

doi: 10.12029/gc20210909003

王安东, 孙占学, 蔺文静, 杨旒, 叶海龙, 童珏, 王运. 2023. 江西省地热资源赋存特征及潜力评价[J]. 中国地质, 50(6): 1646–1654.

Wang Andong, Sun Zhanxue, Lin Wenjing, Yang Ni, Ye Hailong, Tong Jue, Wang Yun. 2023. Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment of Jiangxi Province[J]. Geology in China, 50(6): 1646–1654(in Chinese with English abstract).

江西省地热资源赋存特征及潜力评价

王安东^{1,2}, 孙占学^{1,3}, 蔺文静⁴, 杨旒^{1,2}, 叶海龙⁵, 童珏⁶, 王运²

(1. 东华理工大学核资源与环境国家重点实验室, 江西 南昌 330013; 2. 东华理工大学地球科学学院, 江西 南昌 330013; 3. 东华理工大学水资源与环境工程学院, 江西 南昌 330013; 4. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061; 5. 江西省勘察设计研究院, 江西 南昌 330095; 6. 江西省地质局九〇一地质大队, 江西 萍乡 337000)

摘要:【研究目的】江西省地热资源丰富, 具有较好的地热资源开发利用潜力。【研究方法】本文介绍了江西省地热资源分布特征、地热成因类型、地热水化学特征, 并评估了各设区市的地热资源潜力。【研究结果】江西省地热资源主要可分为隆起山地循环对流型和沉积盆地型两种类型, 其中隆起山地循环对流型占 95% 以上。隆起山地循环对流型地热系统主要分布在九连山、武功山、九岭山和罗霄山脉一带, 主要受控于周围的断裂构造尤其是深大断裂构造, 通常出露在两大断裂交汇的位置。【结论】江西省地热资源分布基本与地温梯度、大地热流和深部温度格局特征相吻合, 地热流体水化学类型以 $\text{HCO}_3^- - \text{Na}$ 型为主, 矿物度较低, 以淡水为主, 地热流体主要来源于大气降水。地热资源潜力评价结果显示赣州和宜春地热资源最为丰富, 地热资源量均超过 45000×10^{10} kJ。

关键词: 地热资源; 赋存特征; 潜力评价; 隆起山地循环对流型地热; 地热地质调查工程; 江西省

创 新 点: 揭示了江西省地热资源的成因类型、赋存特征及地温场特征和地热流体来源, 并对各设区市开展了地热资源潜力评价。

中图分类号: P314 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2023)06-1646-09

Occurrence features of geothermal resources and geothermal potential assessment of Jiangxi Province

WANG Andong^{1,2}, SUN Zhanxue^{1,3}, LIN Wenjing⁴, YANG Ni^{1,2},
YE Hailong⁵, TONG Jue⁶, WANG Yun²

(1. State Key Laboratory of Nuclear Resources and Environment, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 2. College of Earth Sciences, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 3. School of Water Resources & Environmental Engineering, East China University of Technology, Nanchang 330013, Jiangxi, China; 4. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 5. Jiangxi

收稿日期: 2021-09-09; 改回日期: 2023-07-24

基金项目: 国家重点研发计划项目(2018YFA0404104)、国家自然科学基金项目(41763005)、核资源与环境国家重点实验室自主基金(Z1912)、中国地质调查局项目“全国大地热流值测量与靶区优选”(DD20190128)、江西省科技厅重点研发计划项目(20203BBG72W011)及东华理工大学研究生创新基金(YC2021-S610)联合资助。

作者简介: 王安东, 男, 1985 年生, 副教授, 硕士生导师, 主要从事地热学和地球化学研究; E-mail: adw008@mail.ustc.edu.cn。

Institute of Survey and Design, Nanchang 330095, Jiangxi, China; 6. Group 901, Jiangxi Provincial Bureau of Geology, Pingxiang 337000, Jiangxi, China)

Abstract: This paper is the result of geothermal geological survey engineering.

[Objective] Jiangxi Province, located in the Eastern China, is very rich in geothermal resources and possesses excellent potential for geothermal resources development and utilization. **[Methods]** In the present study, the distribution features, type and hydrogeochemistry characteristics of geothermal resources and geothermal potential assessment of every city in Jiangxi Province is presented. **[Results]** The geothermal resources of Jiangxi Province can be divided into circulation type hydrothermal system in the uplifted mountainous area and sedimentation basin type, of which the former has a high proportion of 95%. Circulation type hydrothermal system in the uplifted mountainous area is mainly distributed in Jiulianshan Mountain, Jiulingshan Mountain, Wugongshan Mountain and Luoxiaoshan Mountain Range, which is controlled by the deep faults surrounding the mountain. **[Conclusions]** The distribution features of geothermal resources in Jiangxi Province is in agreement with the distribution features of geothermal gradient, surface heat flow and deep temperature field, and hydrogeochemistry type is dominated by $\text{HCO}_3\text{-Na}$ type with relatively lower mineralization degree and salinity and is mainly sourced from precipitate water. The results of geothermal potential assessment suggest that Ganzhou and Yichun Cities possess the most abundant geothermal resources with each abundance being larger than 45000×10^{10} kJ.

Key words: geothermal resource; occurrence feature; potential assessment; circulation type hydrothermal system in the uplifted mountainous area; geothermal geological survey engineering; Jiangxi Province

Highlights: This study reveals the type and occurrence feature of the geothermal resources of Jiangxi Province, discusses the geothermal field features and the sources of geothermal fluids, and further assesses the geothermal resource potential of the province.

About the first author: WANG Andong, male, born in 1985, associate professor, engaged in the study of geochemistry and geothermics; E-mail: adw008@mail.ustc.edu.cn.

