

江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制

刘峰^{1,2,3}, 王贵玲^{1,3}, 张薇^{1,3}, 岳晨^{1,3}, 甘浩男^{1,3}, 肖则佑⁴, 欧小科⁵
LIU Feng^{1,2,3}, WANG Guiling^{1,3}, ZHANG Wei^{1,3}, YUE Chen^{1,3}, GAN Haonan^{1,3}, XIAO Zeyou⁴,
OU Xiaoke⁵

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. 中国地质大学(北京), 北京 100083;

3. 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;

4. 江西省地质矿产勘查开发局赣南地质调查大队, 江西 赣州 341000;

5. 深圳市市政设计研究院有限公司, 广东 深圳 518000

1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;

2. China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China;

3. Technological Innovation Center of Geothermal & Hot Dry Rock Exploration and Development, MNR, Shijiazhuang 050061, Hebei, China;

4. South Jiangxi Geological Surveying Party, Jiangxi Bureau of Exploration and Development of Geology and Minerals, Ganzhou 341000, Jiangxi, China;

5. Shenzhen Municipal Design and Research Institute Co., Ltd., Shenzhen 518000, Guangdong, China

摘要:江西省宁都县北部地区地热资源丰富,但地热地质研究程度较低,制约着区域地热资源的研究与可持续发展。在前人研究基础上,依托中国地质调查工作,对研究区大地热流特征及地热成因机制进行分析。基于钻孔测温与热导率测试数据,分析校正得到区域内大地热流平均值为 93.6 mW/m^2 ,远高于中国陆区平均值 62.5 mW/m^2 ,区域热背景值较高。通过放射性测试可知本区大面积出露的花岗岩与混合岩放射性生热率平均值为 $6.47 \mu\text{W/m}^3$,属高放射性岩体,岩石的放射性衰变产热应是本区大地热流值较高的重要原因,幔源供热的基础上附加壳源产热,提供了稳定的热源。在此基础上,穿越本区的2条深大断裂及其次生断裂则为地下水深循环提供了传热与导水通道。因此推测,研究区地热资源成因机制为“高热流与高产热花岗岩体生热+多级次断裂控热导水”的成因模式,该模式代表性较强,可为赣南地区地热找矿提供指导。

关键词:赣南地区;大地热流;高产热花岗岩;地热成因模式

中图分类号: P588.12⁺1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2020)12-1883-08

Liu F, Wang G L, Zhang W, Yue C, Gan H N, Xiao Z Y, Ou X K. Terrestrial heat flow and geothermal genesis mechanism of geothermal resources in northern Ningdu County, Jiangxi Province. *Geological Bulletin of China*, 2020, 39(12): 1883-1890

Abstract: The northern area of Ningdu County is rich in geothermal resources; nevertheless, the blank research on terrestrial heat flow and geothermal mineralization background restricts the exploitation and utilization of geothermal resources seriously. Based on previous research and geological survey, the authors analyzed the terrestrial heat flow and geothermal genesis mechanism of the study area. The conclusions are as follows: firstly, based on well temperature measurement and thermal conductivity data, the authors detected that the average terrestrial heat flow is 93.6 mW/m^2 in this region, which is far higher than the average terrestrial heat flow 62.5 mW/m^2 in

收稿日期:2020-07-10; 修订日期:2020-09-21

资助项目:中国地质调查局项目《全国大地热流值测量与靶区优选》(编号:DD20190128)

作者简介:刘峰(1988-),男,硕士,助理研究员,从事地热地质、水文地质调查研究。E-mail:xtliufeng@foxmail.com

通讯作者:王贵玲(1964-),男,博士,研究员,从事地热地质、水文地质调查研究。E-mail:guilingw@163.com

China's continental regions. This area has a relatively strong strength of geothermal background. Secondly, the average radiation heat generation rate of the exposed granite and migmatite in this area is 6.47 W/m^3 , suggesting a highly radioactive rock mass. The radioactive decay heat generation of the rock is an important reason for high terrestrial heat flow in this area. Besides heating from mantle source, shell source heat generation is added to provide a stable heat source. On the other hand, two deep faults and their secondary faults across this region has provided heat transfer and water flowing channels for deep circulation of hot groundwater. Therefore, it is inferred that the formation mechanism of geothermal resources in the research area could be described as the "high heat flow background + rocks with high heat production + multi-level thermal control and water conducted faults". This study provides guidance for geothermal prospecting in Gannan area.

