭北西向低热流值地热单元.该区主要受北西向长兴-奉化、孝丰-三门湾以及北东向丽水-余姚 3 条大断裂控制,形成反“L”型低值区域,结合深部地质背景分析,该区莫霍面埋深多大于 30 km,永嘉-仙居居里面埋深大于 28 km,天台-闲林一线居里面也呈现北西向高值条带或串珠状分布.三门-温州一线恰属于温州-镇海北东向断裂的弱活动区,区内目前发现地热点 10 余处,大多数受北西向张性断裂控制,温度普遍低于 40 °C,仅在多组断裂交汇部位存在 3 处温度大于 40 °C 的地热点.

综上,省内热流值最高的区域为长河凹陷、宁波盆地以及金衢盆地中部,反映了热流量的分布与断陷盆地、地壳结构和现代地壳运动产生的构造活动存在密切的相关性(Chapman and Furlong, 1977).在地壳结构差异不大的情况下,新构造运动产生的影响往往大于地壳结构的影响(庞忠和等, 2020),比如省内地热赋存条件最好的温州-镇海断裂的活动段为北部的三门-镇海段,其余为弱活动或不活动段,恰好与热流值的高低分布相对应.

6 结论

(1) 本次研究新增浙江省大地热流值数据 23 组,更新了浙江地温场研究相关图件,为浙江省地热地质研究工作提供了重要的数据支撑和参考依据.

(2) 整体来看,浙江省存在 3 个比较明显的地热单元:浙东北嘉兴-慈溪-宁波北西向高热流值地热系统、浙西南北东向遂昌-兰溪-浦江高热流值地热系统、浙中安吉-闲林-新昌-温岭北西向低热流值地热单元.热流值最高的区域为长河凹陷、宁波盆地以及金衢盆地中部等沉积盆地区.

(3) 地热系统的分布主要受北东向江山-绍兴拼合带、丽水余姚大断裂以及北西向长兴-奉化、孝丰三门湾断裂的控制.与浙江莫霍面、居里面等地

壳结构的特征面分布特征基本一致,与浙江大型白垩纪断陷盆地和新生代沉积盆地在空间上吻合度较高,与现代地壳运动和构造活动性密切相关.

References

- Chapman, D. S., Furlong, K. P., 1977. Continental Heat Flow-Age Relationships. *Eos, Transactions AGU*, 58: 1240—1251.
- He, C. Y., 1987. Approach to Curie Point Isothermal Surface of Zhejiang Province. *Computing Techniques for Geophysical and Geochemical Exploration*, 9(3): 256—259 (in Chinese with English abstract).
- He, L. J., Hu, S. B., Wang, J. Y., 2001. Characteristics of Thermal Structure of Lithosphere in the Eastern Mainland of China. *Progress in Natural Science*, 11(9): 966—969 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. B., He, L. J., Wang, J. Y., 2001. Compilation of Heat Flow Data in the China Continental Area (3rd Edition). *Chinese Journal of Geology*, 44(5): 611—626 (in Chinese with English abstract).
- Hu, S. B., Huang, S. P., 2015. Land heat Flow in China. In: Wang, J. Y., et al., eds., *Geothermal Science and Its Application*. Science Press, Beijing, 64—122 (in Chinese).
- Jiang, G. Z., Gao, P., Rao, S., et al., 2016. Compilation of Heat Flowdata in the China Continental Area (4rd Edition). *Chinese Journal of Geology*, 59(8): 2892—2910 (in Chinese with English abstract).
- Kong, X. R., Xiong, S. B., Zhou, W. X., 1995. New Progress on Deep Geophysical Research in Zhejiang: Geological Sections of Tunxi-Wenzhou and Zhuji-Linhai and the Achievements of Their Regionalgravity. *Geology of Zhejiang*, 11(1): 50—62 (in Chinese with English abstract).
- Kuang, J., Qi, S. H., Wang, S., et al., 2020. Granite Intrusion in Huizhou, Guangdong Province and Its Geothermal Implications. *Earth Science*, 45(4): 1466—1480 (in Chinese with English abstract).
- Li, H. T., 2015. Evaluation of Dry and Hot Rock Resources in Zhejiang Mainland. Commemorating the 120th Anniversary of the Birth of Geologist Zhu Tingyi—Proceedings of the 2015 Annual Meeting of Zhejiang Geological Society, Hangzhou (in Chinese).
- Li, W. W., Rao, S., Tang, X. Y., et al., 2014. Borehole Temperature Logging and Temperature Field in the Xiongxi Geothermal Field, Hebei Province. *Chinese Journal of Geology*, 49(3): 850—863 (in Chinese with English abstract).
- Pang, Z. H., Hu, S. B., Wang, S. J., et al., 2015. Land