Fund support: Supported by the National Key Research and Development Program of China (No.2018YFA0404104), the National Natural Science Foundation of China (No.41763005), the projects of State Key Laboratory of Nuclear Resource and Environments (No.Z1912), Geological Survey of China (No.DD20190128), Key Research and Development Program from Science and Technology Department of Jiangxi Province (No.20203BBG72W011) and Master Innovation Fund from East China University of Technology (No.YC2021-S610).

1 引言

江西省地处中国东南部、长江中下游南岸,总面积 16.7万 km^2 。地质上江西省位于欧亚大陆板块东南部,临近太平洋板块,横跨扬子与华夏两个古板块,自元古宙以来各时代地层发育较为齐全、岩浆-构造活动频繁,是中国最为重要的金属成矿省份之一。根据已有的地质资料和地质勘探实践,江西境内地热资源丰富、类型多样,储量大、分布广、易开发,具有重要的科研价值、经济价值和生态环境价值^①(高柏等,2006;王贵玲,2018)。目前,省内地热资源得到了一定程度的开发利用,宜春市明月山温汤镇和赣州市石城县先后获得“中国温泉之乡”美誉,地热利用蓬勃发展;但是地热资源整体开发利用较为分散、集约化程度较差、利用效率相对

低下。伴随地热能发展“十四五”规划相关内容已被纳入国家可再生能源发展“十四五”规划中,以及“碳达峰、碳中和”战略目标的推进,可以预见包括江西省在内全国范围内在“十四五”将会迎来地热勘探开发利用的新高潮。鉴于此,本文旨在探讨江西省地热资源赋存特征和开发利用潜力,为今后江西省地热资源勘查开发利用提供参考。

2 地热资源概况

江西省温泉利用历史悠久,最早见于东晋时期。庐山星子温泉、遂川汤湖温泉等温泉在宋朝、明朝和清朝的地方志和文学作品中见有记载。这一时期的利用对象为天然出露的温泉水,利用方式仅限于传统的洗浴、灌溉、养殖。新中国成立后,江西省地热勘探、开发和利用步入快速发展的新车

道,正规化、规模化和市场化突出,尤以1970年代世界能源危机时最为迅速,其中1971年在宜春温汤建成了全国第二个中—低温地热流体双循环系统试验性地热发电站,开启了江西省乃至中国中—低温发电的先河,在地热利用史上留下了灿烂的一笔。

据陈墨香(1991)统计,江西温泉数居全国第七位,占全国总数的3.55%;温泉放热量居第十一位,占全国温泉总放热量的2.15%,具有相对较好的地热资源禀赋条件。据不完全统计,截至2015年江西全省共有热异常泉点104个/91处、热异常钻孔(含温泉区地热勘查钻孔)367孔/79处^①(王贵玲,2018),集中分布在寻乌县、石城县、宁都县、遂川县、龙南县、会昌县、崇义县、信丰县,以及宜春袁州区和九江武宁县等县区,约占全省地热资源的一半,地理分布上具有南多北少、西多东少的特点,主要位于九连山隆起、九岭隆起、诸广隆起、罗霄隆起、九江坳陷、赣州盆地、会昌盆地和修武盆地以及

相关断裂区域(图1)。若以温泉(热)水温度论,全省温泉均为低温温泉,热水温度集中分布在30~50℃,其中修水县白岭温泉温度最高达83℃。

3 地热资源禀赋特征

地热资源的形成主要受控于区域地质构造特征(陈墨香等,1994;陈冬生和杨金华,2011;蔺文静等,2013;汪集旻,2015)。江西省地热资源分布广泛,若按照热的传递方式可分为对流型地热系统和传导型地热系统,且以对流型地热系统为主;若按照构造成因或地热系统的系统科学理论,则可进一步分为隆起山地(深)循环型水热系统或者中—低温对流型地热系统和沉积盆地型地热系统(汪集旻等,1993;王贵玲和蔺文静,2020),且以前者占绝对优势,占整个江西地热资源的90%以上。隆起山地循环型对流地热系统主要分布在九连山、武功山、九岭山和罗霄山脉一带,主要受控于周围的断裂构造尤其是深大断裂构造,通常出露在两大断裂交汇的位置^①(陈冬生和杨金华,2011;王贵玲,2018)。沉积盆地型地热相对较少,目前主要有南昌东岗桥地热田、九江北戴河地热田、赣州周田地热田和南山地热田等;江西省具有相当规模的断陷盆地面积,受制于单个盆地面积、聚热保温、富水性和盖层厚度以及勘探程度等因素,沉积盆地型地热资源勘探开采规模相对较小,鄱阳盆地、吉泰盆地、抚州盆地、赣州盆地、萍乡盆地和武宁盆地等有望在未来取得新突破。

3.1 隆起山地循环型对流地热资源赋存特征

江西省位于欧亚大陆板块东南段,地质构造复杂,褶皱断裂和岩浆活动发育,赣北和赣中南地区有着显著的差异。基底组成上,赣北主要由以新元古界双桥山群组成近EW和NE向褶皱;赣中南由下古生界及其以前的浅变质岩系组成近SN和近EW向褶皱。盖层褶皱上,赣北的扬子陆块区主要由上元古界至下三叠统组成近EW和NE向宽展型褶皱;赣中南的南华活动带由上古生界至中—下三叠统组成NE—NNE向过渡型和宽展型褶皱。岩浆活动上,赣南发育多期岩浆活动,尤以燕山期最为强烈,而赣北岩浆活动尤其是中生代岩浆活动相对匮乏。江西省断裂构造亦十分发育,规模较大,切割较深且具长期多次活动的大型断裂带近十余条,主要由NEE、NNE、NE及NW向多组断裂带,它们彼

