

引用格式:朱兆群,吴复柱,边凯,等.湖南长沙盆地中深层地热地质特征及资源潜力评价[J].油气藏评价与开发,2025,15(5):900-911.

ZHU Zhaoqun, WU Fuzhu, BIAN Kai, et al. Geological characteristics and potential evaluation of medium-deep geothermal resources in Changsha Basin, Hunan Province[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2025, 15(5): 900-911.

DOI: 10.13809/j.cnki.cn32-1825/te.2025.05.019

湖南长沙盆地中深层地热地质特征及资源潜力评价

朱兆群¹, 吴复柱¹, 边凯¹, 蒋飞军², 赵存良¹, 李丹¹, 石守桥¹

(1.河北工程大学地球科学与工程学院,河北邯郸 056038;2.湖南省地球物理地球化学调查所,湖南长沙 410014)

摘要:湖南省一次能源禀赋相对匮乏,地热能作为一种可替代能源,对优化能源结构、推动可持续发展具有重要意义。长期以来,湖南省地热勘探主要聚焦于隆起山地型水热资源,对沉积盆地内水热资源关注不足。近年来,长沙盆地展现出良好的地热资源潜力,然而对其地质特征、成因机制及储量规模等尚缺乏充分认识。综合前人成果及钻探资料,系统梳理分析了长沙盆地地热系统的“源、储、盖、通”等地质要素,建立了地热成因模式,并采用蒙特卡罗模拟方法对地热资源量进行了定量评估。研究表明:长沙盆地中深层地热的主要热源为拉张背景下地幔物质上隆带来的幔源传导热,热储层以上古生界碳酸盐岩为主,地下水环境相对封闭,水岩作用时间较长,盖层厚度及盆地内部结构产状对地温场分布产生影响,区域断裂和孔洞裂隙发育的储层构成良好的导热通道。长沙盆地中深层地热资源量平均为 9.85×10^8 GJ,相当于 0.34×10^8 t标准煤,能够满足约 176.68×10^8 m²的供暖需求,整体地热开发经济性较高,适宜开采,具有较好的社会、经济和环境效益。研究成果可为长沙盆地中深层地热资源勘探开发以及湖南沉积盆地型地热资源评价提供一定指导和参考。

关键词:地热成因模式;沉积盆地型;地热资源评价;蒙特卡罗模拟;长沙盆地

中图分类号:TE01

文献标识码:A

Geological characteristics and potential evaluation of medium-deep geothermal resources in Changsha Basin, Hunan Province

ZHU Zhaoqun¹, WU Fuzhu¹, BIAN Kai¹, JIANG Feijun², ZHAO Cunliang¹, LI Dan¹, SHI Shouqiao¹

(1. School of Earth Science and Engineering, Hebei University of Engineering, Handan, Hebei 056038, China; 2. Geophysical and Geochemical Survey Institute of Hunan Province, Changsha, Hunan 410014, China)

Abstract: Hunan Province has relatively scarce primary energy resources. As an alternative energy source, geothermal energy is significant for optimizing the energy structure and promoting sustainable development. Historically, geothermal exploration in Hunan Province has primarily focused on uplifted mountain-type hydrothermal resources, with insufficient attention on hydrothermal resources in sedimentary basins. In recent years, Changsha Basin has demonstrated promising geothermal resource potential. However, its geological characteristics, formation mechanisms, and reserve scale remain inadequately understood. Based on previous research findings and drilling data, this study systematically analyzed key geological elements of the geothermal system in the Changsha Basin, including heat source, reservoir, caprock, and conduit. A geothermal genesis model was constructed. Furthermore, Monte Carlo simulation was used to conduct a quantitative evaluation of the geothermal resource potential. The results indicated that the primary heat source for the medium-deep geothermal resources in the Changsha Basin was mantle-derived conductive heat, resulting from mantle material uplift under an extensional tectonic regime. The geothermal reservoir mainly consisted of Upper Paleozoic carbonate rocks, with a relatively closed groundwater environment and prolonged water-rock interaction. The thickness of the caprock and the structural configuration of the basin interior influenced the geothermal field distribution. Regional faults and the development of pores and fractures provided good thermal conduction pathways. The average geothermal resource in the Changsha Basin was 9.85×10^8 GJ, equivalent to 0.34×10^8 t of standard coal, which could meet the heating demand for approximately 176.68×10^8 m² of building area. Overall, the geothermal resources in this region are economically viable for development, with

收稿日期:2024-09-18。

第一作者简介:朱兆群(1986—),男,博士,讲师,从事油气藏开发地质、油气及地热资源评价等方面的研究。地址:河北省邯郸市经济技术开发区太极路19号,邮政编码:056038。E-mail:zzq86@126.com

通信作者简介:吴复柱(1988—),男,博士,副教授,从事地热资源评价、水文地质等方面的研究。地址:河北省邯郸市经济技术开发区太极路19号,邮政编码:056038。E-mail:wufuzhu@hebeu.edu.cn

基金项目:湖南省重点研发计划项目“湖南中深层地下水热勘查及资源化利用关键技术研究”(2022SK2070);湖南省地质院科研项目“湖南省中深层地下水热成因机制与靶区优选研究”(HNGSTP202211);河北省自然科学基金项目“基于过程驱动的浅水湖盆三角洲沉积模式及形成机制研究”(D2025402026)。

good social, economic, and environmental benefits. These findings can provide a reference for the exploration and development of medium-deep geothermal resources in the Changsha Basin, as well as for the evaluation of sedimentary basin-type geothermal resources in Hunan Province.

Keywords: geothermal genesis model; sedimentary basin type; geothermal resource evaluation; Monte Carlo simulation; Changsha Basin

地热能作为唯一不受季节、昼夜和气候变化影响的可再生清洁能源,凭借储量丰富、分布广泛、安全可靠、利用高效、减碳潜力巨大等显著优势,在中国能源结构低碳化转型和实现“双碳”目标进程中扮演着重要的角色^[1-3]。国家“十四五”规划及《“十四五”现代能源体系规划》明确指出,要“因地制宜开发利用地热能”“推动地热能资源绿色开发利用”。国家能源局等多部门于2021年联合发布《关于促进地热能开发利用的若干意见》,强调要“深化地热资源勘查工作”。地热资源通常分为3大类:浅层地热、水热型地热和干热岩^[4],其中,水热资源是目前地热开发利用的主体^[5],根据热传导方式、构造成因等又可细分为对流型和传导型^[6-7],以及沉积盆地型和隆起山地型等类型^[8]。

湖南省是我国中部地区的重要省份,长期以来面临缺煤、无油、少气的能源困境。为了优化能源结构,缓解能源紧张局面,湖南省积极推进地热资源的开发利用,但前期工作主要集中在以出露温泉为主的隆起山地型水热资源以及部分浅层地热能 and 深部干热岩体上^[9-13],沉积盆地型地热资源未受到足够重视,相关基础研究不足。长沙市作为湖南省地热能开发的重点城市,已被列为全国首批碳达峰试点城市。近年来,长沙盆地中深层地热钻探显示其具有较好的地热开发潜力,但盆地整体勘探程度偏低,对地热地质特征以及资源储量的认识有限,制约了地热资源的进一步挖潜。鉴于此,在前期勘查调研的基础上,对长沙盆地中深层地热资源的赋存特征和地热系统要素进行梳理分析,探索建立起地热成因模式,并应用蒙特卡罗随机模拟方法开展资源量不确定性评价,以期为后续地热勘探开发提供科学指导,同时也为湖南省其他沉积盆地地热资源评价提供一定参考。

1 研究区概况

湖南省湘东北地区位于扬子板块与华夏板块之间江南造山带的中部,内部由一系列被深大断裂分割的断隆和断陷盆地相间排列而成,构成典型的“盆岭构造”格局,其中长平盆地(即长沙—平江盆地)夹于幕阜山—望湘断隆与浏阳—衡东断隆之间^[14-16],总体呈北北东向延伸(图1)。研究区长沙盆地属于长平盆地的中南段,在多期构造运动叠加影响下,盆地内部起伏不平,形成凹凸相间的构造格局(包括长沙次凹、新开铺次隆、洞井铺次凹等)。盆地基底主要由元古代板溪群、冷家溪群变质岩系和上中生代泥盆系、石炭系碳酸盐岩组成,上覆盖层以古