Key words: Gannan area; terrestrial heat flows; high-yielding thermal granite; geothermal genesis model

区域大地热流值特征是地热场特征的综合表征^[1-2],是地球内部热动力过程的地表显示^[3-4]。放射性元素衰变是地球内热的重要来源,也是地热资源的主要热源之一^[5-6]。研究区域大地热流特征及主要岩性放射性,对于研究区域地热资源成因及开

发利用潜力具有重要意义^[7]。截至目前,江西省境内实测热流点 21 个(图 1),北部较多,南部较少^[8]。宁都县位于江西省中部,地热资源丰富,尤其县城以北地区近年来发现多处地热田^[9],地热开发潜力较大,但区内大地热流测量工作仍为空白,地热研

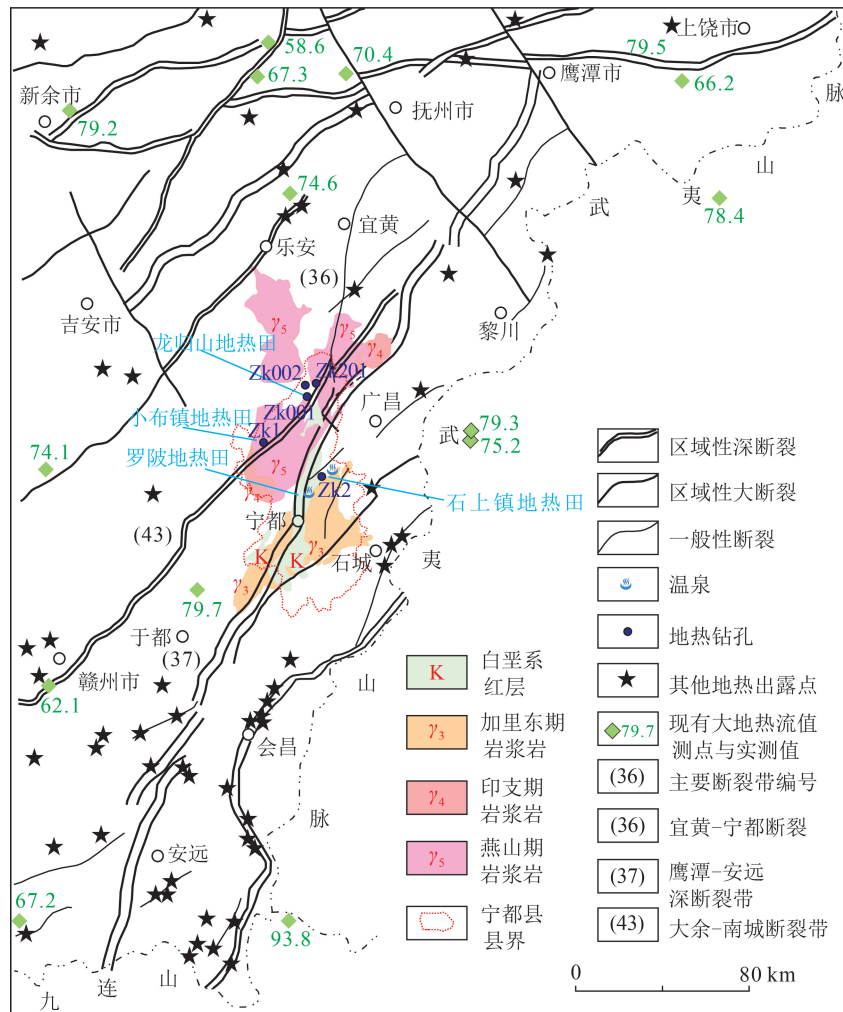


图 1 研究区位置及地热地质条件略图(据参考文献[9]修改)

Fig. 1 Location of the study area and schematic map of geothermal geology

究程度较低,制约着区域地热资源的研究与可持续发展。因此,本文选定宁都县北部为典型区,结合钻孔测温、钻孔温度监测、岩心热物性参数测试等方法,计算该地区大地热流值与主要岩性放射性生热率,分析区域地热资源成因机制,可为该地区地热地质研究提供基础数据,为区域地热资源开发利用提供技术指导。

1 地热地质背景

宁都县位于江西省中部,县城以北约 2000 km² 的范围内发育小布镇、龙归山、石上镇、罗陂等地热田(图 1),分布较密集。该区域位于鹰潭—安远深断裂带与大余—南城断裂带之间,属东南造山带的赣南隆起带。鹰潭—安远深断裂带呈北北东向延伸,切割深度达 20 km,断裂受多期次构造活动影响,形成大量相互平行的次级断裂。大余—南城断裂带呈北东向延伸,在宁都县以北与鹰潭—安远深断裂带相交,该断裂由一系列数十千米到百千米的冲断层或斜冲断层排列组成^[10]。2 条大断裂带及其次级断裂切割了基底变质岩及不同期次的岩浆岩,为地热资源的形成提供了良好的导热导水通道。区内广泛发育多期次的岩浆岩,侵入体接触带多发育混合岩。这些岩层受断裂切割,为区域地热资源的赋存提供了良好的赋存空间。部分地区出露第四纪、白垩纪形成的红层,厚度较薄,是较好的热储盖层。