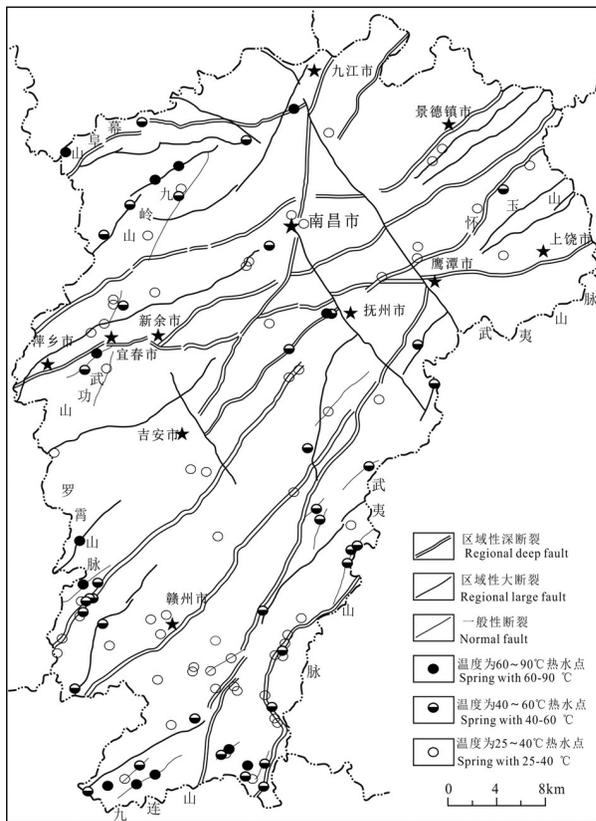


图1 江西省地热资源分布地质简图
Fig.1 Sketch map of geothermal resource distribution in Jiangxi Province

此相互交叉,形成断裂构造网络。其中对地热分布有显著影响和控制作用的断裂主要有大余—南城断裂、萍乡—广丰断裂、修水—德安断裂、赣江断裂、宜丰—景德镇断裂、安远—鹰潭断裂、遂川—德兴断裂、寻乌—瑞金断裂和油墩—东至断裂等。上述地质和构造特征为地热的形成创造了良好条件,并决定了全省该类地热资源的分布(陈冬生和杨金华,2011),在整个江西省尤其是赣南地区形成了丰富的隆起山地循环型对流地热资源。

该类地热系统的成因概述为:大气降水在地形较高的补给区通过断裂或者断裂破碎带下渗后循环,地下水在径流过程中与岩石发生水-岩相互作用不断吸收热量而温度逐渐升高,在地质条件有利的部位(一般为两组断裂交汇处)上涌并出露地表(王贵玲和蔺文静,2020)。热源为正常或偏高的热地质背景,一般无附加的残余岩浆热源或者高放射性生热热源,但是在赣南局部有限地区可能存在高放射性生热附加热源(伯慧等,2015;刘峰等,2020)。一般来说,泉水温度的高低与地下水径流路径的长短和循环时限长短密切相关,并在一定程度上决定了温泉水的矿化度。热储一般为孔隙度较大的砂岩、砾岩和破碎程度较高的花岗岩、火山岩和变质岩。本文分别选取赣南、赣西和赣北三地有代表性的隆起山地循环型对流地热系统加以介绍。

3.1.1 赣南九连山隆起地热带

九连山位于江西省最南部,九连山隆起为江西省内地热资源最丰富的构造带,已发现有22处地热区,主要分布于隆起带东南和西南两块低山丘陵地带,多出露于古生代寒武系碎屑岩、泥盆系碎屑岩、二叠系碳酸盐岩、中生代白垩系碎屑岩、侏罗系火山碎屑岩和燕山期花岗岩中或边缘部位^①。地热分布主要受控于北东向全南—安远断裂、东西向全南—寻乌断裂和北北东向寻乌—瑞金深断裂,温度自25℃到76℃、自流总量为44~1807 m³/d。根据地热与构造的依存、控制关系,进一步将九连山隆起地热带划分为茅山—月子地热亚带、菖蒲—河角地热亚带、新塘—虎岗地热亚带和隆起中北部地热带4个地热亚带。代表性温泉有豆头温泉、汤湖温泉、菖蒲地热田、新塘温泉和盐湖脑温泉等^②。

3.1.2 赣西环武功山地热带

武功山位于江西省西部,属罗霄山脉北支,山

体呈东北—西南走向,横跨萍乡、吉安和宜春三市,主脉绵延120余千米,总面积约970 km²。几何学与运动学研究表明武功山穹隆是一个典型的从岩体核部朝山外倾斜滑移的穹隆伸展构造。武功山北段很早就见有温泉出露记录,尤以宜春温汤镇温汤温泉为最,江西地质局有关单位在20世纪70—80年代以及2000年后多次组织勘查并大规模开发利用,形成了富有特色的地热开发田。近年来,随着勘探工作的深入,武功山南段先后发现一系列隐伏型地热田。根据其形成规律和分布特征进一步划分为温汤—万龙山亚带、高峰—泰山亚带和武功山隆起西北亚带3个带,代表性温泉有温汤温泉、万龙山温泉、钱山温泉、文家温泉和白马温泉^③。这些温泉分布主要受温汤断裂、温塘—瓦溪断裂、宜黄断裂和安远—鹰潭等相关断裂控制。环武功山地热带整体上地热水温度相对较高,多数在40℃以上;水量也较大,其中温汤通过回灌,目前可开采量已超过10000 m³/d,万龙山地热区、钱山温泉、高峰温泉可开采量也在2000 m³/d以上,具有较好的开发利用价值。