近系和白垩系陆相碎屑岩为主,厚度可达2 000 m以上,二者之间为区域角度不整合。盆内断裂发育,主要呈北东向分布,大多形成于印支期以后,部分断裂活动一直延续至今。

长沙市属于中亚热带季风区,气候温暖潮湿,地表平均温度约17.2℃。根据湖南省地热资源划分,长沙盆地处于临湘—灰汤地下热水带的中段,属于湘东地热异常区的一部分^[17],其西北侧与著名的宁乡灰汤地热田相毗邻。近年来,长沙盆地钻探多口地热井,出水温度26~36℃,根据前人井温数据统计,该地区平均地热增温率介于0.024~0.034℃/m,高于湖南省0.012~0.018℃/m的地热背景水平^[17-18],而基于地温梯度的推算,长沙盆地中深部温度可达60~80℃以上,地热资源前景较好。

2 地热地质条件

2.1 研究手段

2.1.1 钻孔温度测量

湖南省早期的地热调查以隆起带为主,盆地区的投入相对较少。长沙盆地虽已钻探多口地热井,但大部分井深较浅,长沙地热1井(DR01孔)是研究区少数井深超过1 000 m的地热探井之一,其位于新开铺次隆东北部的断块内,钻探深度达1 200 m,钻遇古生代、中生代多套地层。此次利用精度±0.1℃的热敏电阻测温仪,采用下测连续测量方式对地热1井进行了完整的钻孔测温,为盆地地温分布和热流特征分析提供了一手资料。

2.1.2 大地热流计算

根据傅里叶定律,在一维稳态条件下,大地热流值等于垂向上地温梯度与岩石热导率的乘积(公式1),每个钻孔可以根据地温梯度和岩石热导率的分布情况选择一个或者多个热流计算段^[19]。岩石热导率测试主要在湖南省勘测设计院测试中心完成,其中热导率分析仪的测试范围介于0.2~25.0 W/(m·K),分辨率为0.001 W/(m·K),测试准确度为±3%。

$$Q = -K \frac{dT}{dZ} \quad (1)$$

式中: Q 为大地热流,单位mW/m²; K 为岩石热导率,单位W/m/K; dT/dZ 为地温梯度,单位℃/km,负号代表大地热流传导的方向与地温梯度方向相反。

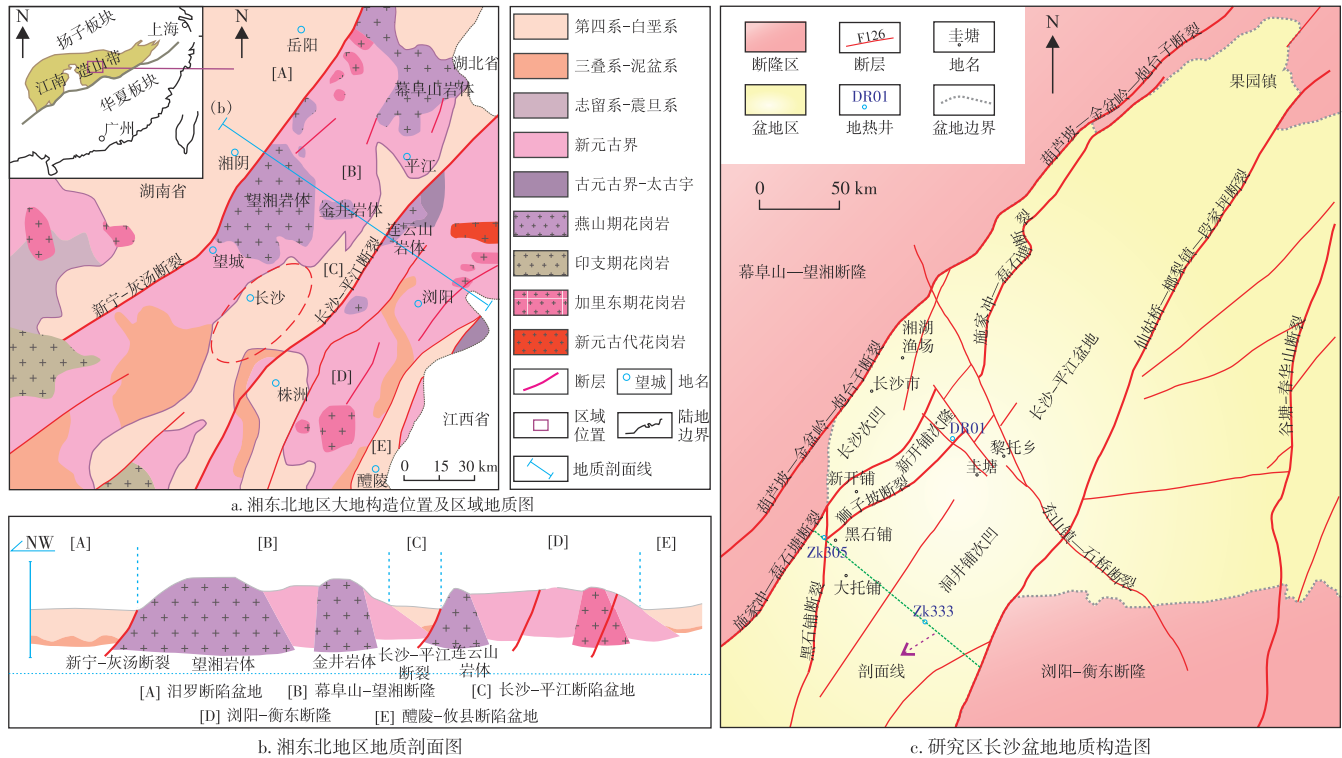


图1 湖南长沙盆地区域地质概况图(据文献[14-16]修改)

Fig. 1 Regional geological overview of Changsha Basin in Hunan Province (modified from references [14-16])

2.1.3 壳幔热流配分

一个地区壳幔热流值的高低、比值是热结构分析的主要内容,代表了深部热量来源与地热背景^[20]。根据壳幔热流配分原理,莫霍面以上所有地层放射性生热所产生的热流为地壳热流 q_c ,总的大地热流 q_s 减去地壳热流的剩余热流为地幔热流 q_m ,每一层放射性衰变所产生的热流值可表示为该层厚度 D 与平均生热率 A 的乘积,地壳深部放射性生热率 A 可利用地震纵波速度 V_p 来估算^[16-18]。

$$q_i = A_i D_i \quad (2)$$

$$q_c = \sum q_i = \sum A_i D_i \quad (3)$$

$$q_m = q_s - q_c = q_s - \sum A_i D_i \quad (4)$$

$$\ln A_i = 16.5 - 2.74 V_{pi} \quad (5)$$

式中: q_i 为地壳某结构层放射性衰变产生的热流值,单位 mW/m^2 ; A_i 为该结构层生热率,单位 $\mu\text{W/m}^3$; D_i 为该结构层厚度,单位 km ; q_m 为地幔热流分量,单位 mW/m^2 ; q_s 为总的大地热流,单位 mW/m^2 ; q_c 为地壳热流分量,单位 mW/m^2 ; V_{pi} 为该结构层地震纵波速度,单位 km/s 。

2.1.4 水样测试分析

参照中华人民共和国地质矿产行业标准《地下水水质分析方法》(DZ/T 0064-2021),对长沙地热1井中深层碳

酸盐地层进行了水样采集和水质全分析。水样的密封、清洗及保护剂添加参照水质采样样品的保存和管理技术规范执行,主要的测试项目包括pH值、溶解性总固体(TDS)、总硬度以及 K^+ 、 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Cl^- 、 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 CO_3^{2-} 等。其中,pH值和TDS等主要在水质快速检测仪在现场测量,水样中的阴离子、阳离子主要采用电感耦合等离子体发射光谱仪监测,平衡误差控制在3%以内。

2.2 热源条件

2.2.1 热传导方式

长沙盆地是燕山运动期形成的陆相断陷盆地,其生长发育与地壳拉伸减薄密切相关。根据区域重磁资料分析,该盆地位于莫霍面隆起带上,地壳厚度仅为30 km,是湖南省地壳最薄地区之一,远低于大陆地壳平均厚度^[19]。地壳薄化及高温熔融物质的上侵,为地幔热量向地壳的传递创造了有利条件。