研究区现有地热田均位于两大断裂带周边。其中小布镇地热田位于大余—南城断裂带以西,天然温泉水温 26℃,并由中国地质科学院水文地质环境地质研究所 2019 年首次钻获水温 45℃ 的地热井。石上镇、罗陂地热田均位于鹰潭—安远深断裂带以东,石上镇地热钻孔出水温度约 78℃,罗陂地热钻孔水温约 40℃。龙归山地热田位于 2 条断裂带交汇处,地热钻孔出水温度为 25~48.5℃。

2 钻孔地温测量

在研究区的 4 个地热田开展了钻孔地温测井、孔底测温、地温监测与资料收集工作,随钻孔底测温采用 TH212 型深井测温仪,测量范围为 0~350℃,精度 0.01℃。地温测井采用 SKD-3000B 测井车进行,测量范围为 -50~100℃,分辨率为 0.05℃,精度为 0.2℃。地温监测采用 TD-016C 型

地温监测系统,测量范围 0~90℃,分辨率为 0.05℃,精度为 0.2℃,监测时间间隔 1 min。孔底测温为随钻测温,地温测井工作为钻探完成 48 h 后进行,满足水文测井工作规范(DZT 0181—1997),ZK1 钻孔地温监测工作为完井 180 d 后进行,持续时间 30 d,监测数据为监测开始后 15~30 d 的平均值。综上,孔底测温与地温监测所测井温基本恢复达到稳态或似稳态状态^[11]。各钻孔测温数据如图 2 所示,其中小布镇 ZK1、龙归山 ZK002 钻孔井口温度小于 30℃,在大部分深度范围内温度变化较均匀,井温—深度关系呈现明显的线性特征,地温梯度变化较小。而龙归山 ZK001、ZK201、石上镇 ZK2 井口温度大于 50℃,随深度增加井温基本没有变化,井温受地下水影响明显。石上镇 ZK2 井在 450 m 深度附近甚至出现地温梯度为负值的情况,应为在该深度周边岩层中大量冷水汇入所致。

综合岩性特征与抽水试验成果分析,小布镇 ZK1 井主要热储为断裂切割岩浆岩层形成的多层小型裂隙带,主要在 154~158 m、292~293 m、339~340 m、461~469 m、587~589 m 五个深度段发育,累

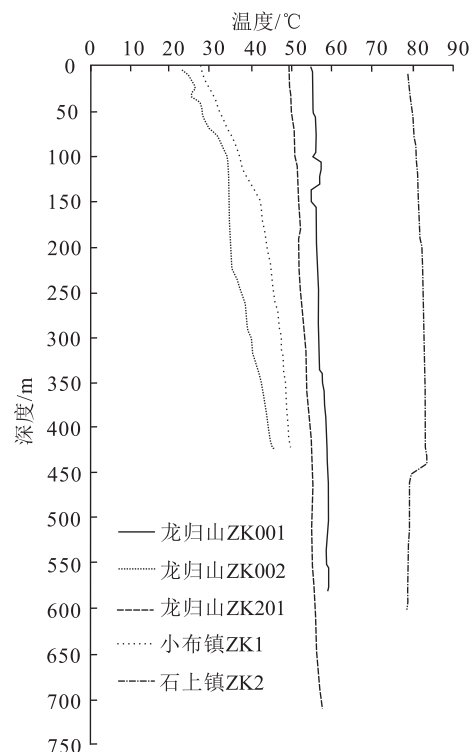


图 2 宁都县北部主要地热钻孔测温曲线
Fig. 2 Temperature curve of main geothermal wells innorthern Ningdu County

计厚度 16.10 m。龙归山的多口地热井热储呈带状分布,赋存于混合岩断裂裂隙中,热储段在303~661 m 深度多层发育,不同层位渗透性不均。石上镇 ZK2 钻孔主要在 82~210 m、372~602 m 发育裂隙,其中在 400~500 m 深度范围内有冷水混入,使水温降低,形成负地温梯度(图 2)。

基于以上钻孔温度特征与钻孔含水层特征,选取小布镇 ZK1、龙归山 ZK002 两口井中温度-深度曲线较平直、受地下水影响较小的深度段进行地温梯度的计算,结合该深度段内的地层热导率测试数据,求得当地代表性大地热流值。收集到的资料中,龙归山地热田 4 口钻孔在钻探过程中进行了定深孔底测温,因为孔底温度相较于其他部位更接近于原始岩温^[12]。同时,龙归山地热田地热井系统测温受裂隙导热影响较大,因此龙归山 ZK002 井采用孔底温度变化曲线参与计算。