3.1.3 赣北九岭隆起地热带

赣北九岭隆起地热带地热资源极为丰富,目前已发现超过13个地热田,它们分布相对集中,均位于大断裂中,具有线状展布特征,除西海温泉和古桥温泉热储为新元古界双桥山群变沉积岩外,其他温泉热储均为构造裂隙十分发育的九岭岩体。温泉分布主要受鲁家咀断裂、浴塘边断裂、桐木坑断裂、罗坪断裂和铜鼓—罗溪断裂所控制。相比省内其他地热区,赣北九岭隆起地热带地热资源量非常客观,古桥、九仙汤地热流体可开采量超过3000 m³/d,汤里、汤桥、西海及温塘可开采量在1500 m³/d左右;九岭隆起带地热资源温度也相对较高,除尾水岭温泉、中源温泉和门山地热田外,其余10余个地热区地热水均达到温热水标准,有6处水温在60℃以上,最高达80℃。整个隆起带地热平均温度为56.8℃,远远高于全省地热温度的平均水平^④(王贵玲,2018),整体勘探开发利用程度较高。

由于隆起山地循环对流型地热系统是江西省最主要的地热成因系统类型,本文根据Rinehart(1980)的模型,结合王贵玲和蔺文静(2020)的有关成因论述,给出了隆起山地循环对流型系统的成因

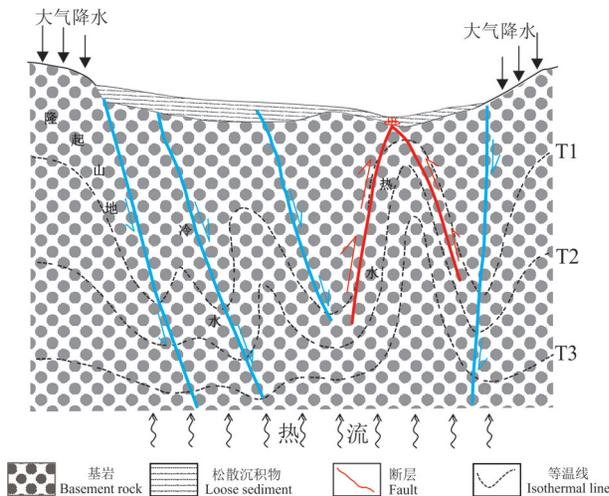


图2 隆起山地循环对流型地热系统成因模式图
(据 Rinehart, 1980 修改)

Fig.2 Genetic model diagram of circulation type hydrothermal system in the uplifted mountainous area (modified from Rinehart, 1980)

模式图(图2)。

3.2 沉积盆地型地热资源赋存特征

在燕山—喜马拉雅运动阶段,由于受断裂及其断块作用的影响,江西形成了一系列以北东和北北东向为主的规模不等的断陷盆地,其中面积在200 km²以上的就有18个。从地热形成要素“源、储、盖、通”角度分析,热源主要为正常或略偏高的热地质背景,一般无附加热源;水源主要来自大气降水;热储层一般为寒武系、石炭系、二叠系和三叠系灰岩和白云岩岩溶热储,也有少部分为下白垩统的砂岩孔隙型热储,如会昌盆地、赣州盆地;通道一般为盆地周缘的断裂带,部分断裂受填充作用影响,导水导热性相对较差,再叠加其他因素的综合作用,造成不少盆地“有热贫水”。江西沉积盆地型地热资源一般为隐伏型地热,综合受制于单个盆地面积、盖层厚度、热储层的富水性、热通道连通性、热储层厚度等多个因素的影响,目前沉积盆地型地热资源进展相对较慢,但是考虑到全省盆地众多、面积大、分布广、储热成热条件良好,未来有望取得新突破。江西省城市和人口密集地带与盆地密切相关,对该类地热资源的需求也相对较大,市场需求旺盛。本文以南昌盆地西南部的东岗桥地热区为例,作简单介绍。南昌东岗桥地热区处于鄱阳湖盆地象湖西断块内的象湖凸起西南侧,地表被第四系沉

积物所覆盖,物探及钻探资料显示下部为白垩系、三叠系、二叠系和石炭系等地层,基底为新元古界双桥山群。白垩系红层厚度在800~1200 m,含水和储水条件较差,具有良好的隔热保温作用,连同第四系沉积物一起共同组成地热区盖层;石炭系、二叠系和三叠系内有灰岩和白云岩,性脆易溶,为典型的碳酸盐岩岩溶热储,多条断裂的存在为地下水的赋存与径流提供了有利条件。钻孔显示出水温度良好,在1000 m深度一般均可超过50℃;岩溶发育连通性较好的钻孔出水量可超过2000 m³/d,但发育较差连通性差的钻孔温度尚可,但是水量一般很难突破1000 m³/d(戴勇,2013)。

3.3 地热资源区的地温场和地热流体温度特征

区域地温场对地热资源的形成与分布具有十分重要的影响,在很大程度上可以指示地热异常区的存在,通常包括地温梯度、地表大地热流和深部温度分布格局等(Hu et al., 2000;汪集旻等,2012;蔺文静等,2013;Wang et al., 2016;Feng et al., 2018;Jiang et al., 2019;Liu et al., 2019)。江西省地温梯度总体上显示南高北低、局部异常的特征,赣北褶皱山区地温梯度相对较低,一般为(1.93~2.13)℃/100 m,平均地温梯度(2.13±1.3)℃/100 m;萍乡—乐平拗陷带地温梯度一般(1.74~2.5)℃/100 m,平均地温梯度(2.22±0.87)℃/100 m;赣南褶皱山区一般地温梯度为(1.8~3.36)℃/100 m,平均地温梯度(2.58℃±1.4)/100 m;鄱阳湖盆地中新生代红层、宁都—于都一带地温梯度超过3.0℃/100 m,局部超过3.5℃/100 m,因此江西大部分地区属地热梯度正常区。地热热流总体上也显示南高北低、局部异常的特征,赣北、赣中和赣南地区地表热流平均值分别为58.0 mW/m²、72.2 mW/m²和76.0 mW/m²(图3)(林乐夫等,2017)。深部温度分布格局上,同等条件下江西深部温度低于西部川—藏—滇地区和台湾地区,高于中西部地区,略低于福建—广东沿海地区,显示出典型的东南沿海中低温地热区特征,无特别明显的高温分布区。相比地温梯度和深部温度分布格局,地表大地热流更能综合显示区域地温场特征。