地热1井测温数据显示垂向上地温呈分段稳定增大趋势(图2),孔底温度 51.9°C ,中间存在一破碎带,温度有局部转折降低,但整体属于传导型井温曲线。通过统计该井地温梯度介于 $0.017\sim 0.040^\circ\text{C/m}$,平均为 0.029°C/m ,高于湖南省平均地温梯度水平^[19];同时测试岩石热导率介于 $1.96\sim 3.26 \text{ w/(m}\cdot\text{K)}$,采用分段法(100~400 m、600~1100 m)计算大地热流值为 69.83 mW/m^2 ,也高于湖南省

平均热流值 59.31 mW/m²,反映出长沙盆地具有较高地热背景^[18]。

2.2.2 热结构分析

基于区域构造和深部探测结果,研究区地壳可以划分为3层^[22]:上地壳($D=4.75$ km, $V_p=5.85$ km/s)、中地壳($D=12.05$ km, $V_p=6.04$ km/s)和下地壳($D=11.8$ km, $V_p=6.65$ km/s),将其代入公式2—公式5,计算出总的地壳热流分量 q_c 为 21.19 mw/m²,地幔热流分量 q_m 为 48.64 mw/m²,由此得出研究区壳、幔热流配比 $q_c/q_m=0.43<0.8$,属于“冷

壳热幔”型热结构,这也与前人将长江中下游地区划为“幔源产热区”的认识基本一致^[20],深部幔源供热构成盆地稳定高能的主要热源。

此外,长沙盆地演化过程中也伴随有多期岩浆活动,在白垩系地层中发现有玄武岩和玻璃质粗面岩,盆地边缘也广泛分布岩脉和岩株。然而,根据多数岩浆热源模拟研究^[23-24],一定规模的“岩浆囊”异常高温体恢复至热平衡的时间最长不超过 100 Ma,据此推断,研究区内的岩浆岩已冷却,岩浆活动对该区现今地温场无明显影响,不再构成有效的附加热源。

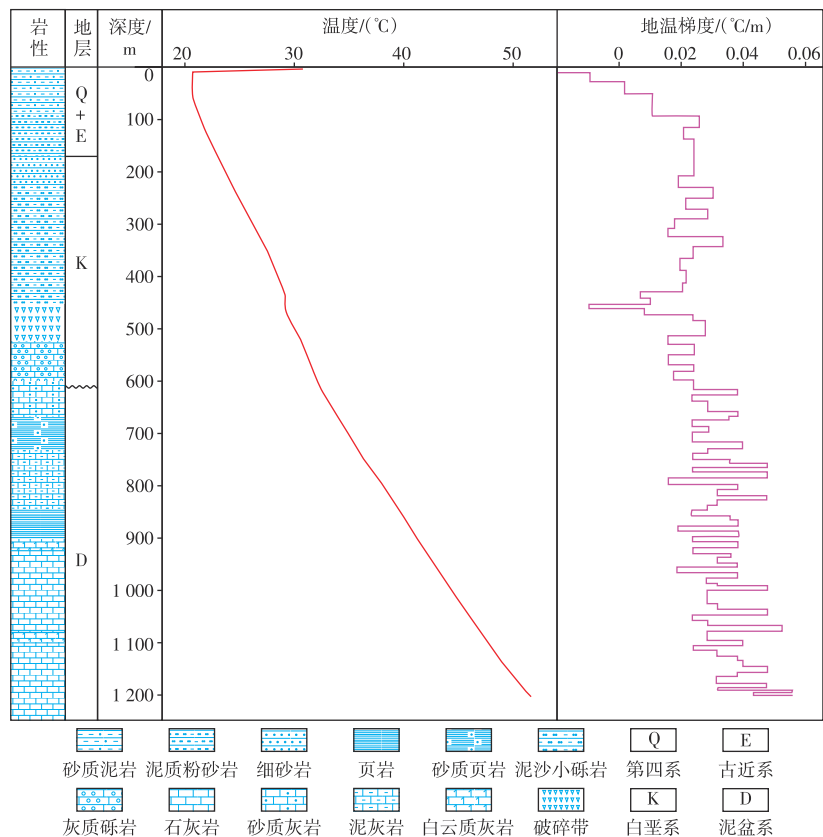


图2 长沙盆地地热1井(DR01孔)井温曲线图

Fig. 2 Well temperature curves of geothermal well DR01 in Changsha Basin

2.3 热储条件

2.3.1 主要热储类型

长沙盆地基底的上古生界地层主要由泥盆系中统棋子桥组和石炭系中上统壶天群灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩以及部分砂砾岩等组成,在印支运动影响下,经历了长期的隆升成陆和风化剥蚀作用,发育大量的岩溶裂隙,是研究区中深层重要的地热水储层,如地热1井底部钻遇有泥盆系碳酸盐岩热储,含水层平均水温 41.5 °C,内部溶蚀裂隙、洞隙发育,导致钻井过程中常发生漏水现象,抽水时垮孔堵塞现象也比较严重。

碳酸盐岩岩溶裂隙地热水储层也是湖南省地热勘查的主要热储类型之一,在全省占比可达 60% 以上^[18]。区域水文地质调查结果表明^[17-18],该套热储空间展布受盆地构造格局控制,大致呈层状分布,横向多变,不整合面之下储层顶板埋深由盆地边缘向凹陷区逐渐增加(图 3),最大埋深超过 2 000 m,受储层非均质性影响,内部富水性差异较大,正常单井涌水量介于 328~1 038 m³/d,渗透系数介于 0.01~10 m/d。

2.3.2 水化学特征

依据地热1井的水化学分析结果(表1),中深部碳酸盐岩热水具有中等硬度和弱碱性特征,主要阴离子为碳

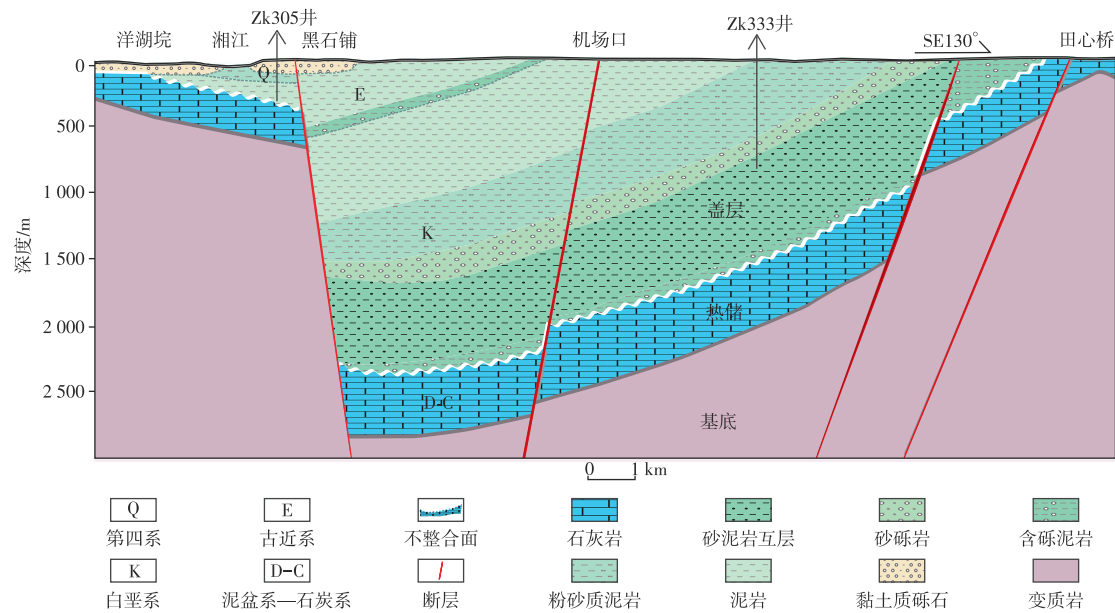


图3 长沙盆地地热地质剖面图(据文献[18]修改)

Fig. 3 Geothermal geological profile of Changsha Basin (modified from reference [18])

表1 长沙盆地地热1井(DR01孔)上古生界碳酸盐岩热储水化学分析数据

Table 1 Hydrochemical analysis data of Upper Paleozoic carbonate reservoir in geothermal well DR01, Changsha Basin