综上,分别选取小布镇 ZK1 井的 200~420 m 深度段(图 3)系统测温数据与龙归山 ZK002 井的 230~320 m 段孔底测温数据(图 4)为温度计算数据,结合岩心热导率测试结果,进行大地热流值计算。

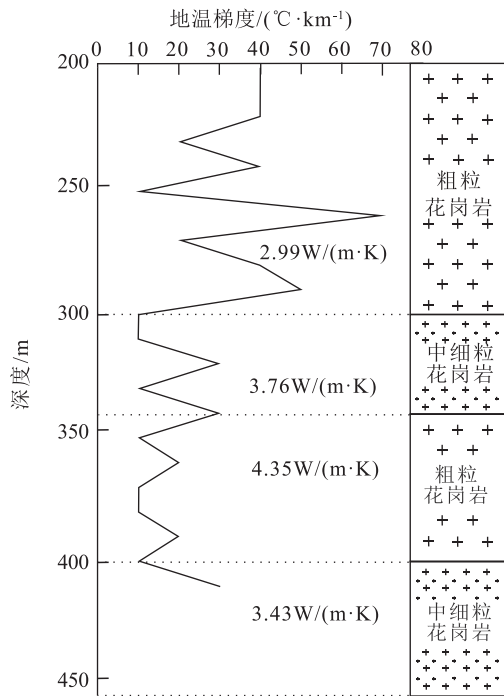


图 3 小布镇 ZK1 钻孔大地热流计算段地温梯度-深度剖面
Fig. 3 Geothermal gradient-depth profile of well ZK1 for heat flow calculation in Xiaobu County

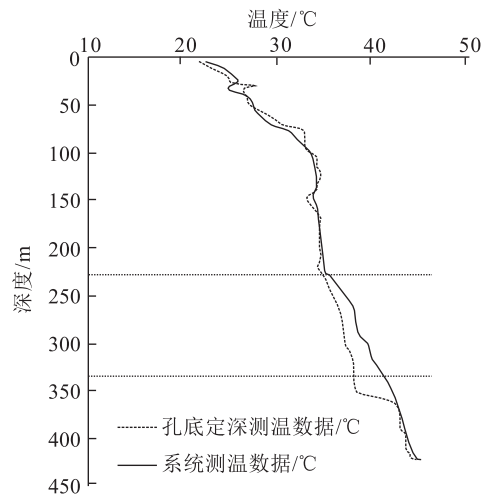


图 4 龙归山 ZK002 钻孔系统测温及孔底测温曲线对比
Fig. 4 Comparison for systematic temperature measurement and temperature-sensing curves of bottom well ZK002 in Longgui Mountain

3 主要岩性热物性参数测试

本次共取得小布镇 ZK1 钻孔热导率测试岩样 8 组,取样深度为 80~610 m。小布镇 ZK1 钻孔,0~29 m 深度为花岗岩风化层,29~284 m 为粗粒花岗岩,280~350 m 为中细粒花岗岩,350~386 m、386~434 m 为上述 2 类花岗岩互层,434~590 m 为中细粒花岗岩,590 m 以下又变为粗粒花岗岩。龙归山 ZK002 孔共取岩样 6 组,以混合岩为主,其中 17 m 以上为沉积层与风化层,17~422 m 大部分为浅灰色-浅肉红色条带状混合岩,其间夹杂多层厚度较小的硅化破碎带、墨绿色混合岩、浅灰色细晶岩等岩层,厚度一般不超过 15 m。

岩石热导率测试由东华理工大学完成,使用仪器为德国生产的 TCS (Thermal Conductivity Scanning) 热导率自动扫描仪,测量范围为 0.2~25 W/(m·K),测量精度为 3%。如表 1 所示,本区主要岩心热导率变化范围为 2.46~4.35 W/(m·K),平均值为 3.32 W/(m·K),岩层导热效果较好,利于地层热量的传播。粗粒花岗岩与中细粒花岗岩热导率无明确差别,但受裂隙带及破碎程度影响,热导率差别较大。混合岩热导率变化较小,介于 3.11~3.57 W/(m·K) 之间。

表 1 宁都县北部主要钻孔岩性热导率与放射性参数

Table 1 Lithologic heat conductivity and radioactive parameters for main wells innorthern Ningdu County