地热流体(含温泉和地热钻孔地热流体)温度是地热资源最重要的参数特征之一,是深部温度场在地表浅部的综合体现。对江西省144个地热流体

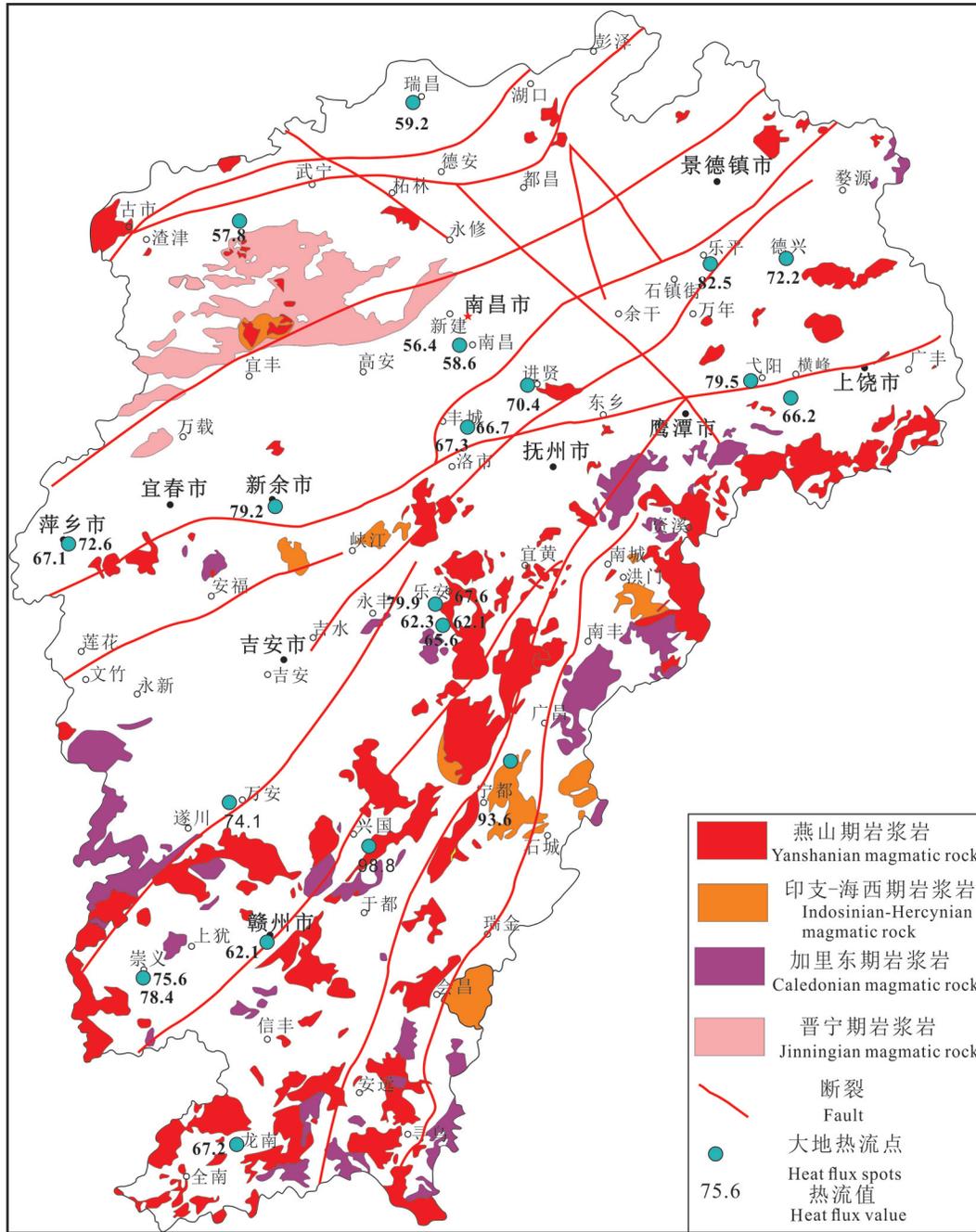


图3 江西省岩体与地表大地热流分布图(据林乐夫等,2017修改)

Fig.3 Surface heat flow and magmatic rock distribution map of Jiangxi Province (modified from Lin Lefu et al., 2017)

温度的统计结果显示:25~40℃的地热点71个,占比49%;41~60℃的地热点53个,占比37%;61~80℃的地热点17个,占比12%;25~40℃的地热点3个,占比2%;整体以60℃以下的地热流体为主(图4)。

3.4 地热资源地球化学特征

对超过120组地热流体地球化学分析结果显示:江西省地热流体水质类型较为单一,阳离子以钠离子

和钙离子为主,阴离子以重碳酸根和硫酸根为主,地热流体水化学类型以HCO₃-Na型为主,HCO₃-Ca型、HCO₃-Na·Ca型和HCO₃·SO₄-Na型相对较少;地热流体pH值范围6.0~10.4,pH平均值7.9,pH值大于7的96处,占比超过85%,总体以偏碱性水为主。地热流体矿化度范围为75~3748 mg/L,矿化度大于1000 mg/L有16处,100~1000 mg/L的94处,小于