分析项目	质量分数/(mg/L)	分析项目	质量分数/(mg/L)	分析项目	质量分数/(mg/L)			
阳离子	K ⁺	13.20	阳离子	Cl ⁻	159.41	其他	总碱度	272.97
	Na ⁺	54.00		SO ₄ ²⁻	5.00		总硬度	354.18
	Ca ²⁺	89.54		HCO ₃ ⁻	332.86		pH 值	8.01
	Mg ²⁺	31.74		CO ₃ ²⁻	6.13		偏硅酸	32.18
	NH ₄ ⁺	1.00		HO ₃ ⁻	0.20		溶解性总固体	551.00

酸氢根离子(HCO₃⁻),氯离子(Cl⁻)次之。阳离子以钙离子(Ca²⁺)为主,其次是钠离子(Na⁺)和镁离子(Mg²⁺),利用Piper图解确定水化学类型为HCO₃⁻·Cl-Ca·Mg·Na型(图4a)。此外,该水样变质系数 $\gamma(\text{Na}^+)/\gamma(\text{Cl}^-)$ 为0.34,小于标准海水的0.85,脱硫系数 $\gamma(\text{SO}_4^{2-})/\gamma(\text{SO}_4^{2-}+\text{Cl}^-)$ 为0.03,也明显低于标准海水水平0.09,Ca²⁺含量较高, $\gamma(\text{Ca}^{2+})/\gamma(\text{Mg}^{2+})$ 系数大于1,为2.82,上述反映出古生界碳酸盐岩热水处于相对封闭的水动力环境中,径流时间长,并发生了较为强烈的水岩反应作用,以溶解富钙矿物为主。

Na-K-Mg三角图可以用于判断水-岩的平衡状态。通过投点该水样落在三角图右下角(图4b),说明Mg²⁺含量较高,水-岩平衡温度相对偏低,地下热水尚未达到离子平衡状态,有发生混合作用的可能。由于水样总体属于未成熟水,因而在估算热储温度时不宜采用阳离子温标,而应使用SiO₂地热温标,此次通过对照由玉髓温标得到的热储温度为40.3℃,与实际测温更为吻合,因此后续可选用玉髓SiO₂温标作为研究区古生界碳酸盐岩热储的地热温度计。

2.4 盖层条件

2.4.1 盖层基本特征

长沙盆地内广泛发育白垩系、古近系地层,主要岩性包括砂砾岩、泥质粉砂岩、粉砂质泥岩、钙质泥岩和泥灰岩等,其透水性、通气性和导热性相对较差,具有良好隔热保温特性,成为下伏碳酸盐岩热储的重要盖层。受到盆地构造格局的影响,盆地边缘地区的盖层相对较薄,局部甚至出现缺失现象,导致基底的碳酸盐岩直接出露,随着向盆地中心的深入,盖层厚度逐渐增加(图3),中部深度可达2 000 m以上。

2.4.2 盖层对地温分布影响

对于传导型地热系统,盖层对于阻隔热量扩散,保持储层温度具有重要作用^[25]。长沙盆地内部凹凸相间,构造起伏较大,为探讨盆地边缘盖层厚度变化对温度分布的影响,结合研究区地热地质特征构建了一简化的概念模型(图5a),并分别考虑盆地边缘盖层厚度分别为0 m、200 m、400 m和600 m 4种情况开展地温场数值模拟。

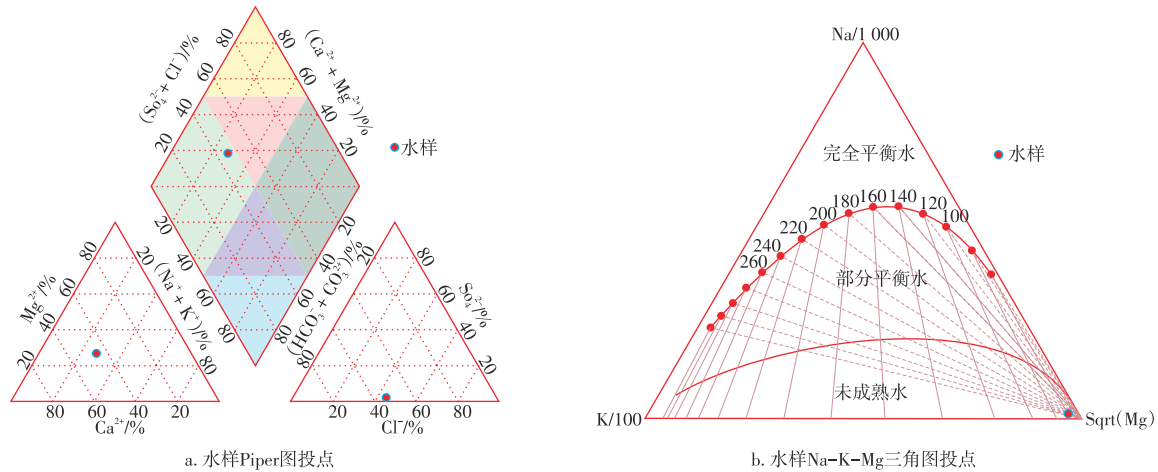


图4 长沙盆地地热1井(DR01孔)上古生界碳酸盐岩热储水化学分析图解

Fig. 4 Hydrochemical analysis diagrams of Upper Paleozoic carbonate reservoir in geothermal well DR01, Changsha Basin

通过对比可以看出,当盆地边缘盖层较薄或形成秃顶构造时,基底内部温度分布呈下凹形态,盆地中心则呈上凸形态;在相同深度处,基底一侧的温度和地温梯度均小于盖层一侧;而随着上覆盖层厚度增加,基底顶部开始出现上凸的温度分布,指示为一定热异常,基底深部下凹形态减弱,与盖层一侧的温度差异也逐步减小,整个盆地温度呈上升趋势(图5b—图5e)。同时,当盆地斜坡倾角较大时,基底等温线上凸下凹非对称镜像分布变得更加明显,随着坡度变缓(即斜坡高度一定,斜坡宽度 w 逐渐变大时),基底与盖层温度逐步趋于一致(图5f—图5i)。

另外还可以看到,在盆地斜坡盖层和基底的交界面处,地温曲线呈现出上翘的分布特征,界面处温度要高于两侧同深度地层,形成所谓的“边界热折射效应”^[26],而随着埋深的增加这一差异呈现出反向变化趋势,即与盖层一侧温差逐渐减小,与基底一侧温差逐渐增大,这也预示着盆地深部碳酸盐岩热储与碎屑岩盖层侧向接触带可能是地下高温水发育的相对有利部位。

2.5 通道条件

前人研究发现,湖南省收集到的地热水的 δD 和 $\delta^{18}O$ 数据基本落在降水线附近^[18],因此推断地热水主要与大气降水有关。此外,水化学分析显示,研究区水样主要成分为碳酸氢根离子(表1),这也与地热水源于大气降水补给的认识相一致。长沙盆地内发育多条北东向活动断裂,如葫芦坡—金盆岭—炮台子断裂、施家冲—磊石塘断裂等,这些断裂大都切割基底岩层^[17],内部裂隙发育,为地热流体的运移与热的传输提供了良好的导水导热条件。

2.6 地热成因模式

长沙盆地地热热量的补给源主要为大地热流,构成

典型的非岩浆热储水热型地热系统。综合上述地热地质要素分析,初步建立起研究区地热系统的成因模式(图6)。大气降水、地表水体沿盆地边缘基底裸露区及断裂破碎带下渗,进入到岩溶裂隙比较发育的上古生界碳酸盐岩储层,形成富水性良好的含水层。由于地下环境相对封闭,地下水在缓慢侧向径流过程中,充分接受深部热源的传导加热,形成可供开发利用的层状地热流体,上覆厚层碎屑岩盖层沉积起到较好的保温绝热作用。地下热水在压力差、温度差、容重差的驱动下,通过基底风化壳、断裂带向上运移,影响浅部地温场的分布,并可在局部地区形成一定地热异常。热储、盖层的发育条件以及二者的匹配关系成为影响研究区中深层地热资源勘探成效的重要因素。