样品编号	取样钻孔	取样深度 /m	岩性	热导率 /(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	密度 /(g·cm ⁻³)	U/10 ⁻⁶	Th/10 ⁻⁶	K /%	放射性生热率 /(μW·m ⁻³)
NDZK1-1	小布镇 ZK1	87.9	粗粒花岗岩	3.525	2.66	7.5	24.48	3.38	3.87
NDZK1-2	小布镇 ZK1	161.1	粗粒花岗岩	2.455	2.63	7.71	15.38	4.21	3.35
NDZK1-3	小布镇 ZK1	233.0	粗粒花岗岩	2.884	2.66	8.19	32.68	3.02	4.58
NDZK1-4	小布镇 ZK1	302.3	中细粒花岗岩	3.759	2.65	14.6	31.21	4.32	6.2
NDZK1-5	小布镇 ZK1	372.0	粗粒花岗岩	4.353	2.63	18.49	40.13	4.25	7.73
NDZK1-6	小布镇 ZK1	453.2	中细粒花岗岩	3.458	2.68	10.22	37.54	2.72	5.44
NDZK1-7	小布镇 ZK1	526.1	中细粒花岗岩	3.402	2.66	10.56	35.12	4.04	5.45
NDZK1-8	小布镇 ZK1	608.0	粗粒花岗岩	2.952	2.70	8.88	46.98	4.39	5.94
LGS-3-1	龙归山 ZK002	237.1	黑云母花岗斑岩	3.176	2.67	10.6	72.3	4.66	8.46
LGS-6	龙归山 ZK002	251.1	细晶岩	3.565	2.70	19.1	43.0	5.24	8.68
LGS-2-1	龙归山 ZK002	274.3	条带状混合岩	3.113	2.67	7.87	52.6	4.06	6.26
LGS-1-1	龙归山 ZK002	292.9	弱硅化混合岩	3.243	2.66	6.09	29.7	3.69	4.11
LGS-4-1	龙归山 ZK002	337.6	混合岩	3.289	2.69	5.86	49.0	4.14	5.48
LGS-5	龙归山 ZK002	411.1	混合岩	3.302	2.68	17.5	139	4.77	15.09

4 区域大地热流特征

根据所选取的测温段与该段岩层热导率,对研究区 2 口地热井的大地热流进行分段加权平均,即:

$$Q = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i L_i}{L} = \sum_{i=1}^n \frac{\Delta T_i K_i L_i}{L_i L} \quad (1)$$

式中:Q 为该井计算所得的大地热流值;Q_i 为其中某一测温段 L_i 的大地热流值,由该测温段的地温梯度 ΔT_i/L_i 与该段的热导率 K_i 相乘得来;L 为所有测温段长度 L_i 的总和。所得结果如表 2 所示。

其中,ZK1 的 200~420 m 测温段根据岩性不同(图 3)分为 4 段,分别为 200~300 m、300~340 m、340~400 m、400~420 m;ZK002 的 230~320 m 测温段根据岩性不同(图 5)分为 5 段,分别为 230~243 m、243~251 m、251~284 m、284~301 m、301~320 m。

同时,由于岩石的热导率受温度的影响,为获取精确的大地热流值数据,需对不同温度下岩层热导率进行校正,校正公式为:

$$K(0) = K(25) \{ 1.007 + 25 [0.0037 - 0.0074 / K(25)] \}$$

$$\lambda(0) = \lambda(25) \{ 1.007 + 25 [0.0037 - 0.0074 / \lambda(25)] \} \quad (2)$$

$$K(T) = K(0) / \{ 1.007 + T [0.0036 - 0.0072 / K(0)] \} \quad (3)$$

式中:T 为钻孔岩心原位温度(°C),K(0) 和 K(25) 分别为岩石在 0°C 和 25°C 时的热导率值,单位 W/(m·K)。前人研究表明,该公式对中国大陆

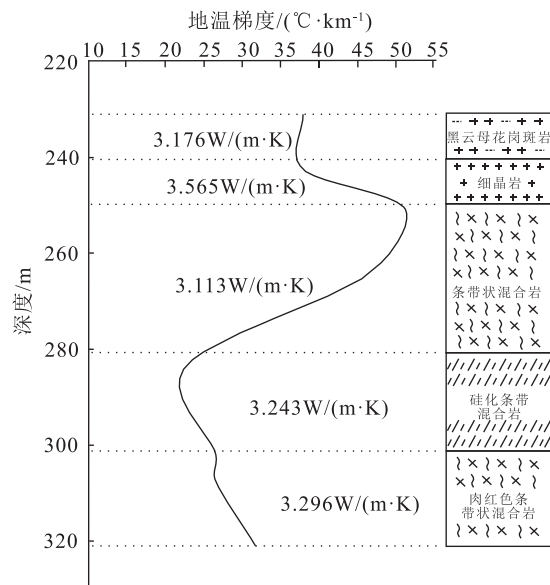


图 5 龙归山 ZK002 钻孔大地热流计算段地温梯度-深度剖面
Fig. 5 Geothermal gradient-depth profile of well ZK002 for heat flow calculation in Longgui Mountain