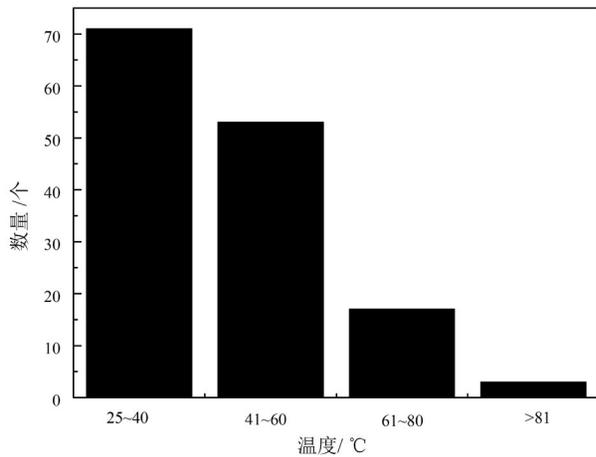


图4 江西省地热流体温度统计图

Fig.4 Temperature statistical diagram of the geothermal fluids within Jiangxi

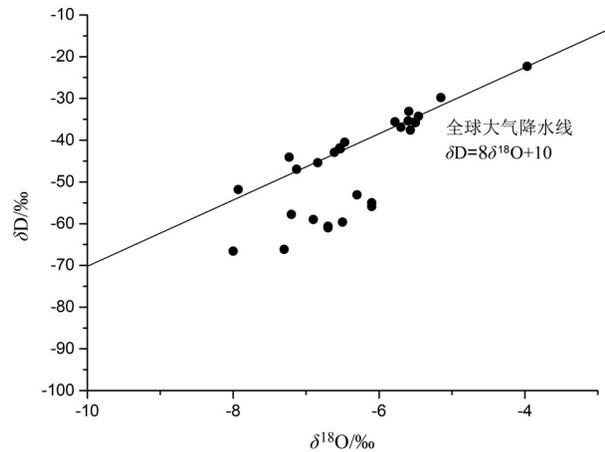


图5 江西省地热流体H-O同位素特征

Fig.5 H-O isotopic geochemistry features of geothermal waters in Jiangxi Province

100 mg/L的1处;矿化度平均值583 g/L;小于1000 mg/L的95处,占比超过85%,总体上以淡水为主,暗示江西省地热流体可能具有较强的循环更新能力。此外,江西省地热流体中含有F、Li、HBO₂、H₂SiO₃、Rn和H₂S等30余种微量成分,达到医疗价值矿水浓度标准的计248项/100处,达到矿水浓度标准的计237项/100处,达到命名矿水浓度标准的计181项/90处。总体上,江西省地热流体的医疗保健价值较高^①。

地热流体H-O同位素地球化学特征上,27组统计数据显示δD值范围为-66.6‰~-22.3‰,平均值-46.3‰;δ¹⁸O值范围为-8.0‰~-3.97‰,平均值-6.35‰^②(李学礼和史维浚,1992;孙占学等,1992;王贵玲,2018;李鹭等,2019)。在H-O同位素图解上(图5),大部分地热流体H-O同位素投影点落在全球大气降水线上或附近,表明地热流体的水源主要来自大气降水;部分点落在大气降水线右侧,存在氧同位素正漂移现象,说明部分地热流体在水-岩热交换的过程中存在水-岩之间的氧同位素交换,相对较高的岩石δ¹⁸O值通过交换作用“传递”给地热流体,导致地热流体显示出比正常大气降水偏高的δ¹⁸O值,而D同位素由于缺乏交换依然保持正常值。

4 地热资源潜力评价

为了摸清江西省地热“家底”,更好地开发地热资源,本研究根据前人对江西省地热流体(含温泉

出露区和钻孔揭露区)的有关资料^①(王贵玲,2018),对设区市的地热流体储量、地热资源量、地热资源可开采量和地热流体可开采量进行了估算。估算方法如下:

(1)地热流体储量计算公式:

$$Q_{\text{储}} = \varphi V + S(h - H)A$$

式中: $Q_{\text{储}}$ —地热流体储量,%,m³; φ —热储岩石孔隙率(或裂隙率),%; V —热储体积,m³; S —弹性释放系数,无量纲; h —平均承压水头标高,m; H —平均热储顶面标高,m; A —评价热储面积,m²。

(2)地热资源量计算公式:

$$Q = C_r \rho_r (1 - \varphi) V (T_1 - T_0) + C_w \rho_w q_w (T_1 - T_0)$$

式中: Q —地热资源量,kJ; C_r , C_w —分别为热储岩石比热和水的比热,kJ/(kg·°C); ρ_r , ρ_w —分别为热储岩石密度和水的密度,kg/m³; φ —热储岩石孔隙率(或裂隙率),%; q_w —流体储量,包括静储量和弹性储量,m³; T_1 —热储温度,°C; T_0 —恒温层温度,°C; V —热储体积,m³。

(3)地热资源可开采量计算公式:

$$Q_{\text{wh}} = R_E \cdot Q$$

式中: Q_{wh} —地热资源可开采量,kJ; R_E —回收率,%; Q —地热资源量,kJ。

回收率根据工作区的实际情况,参考《地热资源评价方法》(DZ40-85)关于回收率的有关规定确定。对于大型沉积盆地的新生代砂岩,当孔隙度大于20%,热储回收率定为0.25,碳酸盐岩裂隙热储定