3 地热资源评价

3.1 评价方法

考虑到研究区工作程度有限,地热资源预测存在较大不确定性,参照国家地热行业相关标准,以热储法(体积法)为基本公式(公式6),引入蒙特卡罗方法开展地热资源量随机模拟评价。相比传统确定性储量计算方法,蒙特卡罗方法可以较为全面地考虑地质参数的不确定性影响,获得储量的概率分布及可信区间,从而提高评价结果的客观性和可靠性^[27-28]。

$$\begin{cases} Q = Q_r + Q_w \\ Q_r = Ad\rho_r c_r (1 - \varphi)(T_r - T_0) \\ Q_L = Q_1 + Q_2 \\ Q_1 = A\varphi d \\ Q_2 = ASH \\ Q_w = Q_L c_w \rho_w (T_r - T_0) \end{cases} \quad (6)$$

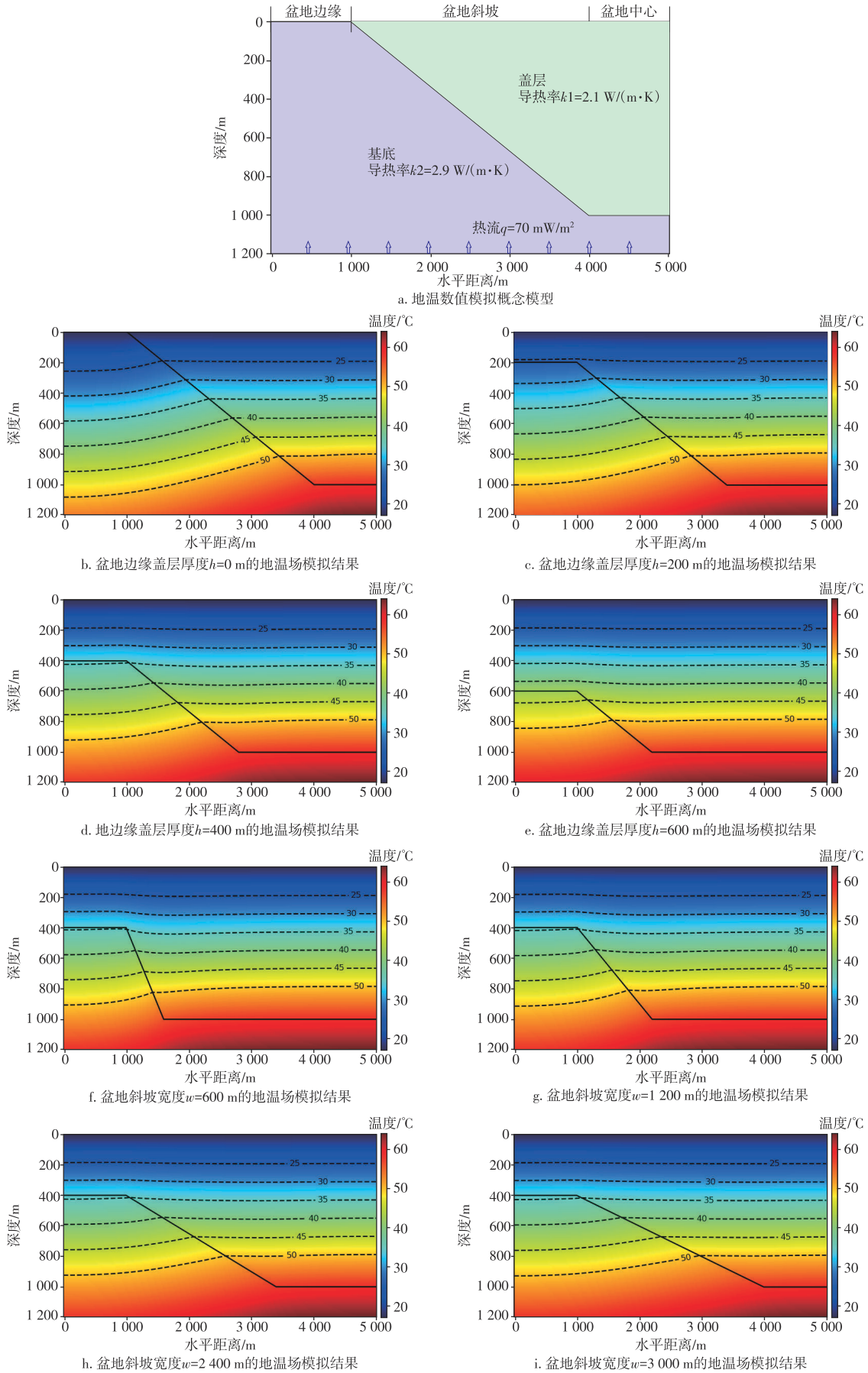


图5 二维地热地质模型及地温场数值模拟结果

Fig. 5 Two-dimensional geothermal geological model and numerical simulation results of geothermal field

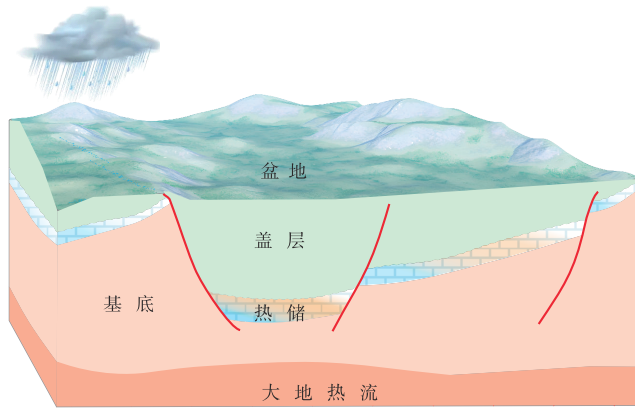


图6 长沙盆地地热系统成因模式示意图

Fig. 6 Genesis model diagram of geothermal system in Changsha Basin

式中: Q 为热储层中储存的热量,单位J; Q_r 为岩石中储存的热量,单位J; Q_w 为水中储存的热量,单位J; Q_L 为热储层中储存的水量,单位 m^3 ; Q_1 为计算时热储孔隙中热水的静储量,单位 m^3 ; Q_2 为水位降低至取水深度时热储层所释放的水量即地热流体的弹性储存量,单位 m^3 ; A 为热储面积,单位 m^2 ; d 为热储厚度,单位m; ρ_r, ρ_w 分别为热储和水密度,单位 kg/m^3 ; c_r, c_w 分别为热储和水比热容,单位 $J/(kg \cdot ^\circ C)$; φ 为热储孔隙度,%; T_r 为热储温度,单位 $^\circ C$; T_0 为当地年平均气温,单位 $^\circ C$; S 为弹性释水系数; H 为计算起始点以上的压力水头高度,单位m。

3.2 评价参数

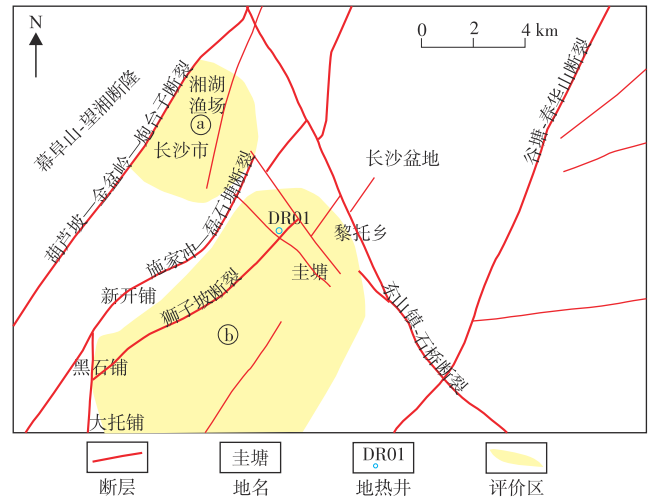
传统热储法将参数设为某一固定数值,难以反映储层厚度、孔隙度等参数的实际分布特征。根据蒙特卡罗模拟原理选择正态分布、三角分布、拉普拉斯分布和均匀分布等概率模型来定量表征不同参数的可能性分布(表2)。

1)几何参数

参照前人地热异常分布区划分结果^[17],以地质推断为主,并根据钻孔测温资料(如出口水温 $\geq 25^\circ C$)以及部分物探资料(如可控源视电阻率 $\leq 500 \Omega \cdot m$),在平面上圈定了长沙盆地地热资源评价的主要区域,即湘湖渔场评价区和大托铺评价区(图7),其中前者主要位于长沙次凹内,面积 A 为 $12 km^2$,后者主要位于洞井铺次凹内,面积 A 为 $68 km^2$ 。评价中将面积参数 A 设为常值,热储厚度 d 则设为均值 $\mu=200 m$,标准差 σ 分别为 $10 m$ 和 $20 m$ 的正态分布。