地区几千米内的地层较适用^[11, 13]。

宁都县北部代表钻孔大地热流测量值与校正值如表2所示。其中小布镇 ZK1 钻孔测温段长度、测温段数据质量、热导率测试样品数均达到了大地热流值测量的 A 类(最高级别)标准^[14-16], 为新增 A 类数据点。龙归山 ZK002 钻孔测温曲线平直段较短, 地温梯度变化较大, 保守起见列为 B 类数据。小布镇 ZK1 钻孔大地热流值由 4 个岩性段所测得的热流值利用厚度加权平均而来。如图 3 所示, 根据各段热导率与地温梯度综合计算, 最终标准偏差为 5 mW/m²。同理, 龙归山 ZK002 钻孔大地热流值标准偏差为 12 mW/m²。

通过以上研究可知, 宁都县北部大地热流值约为 81~106 mW/m², 平均为 93.6 mW/m², 略高于周边兴国县(79.7 mW/m²)、万安县(74.1 mW/m²)的实测数据^[8, 17], 远大于全球大陆大地热流平均值 65 mW/m²^[14]与中国陆区平均值 62.5 mW/m²^[18-19]。实测数据说明赣南地区均属于高热流值区域, 而宁都县北部的热流值尤其高。大地热流是最能确切反映一个地区地温场的参数^[20-23]。研究区极高的大地热流值, 表明该区域具有较高的区域热背景值, 具备发育地热田的良好地热地质条件。研究区发育 4 处地热田(图 1), 在整个江西省属地热资源较丰富的地区, 地热赋存条件与大地热流值较吻合。

5 区域岩层放射性特征

研究区大量发育岩浆岩与混合岩(图 1), 其中花岗岩大面积分布, 不同期次均有出露, 混合岩类则多在断裂活动处发育, 2 类岩体放射性元素含量均较高^[24]。在岩石的放射性元素中, U、Th、K 元素丰度高、产热率大、半衰期长, 具备热源条件^[25]。岩石

放射性生热率通过测量岩石中 U、Th、K 三种元素的含量计算得出。对于岩石生热率的计算, 学者们提出了很多方法, 目前应用较多的方法是 Rybach^[26]提出的计算公式, 其计算公式如下:

$$A=0.01\rho(9.52C_u+2.56C_{Th}+3.48C_k) \quad (4)$$

式中: A 为岩石放射性生热率($\mu\text{W}/\text{m}^3$); ρ 为岩石密度(g/cm^3); C_u 、 C_{Th} 、 C_k 分别为岩石中 U(10^{-6})、Th(10^{-6})、K(%)。岩石 U、Th、K 含量及密度测试由核工业二三〇研究所分析测试中心完成, U、Th 使用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)测定, 不确定度为 1%~10%, K 元素由 X 射线荧光光谱仪(XRF)测定, 不确定度为 1%~2%。

宁都县北部主要岩性的 U、Th、K 含量及放射性生热率如表 1 所示。主要岩性放射性生热率平均值为 6.47 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 。按岩性统计, 花岗岩类平均值为 5.67 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 混合岩类平均值为 7.92 $\mu\text{W}/\text{m}^3$; 均大于 5 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 属于高产热岩体^[27-28]; 按区域统计, 小布镇岩体放射性生热率平均值为 5.32 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 龙归山平均值为 8.01 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 与小布镇主要出露花岗岩, 龙归山地区主要出露混合岩类有关。前人研究表明, 漳州、共和等地热田花岗岩类岩体平均生热率分别为 4.13 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ 和 3.2 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 广东热水岩体最高为 7.60 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 法国中央高原岩最高为 5.25 $\mu\text{W}/\text{m}^3$ ^[29-33]。研究区主要岩体生热率高于以上知名地热田。由原地矿部实施的新疆阿尔泰-四川黑水-台湾地学断面穿过宁都县北部地区, 沿线地质区带图及地壳速度剖面显示, 宁都县北部沉积层仅几十米厚, 下部为花岗岩基底, 厚 5~7 km, 花岗岩基底之下为上地壳^[34]。宁都县北部实测花岗岩生热率平均值为 5.67 $\mu\text{W}/\text{m}^3$, 230 m 深度以下实测值均大于平均值。因此, 研究区花岗岩放射性衰变的热流贡献为 28.35~39.69 mW/m², 占研究区域地表大地热流值的 30%~42%, 大于 1/3, 说明这些高产热岩体的放射性衰变产热可为研究区地热资源的形成提供热源^[35-36]。