表1 江西省地热流体资源潜力评价
Table 1 Water chemical compositions of geothermal waters in Jiangxi Province

地级市	地热流体可开采量/(10 ⁸ kJ/a)	地热流体可开采量/(10 ⁴ m ³ /a)	地热资源量/(10 ¹⁰ kJ)	地热流体储量/(10 ⁶ m ³)
九江	8323.66	440.55	29189.24	397.30
南昌	134.26	14.60	189.53	0.74
宜春	18806.54	1392.92	52770.33	904.41
景德镇	689.17	124.01	429.56	12.42
鹰潭	439.56	123.72	152.82	3.90
上饶	2452.21	481.58	984.68	24.75
萍乡	1342.62	80.30	2953.51	36.26
抚州	4956.04	331.21	11889.13	142.42
吉安	8626.79	636.6	11662.57	246.48
赣州	27480.58	1969.79	45153.29	550.88
合计	73251.43	5595.28	155374.66	2319.56

为0.15,中生代砂岩和花岗岩等火成岩类热储则根据裂隙发育情况定为0.05~0.1。江西省主要为花岗岩类热储。

地热流体可开采量采用泉(井)流量法计算。

各设区市地热流体资源的地热流体可开采量、地热流体可开采量、地热资源量和地热流体储量计算结果见表1。从表中可以发现赣州和宜春地热资源和开采潜力最为丰富,其次是吉安和九江,景德镇、鹰潭和南昌地热资源潜力相对匮乏。江西省地热流体可开采热量、地热流体可开采量、地热资源量和地热流体储量分别为 73251×10^8 kJ/a, 5595×10^4 m³/a, 155375×10^{10} kJ和 2320×10^6 m³,地热资源较为丰富。流体地热资源潜力与构造位置和地温场特征基本吻合。

5 结论

(1)江西省地热资源较为丰富,主要分布在九连山、武功山、九岭山、武夷山脉和罗霄山脉一带,受控于周围的断裂构造尤其是深大断裂构造,通常出露在两大断裂交汇的位置。按照成因可分为隆起山地(深)循环型水热系统和沉积盆地型地热系统,前者占比超过95%。

(2)江西省地热流体水质类型较为单一,阳离子以钠离子和钙离子为主,阴离子以重碳酸根和硫酸根为主,地热流体水化学类型以HCO₃-Na型为

主。矿化度较低,总体上以淡水为主,H-O同位素结果表明地热流体的水源主要来自大气降水。

(3)江西省地热流体可开采热量、地热流体可开采量、地热资源量和地热流体储量分别为 73251×10^8 kJ/a, 5595×10^4 m³/a, 155375×10^{10} kJ和 2320×10^6 m³,地热资源较为丰富。估算结果发现赣州和宜春地热资源和开采潜力最为丰富,其次是吉安和九江,景德镇、鹰潭和南昌地热资源潜力相对匮乏,流体地热资源潜力与构造位置和地温场特征基本吻合。

注释

①叶海龙,白细民,邓建军,张敏,邹国瑶,黄璨,周丽,曹进,徐芬,樊柄宏,余圣品,徐良,杨倩,刘孝萍,钟燕. 2015. 江西省地热资源现状调查评价与区划成果报告[R]. 南昌:江西省地质环境监测总站.

References

- Bo Hui, Song Lusheng, Wang Yun, Xia Weiping, Wang Taotao, Wang He, Zhou Sheng. 2015. Preferential study of favorable areas of dry hot rock resources in Jiangxi Province[J]. Journal of Donghua University of Technology: Natural Science Edition, 38(4): 407-411 (in Chinese with English abstract).
- Chen Dongsheng, Yang Jinhua. 2011. Cause and distribution law of geothermal resources in Jiangxi Province[J]. Jiangxi Coal Science and Technology, 3: 121-122 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang. 1991. Distribution of geothermal resources and the development and utilization of geothermal resources in China [J]. Natural Resources, 5: 40-58 (in Chinese with English abstract).
- Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. 1994. China Geothermal Resources: Assessment of Formation Characteristics and Potential[M]. Beijing: Science Press, 1-39 (in Chinese with English abstract).
- Dai Yong. 2013. Application of Chemical Interpretation in Geothermal Exploration of Donggang Bridge, Nanchang[D]. Nanjing: Nanjing University, 1-57 (in Chinese with English abstract).
- Feng Yanfang, Zhang Xiaoxu, Zhang Bo, Liu Jiangtao, Wang Yanggang, Jia Delong, Hao Lirong, Kong Zhaoyu. 2018. The geothermal formation mechanism in the Gonghe Basin: Discussion and analysis from the geological background[J]. China Geology, 1(3): 331-345.
- Gao Bai, Sun Zhanxue, Liu Jinhui. 2006. Development and protection of geothermal hot springs in Jiangxi Province [J]. Water Resources Protection, 22(2): 92-94 (in Chinese with English abstract).
- Hu Shengbiao, He Lijuan, Wang Jiyang. 2000. Heat flow in the continental area of China: A new data set[J]. Earth and Planetary Science Letters, 179(2): 407-419.
- Jiang Guangzheng, Hu Shengbiao, Shi Yizuo, Zhang Chao, Wang