2)物理参数

根据相关规范标准和测试结果,水的密度 ρ_w 采用最小值为 $983 kg/m^3$,最大值为 $1000 kg/m^3$,中间值为 $994 kg/m^3$ 的三角分布,比热容 c_w 采用最小值为 $4177 J/kg \cdot ^\circ C$,最大



注:①为湘湖渔场地热资源评价区;②为大托铺地热资源评价区。

图7 研究区地热资源评价区

Fig. 7 Geothermal resource evaluation area in study area

值为 $4185 J/kg \cdot ^\circ C$ 的均匀分布;热储岩石的密度 ρ_r 采用位置参数 μ 为 $2870 kg/m^3$,尺度参数 σ 为 $10 kg/m^3$ 的拉普拉斯分布,比热容 c_r 采用位置参数 μ 为 $570 J/kg \cdot ^\circ C$,尺度参数 σ 为 $20 J/kg \cdot ^\circ C$ 的拉普拉斯分布;根据相关岩石测试资料并结合施工钻孔揭露热储岩心破碎、裂隙发育情况,综合确定热储孔隙度 φ 采用最小值为 0.2% ,最大值为 1.2% ,中间值为 0.5% 的三角分布。

3)温度参数

根据钻孔测温结果,将湘湖渔场评价区热储温度 T_r 设为最小值为 $27^\circ C$,最大值为 $35^\circ C$,中间值为 $30^\circ C$ 的三角分布,大托铺评价区热储温度 T_r 设为最小值为 $54^\circ C$,最大值为 $61^\circ C$,中间值为 $57^\circ C$ 的三角分布。根据长沙气象局多年气象记录资料,平均气温 T_0 取常值 $17.2^\circ C$ 。

4)水文参数

根据区域水文试验资料,弹性释水系数 S 采用最小值为 1×10^{-3} ,最大值为 5×10^{-3} 的均匀分布;对于水头高度参数 H ,湘湖渔场和大托铺评价区分别采用最小值为 $150 m$,最大值为 $1000 m$ 和最小值为 $450 m$,最大值为 $1200 m$ 的均匀分布。

3.3 评价结果

采用随机数生成方法从各输入参数概率分布中随机抽取评价样本,设置迭代次数 100000 次,将其代入热储法模型得到地热资源量的蒙特卡罗模拟结果(表3—表4,图8—图9)。统计分析表明,湘湖渔场和大托铺评价区地热资源量整体呈正态分布特征,变异系数分别为 0.14 和 0.12 ,说明模拟结果的不确定性水平较低,总的储量构成中岩石热储量占有较大比重,在 95.0% 的置信水平下,前者地热资源量介于 $4.10 \sim 7.09 \times 10^{16} J$,平均为 $5.46 \times 10^{16} J$,后者地热资源量介于 $0.73 \sim 1.15 \times 10^{18} J$,平均为 $0.93 \times 10^{18} J$ 。

表2 长沙盆地地热资源评价参数数据分布及取值依据

Table 2 Parameter data distribution and value selection basis for geothermal resource evaluation in Changsha Basin

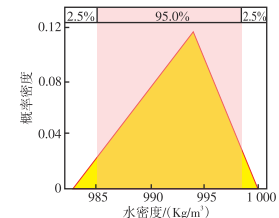
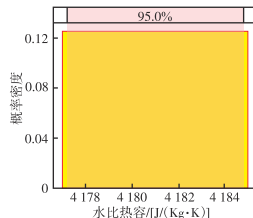
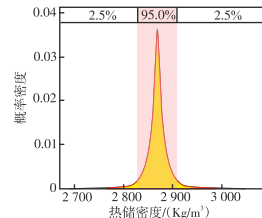
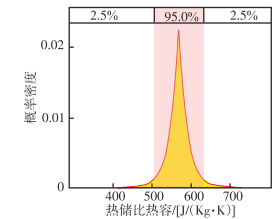
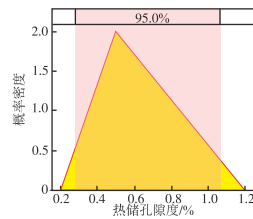
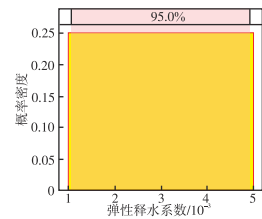
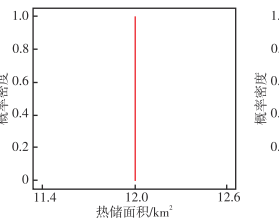
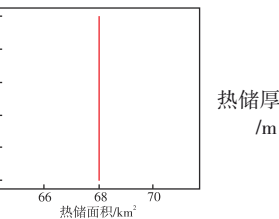
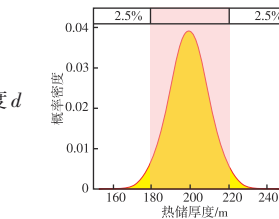
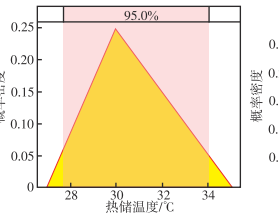
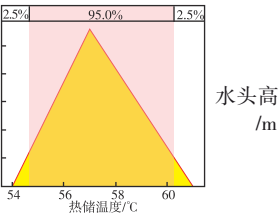
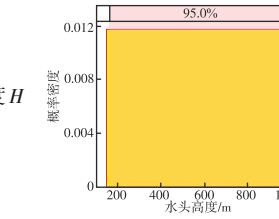
评价参数	参数分布及取值依据	评价参数	参数分布及取值依据	评价参数	参数分布及取值依据
水密度 ρ_w / (kg/m ³)		水比热容 c_w / (J/kg·°C)		热储密度 ρ_r / (kg/m ³)	
	最小值=983,中间值=994,最大值=1 000 主要依据:相关规范标准及测试结果		最小值=4 177,最大值=4 185 主要依据:相关规范标准及测试结果		$\mu=2\ 870, \sigma=10$ 主要依据:相关规范标准及测试结果
热储比热容 c_r / (J/kg·°C)		热储孔隙度 φ / %		弹性释水系数 S / 10 ⁻³	
	$\mu=570, \sigma=20$ 主要依据:相关规范标准及测试结果		最小值=0.2,中间值=0.5,最大值=1.2 主要依据:区域地质资料及钻探情况		最小值=1,最大值=5 主要依据:区域水文测验资料
评价参数	参数分布及取值依据	评价参数	参数分布及取值依据	评价参数	参数分布及取值依据
	湘湖渔场评价区		大托铺评价区		湘湖渔场评价区
热储面积 A / km ²		热储厚度 d / m		热储厚度 d / m	
	$A=12.0$ 主要依据:地质推断结合部分钻孔和物探资料		$A=68$ 主要依据:地质推断结合部分钻孔和物探资料		$\mu=200, \sigma=10$ 主要依据:钻孔测温资料和部分物探资料
热储温度 T_r / °C		水头高度 H / m		水头高度 H / m	
	最小值=27,中间值=30,最大值=35;最小值=54,中间值=57,最大值=61 主要依据:钻孔测温资料		最小值=150,最大值=1 000;最小值=450,最大值=1 200 主要依据:区域水文测验结果		

表3 基于蒙特卡罗模拟的湘湖渔场评价区地热资源储量计算结果

Table 3 Calculation results of geothermal resource reserves in Xianghu Fishery evaluation area based on Monte Carlo simulation

统计参数	总地热储量/10 ¹⁶ J	岩石热储量/10 ¹⁶ J	流体热储量/10 ¹⁵ J	流体储存量/10 ⁷ m ³	静态储存量/10 ⁷ m ³	弹性储存量/10 ⁷ m ³
中位数	5.40	5.20	1.87	3.37	1.46	1.79
均值	5.46	5.26	2.01	3.59	1.52	2.07
标准差	0.78	0.76	0.80	1.34	0.51	1.24
最小值	2.92	2.78	0.37	0.77	0.45	0.18
最大值	9.58	9.23	6.04	8.72	3.30	5.97
2.5%分布值	4.10	3.94	0.83	1.55	0.68	0.40
97.5%分布值	7.09	6.83	3.84	6.60	2.59	4.39