6 讨论

基于以上研究, 计算得出的宁都县北部大地热流值有 2 个, 其代表性可从以下几方面说明。

(1) 宁都县北部共发育地热田 4 处, 其中已开展地热钻探工作的有 3 处, 共钻探地热井 5 口。本次收集了研究区现有全部地热钻孔的测温曲线(图 2),

表 2 宁都县北部大地热流值计算成果

Table 2 Terrestrial heat flows calculation results innorthern Ningdu County

经纬度	测量钻孔	大地热流值	校正值	测温段长度	热导率数据	质量
		$(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$	$(\text{mW} \cdot \text{m}^{-2})$	/m	样品数/个	
115.82°E, 26.80°N	小布镇 ZK1	83.77	81.13	220	8	A
116.05°E, 27.06°N	龙归山 ZK002	107.83	105.99	90	6	B

并优选出小布镇 ZK1、龙归山 ZK002 两口井中较平直的测温曲线作为基础测温数据,数据可用性较强,测点分布较均匀。

(2) 2 个大地热流值的计算与校正严格按照历次中国陆区大地热流汇编的方法^[8, 14-16]进行,连续测温段均超过 50 m,计算热流值所用的岩石热导率为钻孔内对应深度岩心实测结果,均达到 A 类点的标准^[12],数据精确性较强。

综上,本次全面收集并分析了宁都县北部的地温测井、岩心热导率、放射性特征及基础地质条件,在研究区增加高质量大地热流值测点 2 个,有效填补了该区域大地热流值测量点的空白,在现有研究程度下具有较好的代表性。

7 结论与建议

本次在宁都县北部开展的地热地质调查及主要钻孔地温测井、岩心热导率、放射性测试等工作基础上,分析了研究区的构造控热条件、大地热流特征及地热成因机制。基于以上研究,得出如下结论。

(1) 根据实测资料计算,宁都县北部大地热流值平均值为 93.6 mW/m^2 ,远高于中国陆区平均值与全球陆区平均值,表明该区域热背景值较高,地壳、地幔均向地表散发大量热量,在较好的水热连通条件下易形成地热田。

(2) 宁都县北部地区主要岩体花岗岩及混合岩放射性生热率平均值高达 $6.47 \mu\text{W/m}^3$,在全球范围内属于较高水平,说明该区域大面积分布的花岗岩是区域热流值较高的重要因素之一,为区域地热的发育提供部分热源。

(3) 宁都县北部地热显示较多,且均发育于北东向展布的大余-南城断裂与鹰潭-安远深断裂沿线或其分支断裂上,地热水主要赋存于断裂形成的裂隙及破碎带中,表明两大断裂及其分支断裂为研究区的温泉、地热井提供了传热与导水的通道,区域地热资源发育主要受两大断裂控制。

综上,推测宁都县北部的地热资源成因机制为“高热流与高产热花岗岩体生热+多级次断裂控热导水”。该成因机制与区域地热资源分布规律及以上研究成果较吻合,对当地及赣南地区的地热资源勘查具有一定借鉴意义。同时,由于赣南地区地热基础研究程度较低,该模式在更大区域尺度上的适

宜性仍有待进一步分析。建议在赣南地区继续开展大地热流值测量及构造控热研究工作,为赣南地区地热找矿提供更为有效的理论指导。

致谢:感谢审稿专家对本文提出了宝贵意见,大地热流校正得到中国科学院地质与地球物理研究所胡圣标、姜光政老师的大力帮助,热导率测试得到东华理工大学王安东老师的帮助,在此一并致谢。