- Zhuting, Hu Di. 2019. Terrestrial heat flow of continental China: Updated dataset and tectonic implications[J]. *Tectonophysics*, 753: 36–48.
- Li Lu, Sun Zhanxue, Chen Gongxin, Zhang Zhichao. 2019. Hydrogeochemical characteristics and hot water sources[J]. *China Mining Industry*, 28(1): 164–169 (in Chinese with English abstract).
- Li Xueli, Shi Weijun. 1992. Formation conditions and causes of Lushan Hot Spring[J]. *Journal of East China Institute of Geology*, 15(3): 229–233 (in Chinese with English abstract).
- Lin Lefu, Wang Andong, Sun Zhanxue, Wan Jianjun, Li Xiaocong. 2017. Actual value and characteristics of surface heat flow in Jiangxi Province[J]. *Energy Research and Management*, 3: 91–94 (in Chinese with English abstract).
- Lin Wenjing, Liu Zhiming, Wang Wanli, Wang Guiling. 2013. China geothermal resources and their potential assessment [J]. *Geology in China*, 40(1): 312–321 (in Chinese with English abstract).
- Liu Feng, Wang Guiling, Zhang Wei, Yue Chen, Gan Haonan, Xiao Zeyou, Ou Xiaoke. 2020. Characteristics of earth thermal flow and geothermal resources of northern Ningdu County, Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 1883–1890 (in Chinese with English abstract).
- Liu Lihong, Wang Chunlian, Zhao Xingmin. 2019. First report of TSR origin minerals filled in anhydrite dissolved pores in southeastern Ordos Basin[J]. *China Geology*, 2(2): 245–247.
- Rinehart J. 1980. *Geysers and Geothermal Energy*[M]. New York: Springer-verlag, 1–233.
- Sun Zhanxue, Li Xueli, Shi Weijun. 1992. Isotopic hydrogeochemistry of medium and low temperature geothermal water in Jiangxi Province[J]. *Journal of East China Institute of Geology*, 15(3): 243–248 (in Chinese with English abstract).
- Wang Andong, Sun Zhanxue, Liu Jinhui, Wan Jianjun, Hu Baoqun, Yang Lizhong. 2016. Thermal conductivity and radioactive heat-producing element content determinations for rocks from Zhangzhou region, SE China, and their constraints on lithospheric thermal regime[J]. *Environmental Earth Sciences*, 75(17): 1213–1218.
- Wang Guiling. 2018. *China Geothermal Chronicles—East China and Huazhong Volume: Chapter 6 Jiangxi Province*[M]. Beijing: Science Press, 1–108 (in Chinese with English abstract).
- Wang Guiling, Lin Wenjing. 2020. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 94(7): 1923–1927 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang. 2015. *Geothermal Science and its Application*[M]. Beijing: Science Press, 1–444 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Hu Shengbiao, Pang Zhonghe, He Lijuan, Zhao Ping, Zhu Chuanqing, Rao Song, Tang Xiaoying Yin, Kong Yanlong, Luo Lu, Li Weiwei. 2012. Chinese mainland Dry hot rock geothermal resource potential assessment[J]. *Science and Technology Review*, 30(32): 25–31 (in Chinese with English abstract).
- Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. 1993. *Medium to Low Temperature Convective Geothermal System*[M]. Beijing: Science Press, 6–10 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 伯慧, 宋炉生, 王运, 夏为平, 王涛涛, 王鹤, 周胜. 2015. 江西省干热岩资源有利区优选研究[J]. *东华理工大学学报:自然科学版*, 38(4): 407–411.
- 陈冬生, 杨金华. 2011. 江西省地热资源成因及分布规律探讨[J]. *江西煤炭科技*, 3: 121–122.
- 陈墨香. 1991. 中国地热资源的分布及其开发利用[J]. *自然资源*, 5: 40–58.
- 陈墨香, 汪集旸, 邓孝. 1994. 中国地热资源:形成特点和潜力评估[M]. 北京: 科学出版社, 1–39.
- 戴勇. 2013. 物化探综合解译在南昌东岗桥地热勘探中的应用研究[D]. 南京: 南京大学, 1–57.
- 高柏, 孙占学, 刘金辉. 2006. 江西省地热温泉开发利用与保护[J]. *水资源保护*, 22(2): 92–94.
- 李鹭, 孙占学, 陈功新, 张智超. 2019. 罗溪温泉水文地球化学特征及热水来源[J]. *中国矿业*, 28(1): 164–169.
- 李学礼, 史维浚. 1992. 庐山温泉的形成条件及成因研究[J]. *华东地质学院学报*, 15(3): 229–233.
- 林乐夫, 王安东, 孙占学, 万建军, 李小聪. 2017. 江西省实测地表热流值及特征[J]. *能源研究与管理*, 3: 91–94.
- 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 2013. 中国地热资源及其潜力评估[J]. *中国地质*, 40(1): 312–321.
- 刘峰, 王贵玲, 张薇, 岳晨, 甘浩男, 肖则佑, 欧小科. 2020. 江西宁都县北部大地热流特征及地热资源成因机制[J]. *地质通报*, 39(12): 1883–1890.
- 孙占学, 李学礼, 史维浚. 1992. 江西中低温地下水的同位素水文地球化学[J]. *华东地质学院学报*, 15(3): 243–248.
- 王贵玲. 2018. *中国地热志—华东华中卷* [M]. 北京: 科学出版社, 1–108.
- 王贵玲, 蔺文静. 2020. 我国主要热水型地热系统形成机制与成因模式[J]. *地质学报*, 94(7): 1923–1937.
- 汪集旸. 2015. *地热学及其应用*[M]. 北京: 科学出版社, 1–444.
- 汪集旸, 胡圣标, 庞忠和, 何丽娟, 赵平, 朱传庆, 饶松, 唐晓音, 孔彦龙, 罗璐, 李卫卫. 2012. 中国大陆干热岩地热资源潜力评估[J]. *科技导报*, 30(32): 25–31.
- 汪集旸, 熊亮萍, 庞忠和. 1993. *中低温对流型地热系统*[M]. 北京: 科学出版社, 6–10.