两个评价区地热流体储存量总体呈现弱正偏态分布特征,其中,前者中位数和平均值分别为 3.37×10^7 m³ 和

3.59×10^7 m³, 偏度系数为 0.493; 后者中位数和平均值分别为 2.44×10^8 m³ 和 2.54×10^8 m³, 偏度系数为 0.368。

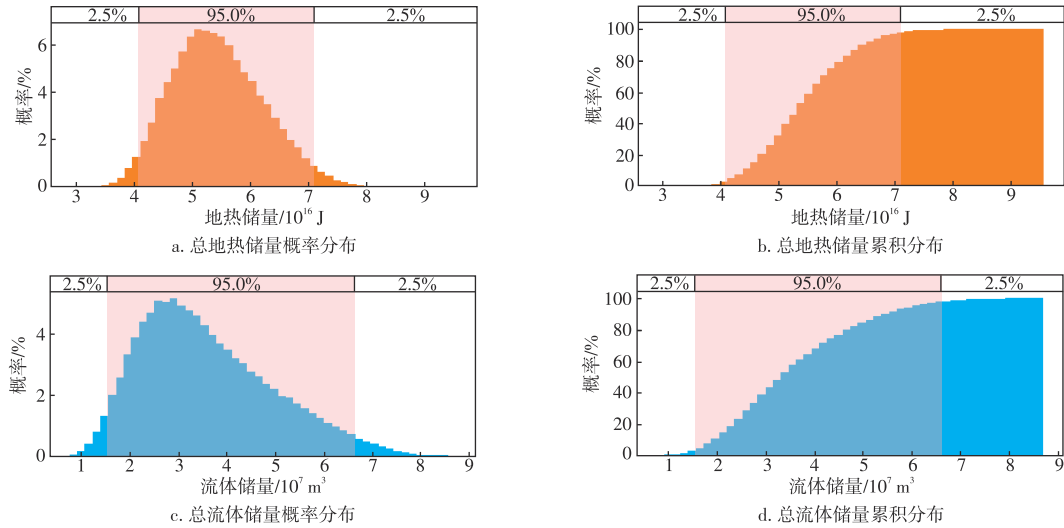


图8 湘湖渔场评价区地热资源储量统计分布

Fig. 8 Statistical distribution maps of geothermal resource reserves in Xianghu Fishery evaluation area

表4 基于蒙特卡罗模拟的大托铺评价区地热资源储量计算结果

Table 4 Calculation results of geothermal resource reserves in Datuopu evaluation area based on Monte Carlo simulation

统计参数	总地热储量/ 10^{18} J	岩石热储量/ 10^{18} J	流体热储量/ 10^{16} J	流体储量/ 10^8 m ³	静态储量/ 10^8 m ³	弹性储量/ 10^8 m ³
中位数	0.92	0.88	4.05	2.44	0.82	1.56
均值	0.93	0.89	4.24	2.54	0.86	1.68
标准差	0.11	0.11	1.44	0.86	0.30	0.80
最小值	0.50	0.48	1.04	0.65	0.21	0.31
最大值	1.51	1.43	9.62	5.68	2.09	4.08
2.5%分布值	0.73	0.69	1.95	1.18	0.38	0.50
97.5%分布值	1.15	1.11	7.38	4.40	1.51	3.46

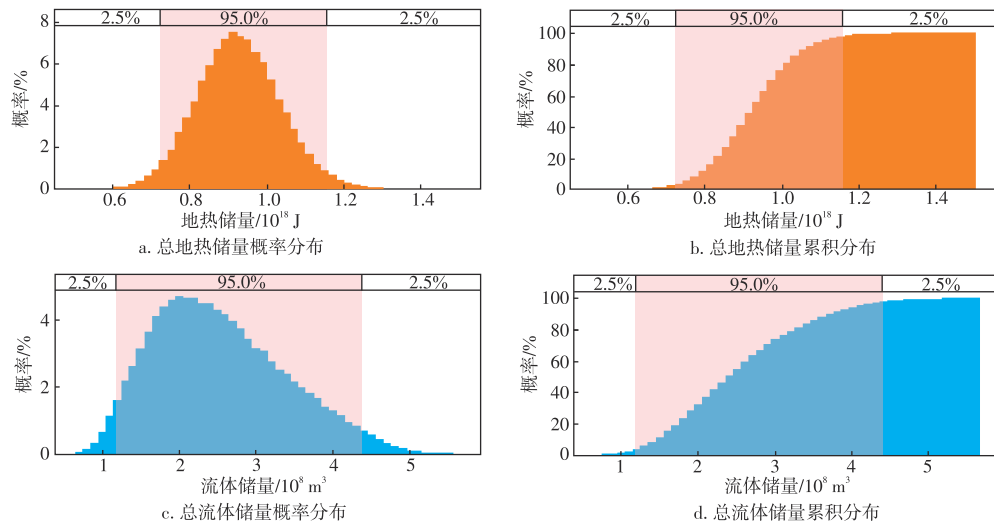


图9 湘湖渔场评价区地热资源储量统计分布

Fig. 9 Statistical distribution maps of geothermal resource reserves in Xianghu Fishery evaluation area

3.4 开发利用

长沙盆地地热成井深度介于500~2 000 m,大部分地热井流体单位产量介于5~30 m³/(d·m),部分可超过50 m³/(d·m)。在当前技术条件下,该盆地总体属于经济

性较高且较适宜开采的地热资源区;所采地热水温度介于25~40 ℃,属低温热水,溶解性总固体含量小于1 000 mg/L,可用于洗浴、温室采暖、养殖和农田灌溉等。根据地热资源量计算结果,湘湖渔场和大托铺评价区地热资源量合计平均为9.85×10⁸ GJ,折合标准煤为0.34×10⁸ t。参照国家

能源局《地热资源地质勘查规范》(GB/T 11615-2023),岩溶热储回收率取15%,则总的可采地热资源量为 1.48×10^8 GJ。按照100 a开采周期估算,相当于每年节约标准煤 5×10^4 t。若将每年开采的地热能全部用于供暖,则可供居室采暖面积为 176.68×10^4 m²,相应地,每年减少CO₂排放量 11.93×10^4 t,节省治理费约1 200万元。这表明研究区地热资源开发利用可带来较好的社会、经济和环境效益。

4 结论

1) 湖南长沙盆地为中生代断陷盆地,地壳拉伸减薄,地幔物质上涌,构成主要的地热补给源,使盆地具有较高大地热流背景,其热传递方式以热传导方式为主;中深层热储主要为上古生界碳酸盐岩,上覆有良好的盖层。数值模拟表明,盖层厚度以及盆地斜坡倾角等内部结构产状对地温场分布具有一定影响;研究区地下热水来源主要为大气降水,区域性断裂和储层中的孔隙裂隙构成有效的导水导热通道,水质类型为HCO₃·Cl-Ca·Mg·Na型,水体相对封闭,水岩作用时间长。

2) 基于热储法并结合蒙特卡罗模拟,得到地热储量的概率分布及可信区间等统计参数,能够较为全面和客观地反映地热资源评价结果。通过不确定性评价,长沙盆地湘湖渔场评价区地热资源量介于 $4.10 \sim 7.09 \times 10^{16}$ J,平均为 5.46×10^{16} J;大托铺评价区地热资源量介于 $0.73 \sim 1.15 \times 10^{18}$ J,平均为 0.93×10^{18} J。整体上,研究区属于经济性较高且较适宜开采的地热资源区,地热水可用于洗浴、温室采暖、养殖和农田灌溉等,年开采地热资源量能够满足 176.68×10^4 m²的供暖面积,显示出良好的经济环境效益。

3) 长沙盆地总体具有较好的地热资源潜力,但目前勘探程度相对较低,许多研究尚处于探索阶段。有待加强地球物理探测、地热井钻探、水化学测试分析等方面的工作,以进一步明确地下热水的分布模式和赋存规律,提升资源评价的精度和可靠性,加快推进地热能的有效开发利用,也为湖南其他沉积盆地地热资源评价和勘探开发提供有益参考借鉴。