- Heat Flow in China. In: Wang, J. Y., et al., eds., *Geothermal Science and Its Application*. Science Press, Beijing, 257—376 (in Chinese).
- Pang, Z. H., Luo, J., Cheng, Y. Z., et al., 2020. Evaluation of Geological Conditions for the Development of Deep Geothermal Energy in China. *Earth Science Frontiers*, 27(1): 134—151 (in Chinese with English abstract).
- Ruan, W. C., Zhong, C. Y., Jiang, W. S., et al., 1994. Report on the Latest Geothermal Flow Data in Zhejiang Province. *Chinese Science Bulletin*, 39(10): 920—923 (in Chinese).
- Wang, Y. B., Hu, S. B., Nie, D. G., et al., 2019. Is the Tan-Lu Fault Zone a Thermal Anomaly Belt: Constraints from Heat Flow in Its Southern Section. *Chinese Journal of Geophysics*, 62(8): 3078—3094 (in Chinese with English abstract).
- Xiong, L. P., Hu, S. B., Wang, J. Y., 1993. Terrestrial Heat Flow Values in Southeastern China. *Chinese Journal of Geophysics*, 36(6): 784—790 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M., Zhao, P., Zhu, C. Q., et al., 2010. Borehole Temperature Logging and Terrestrial Heat Flow Distribution in Jiangnan Basin. *Chinese Journal of Geology*, 45(1): 317—323 (in Chinese with English abstract).
- Xu, M., Zhu, C. Q., Tian, Y. T., et al., 2011. Borehole Temperature Logging and Characteristics of Subsurface Temperature in the Sichuan Basin. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(4): 1052—1060 (in Chinese with English abstract).
- Xu, Z. K., Xu, S. G., Zhang, S. T., 2021. Hydro-Geochemistry of Anning Geothermal Field and Flow Channels Inferring of Upper Geothermal Reservoir. *Earth Science*, 46(11): 4175—4187 (in Chinese with English abstract).
- Zhang, S. Q., Li, X. F., Song, J., et al., 2021. Analysis on Geophysical Evidence for Existence of Partial Melting Layer in Crust and Regional Heat Source Mechanism for Hot Dry Rock Resources of Gonghe Basin. *Earth Science*, 46(4): 1416—1436 (in Chinese with English abstract).
- 256—259.
- 何丽娟, 胡圣标, 汪集旸, 2001. 中国东部大陆地区岩石圈热结构特征. *自然科学进展*, 11(9): 966—969.
- 胡圣标, 何丽娟, 汪集旸, 2001. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版). *地球物理学报*, 44(5): 611—626.
- 胡圣标, 黄少鹏, 2015. 中国陆地大地热流. 汪集旸, 等, 编. *地热学及其应用*. 北京: 科学出版社, 64—122.
- 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.
- 孔祥儒, 熊绍伯, 周文星, 1995. 浙江省深部地球物理研究新进展: 屯溪-温州、诸暨-临海地学断面及区域重力研究成果. *浙江地质*, 11(1): 50—62.
- 旷健, 祁士华, 王帅, 等, 2020. 广东惠州花岗岩体及其地热意义. *地球科学*, 45(4): 1466—1480.
- 李海亭, 2015. 浙江大陆地区干热岩资源评估. 杭州: 纪念地质学家朱庭祜先生诞辰120周年——浙江省地质学会2015年学术年会.
- 李卫卫, 饶松, 唐晓音, 等, 2014. 河北雄县地热田钻井地温测量及地温场特征. *地质科学*, 49(3): 850—863.
- 庞忠和, 胡圣标, 王社教, 2015. 中国陆地大地热流. 汪集旸, 等, 编. *地热学及其应用*. 北京: 科学出版社, 257—376.
- 庞忠和, 罗霖, 程远志, 等, 2020. 中国深层地热能开采的地质条件评价. *地学前缘*, 27(1): 134—151.
- 阮万才, 钟朝旸, 蒋维三, 等, 1994. 浙江省最新大地热流数据报道. *科学通报*, 39(10): 920—923.
- 王一波, 胡圣标, 聂栋刚, 等, 2019. 郯庐断裂带是热异常带吗: 来自断裂带南段热流的约束. *地球物理学报*, 62(8): 3078—3094.
- 熊亮萍, 胡圣标, 汪集旸, 1993. 中国东南地区实测热流值. *地球物理学报*, 36(6): 784—790.
- 徐明, 赵平, 朱传庆, 等, 2010. 江汉盆地钻井地温测量和大地热流分布. *地质科学*, 45(1): 317—323.
- 徐明, 朱传庆, 田云涛, 等, 2011. 四川盆地钻孔温度测量及现今地热特征. *地球物理学报*, 54(4): 1052—1060.
- 徐梓矿, 徐世光, 张世涛, 2021. 安宁地热田浅部热储水化学特征及补给通道位置. *地球科学*, 46(11): 4175—4187.
- 张森琦, 李旭峰, 宋健, 等, 2021. 共和盆地壳内部分熔融层存在的地球物理证据与干热岩资源区域性热源分析. *地球科学*, 46(4): 1416—1436.

附中文参考文献

何长友, 1987. 浙江省居里面初探. *物化探计算技术*, 9(3):