参考文献

- [1] 陈爱华,徐行,罗贤虎,等.南海北康盆地热流分布特征及其构造控制因素探讨[J].地质学报,2017,91(8): 1720-1728.
- [2] 罗璐,朱霞,何春燕,等.陕西咸阳地热田地热流体成因研究[J].地质论评,2019,65(6): 1422-1430.
- [3] Furlong K P, Chapman D S. Thermal state of the lithosphere [J]. Reviews of Geophysics, 1987, 25(6): 1255-1264.
- [4] Pollack H N, Hurter S J, Johnson J R. Heatflow from the Earth's interior: Analysis of the global data set [J]. Reviews of Geophysics, 1993, 31(3): 267-280.
- [5] 汪集咏,孙占学.神奇的地热[M].北京:清华大学出版社,2001: 1-114.
- [6] (西德)卡普迈耶 O,海涅尔 R.地热学及其应用[M].佟伟,廖志杰,过帼颖,等译著.1981: 18-35.
- [7] Liu F, Lang X J, Lu C, et al. Thermophysical parameters and lithospheric thermal structure in Guide Basin, Northeast Qinghai-Tibet Plateau [J]. Environmental Earth Science, 2017, 76(5): 199.1-199.12.
- [8] 姜光政,高棚,饶松,等.中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J].地球物理学报,2016,59(8): 2892-2910.
- [9] 李建鸿.浅析次级断裂构造在地热水勘查中的标志性作用——以江西省宁都县龙归山地热为例[J].地质灾害与环境保护,2019,4: 85-90.
- [10] 杨世文.赣南兴国-宁都成矿带萤石矿床成因[D].中国地质科学院博士学位论文,2019.
- [11] He L J, Hu S B, Huang S P, et al. Heat flow study at the Chinese Continental Scientific Drilling site: Borehole temperature, thermal conductivity, and radiogenic heat production [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113: B02404(1-16).
- [12] 胡圣标,黄少鹏.中国陆地大地热流[C]//汪集咏,等.地热学及其应用.北京:科学出版社,2015: 64-122.
- [13] 龚育龄,王良书,刘绍文.中国东部渤海湾盆地热结构和热演化[M].北京:原子能出版社,2011.
- [14] 汪集咏,黄少鹏.中国大陆地区大地热流数据汇编[J].地质科学,1988,(2): 196-204.
- [15] 汪集咏,黄少鹏.中国大陆地区大地热流数据汇编(第二版)[J].地震地质,1990,12(4): 351-366.
- [16] 胡圣标,何丽娟,汪集咏.中国大陆地区大地热流数据汇编(第三版)[J].地球物理学报,2001,44(5): 611-626.
- [17] 林乐夫,王安东,孙占学,等.江西省实测地表热流值及特征[J].能源研究与管理,2017,3: 91-94.

- [18] Hu S B, He L J, Wang J Y. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 2000, 179(2): 407-418.
- [19] 张子祥, 李文鑫. 兰州市永登县地热水成因模式和地质模型[J]. *地质科技情报*, 2015, 34(2): 196-197.
- [20] 邱楠生, 胡圣标, 何丽娟, 等. 沉积盆地热体制研究的理论与应用[M]. 北京: 石油工业出版社, 2004: 10-18.
- [21] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地球学报*, 2012, 33(6): 1-5.
- [22] 赵继龙, 袁晏明, 李德威, 等. 青藏高原及周边地区下地壳地球物理异常及成因[J]. *地球科技情报*, 2007, 26(2): 16-17.
- [23] 欧新功, 金振民, 王璐, 等. 中国大陆科学钻探主孔 100~2000m 岩石热导率及其各向异性: 对研究俯冲带热结构的启示[J]. *岩石学报*, 2004, 1: 109-118.
- [24] 张超, 胡圣标, 宋荣彩, 等. 共和盆地干热岩地热资源的成因机制: 来自岩石放射性生热率的约束[J]. *地球物理学报*, 2020, 63(7): 2697-2709.
- [25] 杨立中. 漳州地区典型花岗岩体放射性生热特征及干热岩资源潜力研究[D]. 东华理工大学硕士学位论文, 2016.
- [26] Rybach L. Radioactive heat production in rocks and its relation to other petrophysical parameters [J]. *Pure and Applied Geophysics*, 1976, 114(2): 309-317.
- [27] Siegel C, Schrank C E, Bryan S E, et al. Heat-producing crust regulation of subsurface temperatures: A stochastic model reevaluation of the geothermal potential in southwestern Queensland, Australia[J]. *Geothermics*, 2014, 51: 182-200.
- [28] Singh A K, Vallinayagam G. Radioactive element distribution and rare-metal mineralization in anorogenic acid volcano-plutonic rocks of the Neoproterozoic Malani Felsic Province, Western Peninsular India [J]. *Journal of the Geological Society of India*, 2009, 73: 837-853.
- [29] 蔺文静, 刘志明, 马峰, 等. 我国陆区干热岩资源潜力估算[J]. *地质学报*, 2012, 33(5): 807-811.
- [30] 汪集旻, 胡圣标, 庞忠和, 等. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 2012, 30(32): 25-31.
- [31] 赵平. 中国东南地区岩石生热率研究[D]. 中国科学地质与地球物理研究所博士学位论文, 1993: 1-87.
- [32] 庄庆祥. 福建省干热岩研究第 1 期工程项目中地热发电内容的探讨[J]. *能源与环境*, 2012, 2: 53-54.
- [33] Arniaud D, Dostal D C. Geochemistry of Auriat granite (Massif Central, France) [J]. *Chemical Geology*, 1984, 45: 263-277.
- [34] 袁学诚. 阿尔泰-台湾地学断面论文集[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1997.
- [35] 柯柏林, 林天懿, 李文, 等. 北京西山谷积山背斜地热系统成因模式及远景区预测[J]. *地质通报*, 2019, 38(8): 1378-1385.
- [36] 刘峰, 王贵玲, 张薇, 等. 燕山中部大地热流及岩石圈热结构特征[J]. *地球学报*, 2020, 94(7): 1950-1959.