参考文献

- [1] 曹锐,多吉,李玉彬,等.我国中深层地热资源赋存特征、发展现状及展望[J].工程科学学报,2022,44(10):1623-1631.
CAO Rui, DOR Ji, LI Yubin, et al. Occurrence characteristics, development status, and prospect of deep high-temperature geothermal resources in China [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(10): 1623-1631.
- [2] 郭路,夏岩,段晨阳,等.长庆油田区中深层地热资源储量评价[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):749-756.
GUO Lu, XIA Yan, DUAN Chenyang, et al. Evaluation of middle and deep geothermal resources reserves in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 749-756.
- [3] LIN B, LI Z. Towards world's low carbon development: The role of clean energy[J]. Applied Energy, 2022, 307: 118160.
- [4] 王贵玲,蔺文静.我国主要水热型地热系统形成机制与成因模式[J].地质学报,2020,94(7):1923-1937.
WANG Guiling, LIN Wenjing. Main hydro-geothermal systems and their genetic models in China[J]. Acta Geologica Sinica, 2020, 94(7): 1923-1937.
- [5] 刘春雷,李亚松,曹胜伟,等.福建省厦门市水热型地热系统地球化学特征及成因模式[J].华东地质,2023,44(2):128-140.
LIU Chunlei, LI Yasong, CAO Shengwei, et al. Geochemical characteristics and genetic model of hydro-geothermal system in Xiamen City, Fujian Province[J]. East China Geology, 2023, 44(2): 128-140.
- [6] 何东博,任路,郝杰,等.基于层次分析法的地热资源评价体系研究——以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):713-725.
HE Dongbo, REN Lu, HAO Jie, et al. Quantitative evaluation system of geothermal resources based on analytic hierarchy process: A case study of middle-deep hydrothermal sandstone reservoir in Caofeidian of Hebei Province[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 713-725.
- [7] 郭路,夏岩,段晨阳,等.长庆油田区中深层地热资源储量评价[J].油气藏评价与开发,2023,13(6):749-756.
GUO Lu, XIA Yan, DUAN Chenyang, et al. Evaluation of middle and deep geothermal resources reserves in Changqing Oilfield[J]. Petroleum Reservoir Evaluation and Development, 2023, 13(6): 749-756.
- [8] MUFFLER L J P. Tectonic and hydrologic control of the nature and distribution of geothermal resources[J]. Geo-Heat Center Quarterly Bulletin, 1993, 15(2): 5462134.
- [9] OU J, CHEN L, ZHANG B, et al. The formation mechanism of the typical hot dry rocks in Hunan Province, China[J]. Journal of Geophysics and Engineering, 2022, 19(6): 1246-1264.
- [10] LU Y, DING H, YANG T, et al. Geothermal water exploration of the maoyanhe hot spring scenic spot in Zhangjiajie using the natural electric field frequency selection method[J]. Water, 2023, 15(19): 3418.
- [11] 龙西亭,袁瑞强,皮建高,等.长沙浅层地热能资源调查与评价[J].自然资源学报,2016,31(1):163-176.
LONG Xiting, YUAN Ruiqiang, PI Jianguo, et al. Survey and evaluation of shallow geothermal energy in Changsha[J]. Journal of Natural Resources, 2016, 31(1): 163-176.
- [12] 叶见玲,曾琳,杨汉元.湖南浏山岩体干热岩地质特征及资源潜力[J].地质与勘探,2019,55(5):1287-1293.
YE Jianling, ZENG Lin, YANG Hanyuan. Geological characteristics and resource potential of hot dry rock in the Weishan pluton of Hunan Province[J]. Geology and Exploration, 2019, 55(5): 1287-1293.
- [13] 杜江,蔡宁波,张保健,等.湖南省热水圩地热田干热岩形成的热源机制与成因模式[J].煤田地质与勘探,2024,52(1):70-82.

- DU Jiang, CAI Ningbo, ZHANG Baojian, et al. Heat source-related mechanisms and genetic modes for the formation of hot dry rocks in the Reshuiwei geothermal field, Hunan Province[J]. *Coal Geology & Exploration*, 2024, 52(1): 70–82.
- [14] SUN W D, YANG X Y, FAN W M, et al. Mesozoic large scale magmatism and mineralization in South China: Preface[J]. *Lithos*, 2012, 150: 1–5.
- [15] 周岳强, 许德如, 董国军, 等. 湖南长沙–平江断裂带构造演化及其控矿作用[J]. *东华理工大学学报(自然科学版)*, 2019, 42(3): 201–208.
- ZHOU Yueqiang, XU Deru, DONG Guojun, et al. Structural evolution of the Changsha–Pingjiang fault zone and its controlling on mineralization[J]. *Journal of East China University of Technology (Natural Science)*, 2019, 42(3): 201–208.
- [16] DENG T, XU D, CHI G, et al. Geology, geochronology, geochemistry and ore genesis of the Wangu gold deposit in northeastern Hunan Province, Jiangnan Orogen, South China[J]. *Ore Geology Reviews*, 2017, 88: 619–637.
- [17] 何建军. 长沙市地下热水资源形成条件及潜力研究[D]. 北京: 中国地质大学(北京), 2013.
- HE Jianjun. Research on the formation conditions and potential of geothermal water resources in Changsha city[D]. Beijing: China University of Geosciences, 2013.
- [18] 龙西亭, 皮景, 姚腾飞, 等. 湖南省地下热水资源[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 2019.
- LONG Xiting, PI Jing, YAO Tengfei. Underground hot water resources in Hunan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 2019.
- [19] 蔺文静, 王贵玲, 甘浩男. 华南陆缘火成岩区差异性地壳热结构及地热意义[J]. *地质学报*, 2024, 98(2): 544–557.
- LIN Wenjing, WANG Guiling, GAN Haonan. Differential crustal thermal structure and geothermal significance in the igneous region of southeastern China[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2024, 98(2): 544–557.
- [20] 王贵玲, 蔺文静, 刘峰, 等. 地热系统深部热能聚敛理论及勘查实践[J]. *地质学报*, 2023, 97(3): 639–660.
- WANG Guiling, LIN Wenjing, LIU Feng, et al. Theory and survey practice of deep heat accumulation in geothermal system and exploration practice[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(3): 639–660.
- [21] RYBACH L, BUNTEBARTH G. The variation of heat generation, density and seismic velocity with rock type in the continental lithosphere[J]. *Tectonophysics*, 1984, 103: 335–344.
- [22] 湖南省地质调查院. 中国区域地质志–湖南志[M]. 北京: 地质出版社, 2017: 1–268.
- Geological Survey Institute of Hunan Province. Regional geology of China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2017: 1–268.
- [23] MUNDRY E. Mathematical estimation concerning the cooling of a magnetic intrusion[J]. *Geothermics*, 1970, 2: 662–668.
- [24] 毛小平. 地热田高地温异常成因机理及温度分布特征[J]. *地球学报*, 2018, 39(2): 216–224.
- MAO Xiaoping. Genetic mechanism and distribution characteristics of high temperature anomaly in geothermal field[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2018, 39(2): 216–224.
- [25] 何东博, 任路, 郝杰, 等. 基于层次分析法的地热资源评价体系研究: 以河北省曹妃甸地区中深层水热型砂岩储层为例[J]. *油气藏评价与开发*, 2023, 13(6): 713–725, 740.
- HE Dongbo, REN Lu, HAO Jie, et al. Quantitative evaluation system of geothermal resources based on analytic hierarchy process: A case study of middle–deep hydrothermal sandstone reservoir in Caofeidian of Hebei Province[J]. *Petroleum Reservoir Evaluation and Development*, 2023, 13(6): 713–725, 740.
- [26] 汪新伟, 高楠安, 王婷灏, 等. 河北献县地热田地热异常的分布特征及成因机制[J]. *地质学报*, 2022, 96(7): 2611–2625.
- WANG Xinwei, GAO Nanan, WANG Tinghao, et al. Distribution characteristics and genetic mechanism of the geothermal abnormality in the Xianxian geothermal field, Hebei Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2022, 96(7): 2611–2625.
- [27] ATHENS N D, CAERS J K. A Monte Carlo–based framework for assessing the value of information and development risk in geothermal exploration[J]. *Applied Energy*, 2019, 256: 113932.
- [28] WANG Y, VOSKOV D, DANILIDIS A, et al. Uncertainty quantification in a heterogeneous fluvial sandstone reservoir using GPU–based Monte Carlo simulation[J]. *Geothermics*, 2023, 114: 102773.

(编辑 徐佩)