



移动阅读

万汉平, 谢迎春, 王桥, 等, 2023. 西藏谷露地热田地热资源前景及勘探方向[J]. 沉积与特提斯地质, 43(2): 249–260. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02003

Wan H P, Xie Y C, Wang Q, et al., 2023. The geothermal prospect and exploration direction of Gulu geothermal field in Tibetan Plateau[J]. Sedimentary Geology and Tethyan Geology, 43(2): 249–260. doi: 10.19826/j.cnki.1009-3850.2023.02003

## 西藏谷露地热田地热资源前景及勘探方向

万汉平<sup>1</sup>, 谢迎春<sup>2</sup>, 王桥<sup>3\*</sup>, 郝伟林<sup>1</sup>, 高洪雷<sup>1</sup>

(1. 核工业北京地质研究院, 北京 100029; 2. 中核坤华能源发展有限公司, 浙江 杭州 311100; 3. 中国地质调查局成都地质调查中心(西南地质科技创新中心), 四川 成都 610218)

**摘要:** 西藏亚东-谷露裂谷带是新生代的构造带, 具有构造活跃、地震频繁、热泉广布、大地热流高等特征, 孕育了丰富的地热资源。已实现商业开发多年的羊八井地热田和羊易地热田正是位于亚东-谷露裂谷带的中部, 而位于该构造带北部的谷露地热田地热资源前景和勘探方向还有待深入认识。为此, 本文解析了地表地热构造, 对比了羊八井地热模式, 分析了谷露地热田的深部热动力学背景, 并结合钻井试采资料揭示谷露地热田具有良好的地热资源前景。在此基础上, 利用大地电磁和重力预测了谷露地热田的地热分布具有南北分带性, 即北部和中部具有深部和浅部两个层次的地热储层, 而南部地热储层则以浅部为主。为深入研究亚东-谷露裂谷带的地热系统模式及指导地热勘探开发提供了重要的地球物理依据。

**关键词:** 谷露地热田; 地热资源; 勘探方向; 大地电磁测深; 重力

中图分类号: P314

文献标识码: A

## The geothermal prospect and exploration direction of Gulu geothermal field in Tibetan Plateau

Wan Hanping<sup>1</sup>, Xie Yingchun<sup>2</sup>, Wang Qiao<sup>3\*</sup>, Hao Weilin<sup>1</sup>, Gao Honglei<sup>1</sup>

(1. Beijing research institute of Uranium Geology, Beijing 100029, China; 2. China Nuclear Kunhua Energy Development Co. LTD, Hangzhou 311100, China; 3. Chengdu Center, China Geological Survey (Geosciences Innovation Center of Southwest China), Chengdu 610218, China)

**Abstract:** The Yadong-Gulu rift in Tibet is an active tectonic zone in Cenozoic, characterized by active tectonics, frequent earthquakes, widespread hot springs and high heat flow, and has nurtured abundantly geothermal resources. The Yangbajing geothermal field and Yangyi geothermal field located in the central Yadong-Gulu rift have been commercially developed for decades, while the geothermal prospect and exploration direction in the Gulu geothermal field located in the northern Yadong-Gulu rift need to be furtherly clarified. Therefore, this paper analyzes the surface geothermal geology, discusses the Yangbajing geothermal model, and concludes that the Gulu geothermal field has a good geothermal prospect. The geothermal reservoirs revealed by magnetotelluric and gravity are characteristic of north-south zonation in the Gulu geothermal field. There are deep and shallow geothermal reservoirs in the north and middle of Gulu geothermal field, whereas the geothermal reservoirs in the south are mainly in shallow, which provides important geophysical basis for further understanding the geothermal model of the Yadong-Gulu rift and guiding geothermal

收稿日期: 2022-10-11; 改回日期: 2022-12-28; 责任编辑: 曹华文; 科学编辑: 唐渊

作者简介: 万汉平(1986—), 男, 高级工程师, 主要从事地热勘探及研究, E-mail: whp910@163.com

通讯作者: 王桥(1984—), 男, 高级工程师, 主要从事地球物理勘探及应用研究, E-mail: 540363176@qq.com

资助项目: 中核集团集中研发项目“地热勘查开发利用关键技术研究”(中核科发[2019]419号)资助

exploration of Gulu geothermal filed.

**Key words:** Gulu geothermal filed; Geothermal prospect; Exploration direction; Magnetotelluric; Gravity

## 0 引言

新生代以来,印度板块俯冲至欧亚板块之下,导致了青藏高原的隆升(Yin and Harrison, 2000)和地壳的高热异常(Deng and Tesauero., 2016),在藏南地区形成了较高的大地热流分布(图 1a; Hu et al., 2000, Tao et al., 2008),为藏南地区丰富的地热资源奠定了良好的热源基础。南北向展布的亚东-谷露裂谷带是藏南地区规模最大、构造活跃、地震频繁和热泉广布的伸展型裂谷带,具有良好的地热资源前景(Wu et al., 1998; 吴中海等, 2006; Wang et al., 2020; Bian et al., 2022)。中国仅有的两个已实现商业发电的高温地热田就分布在该构造带的中部,如羊易地热田(装机容量 16 MW)和羊八井地热田(装机容量 25.15 MW)(多吉, 2003; 秦进生, 2003; Guo et al., 2007; 郑克棫和郑帆, 2020)。

西藏的地热资源具有明显的分带性特征(佟伟等, 1981; 王鹏等, 2016),即使同一个裂谷带的南部与北部仍可能存在差别。羊八井地热田至 1977 年开始,已持续发电超过 45 年,包括 3 个热储层,其平均热储温度可达 252℃;该地热田受南北向正断层控制,流体在花岗岩中进行热循环(多吉, 2003)。早期,赵文津等(2003)认为羊八井地热田断裂的交汇位置是热流体运移富集空间;沈敏子(1992)分析了流体的蚀变特征,并讨论了羊八井热水活动的多期演变模式;赵平等(2002)通过热水的化学组分揭示了羊八井地壳熔体有地幔物质的混入。羊八井地热田的地热资源前景与勘探方向已经较为成熟,而谷露地热田还有待深入认识。基于地球化学分析,刘昭等(2014)和张萌等(2014)认为浅层的岩浆房和地表的正断层是控制谷露地热田的高温地热系统的主要因素。前人研究揭示的地质构造、热源、热储以及流体的运移通道等(胡志华等, 2022)对于进一步认识亚东-谷露裂谷带地热系统具有重要的指导意义。然而,与羊八井地热田具有相同大地构造背景的谷露地热田(刘静等, 2009; 赵元艺等, 2010; 张萌等, 2014; 高洪雷等, 2022),是有望继羊八井、羊易地热田之后第三个实现商业化发电的地热田,其地热资源前景与勘探方向是近年来西藏

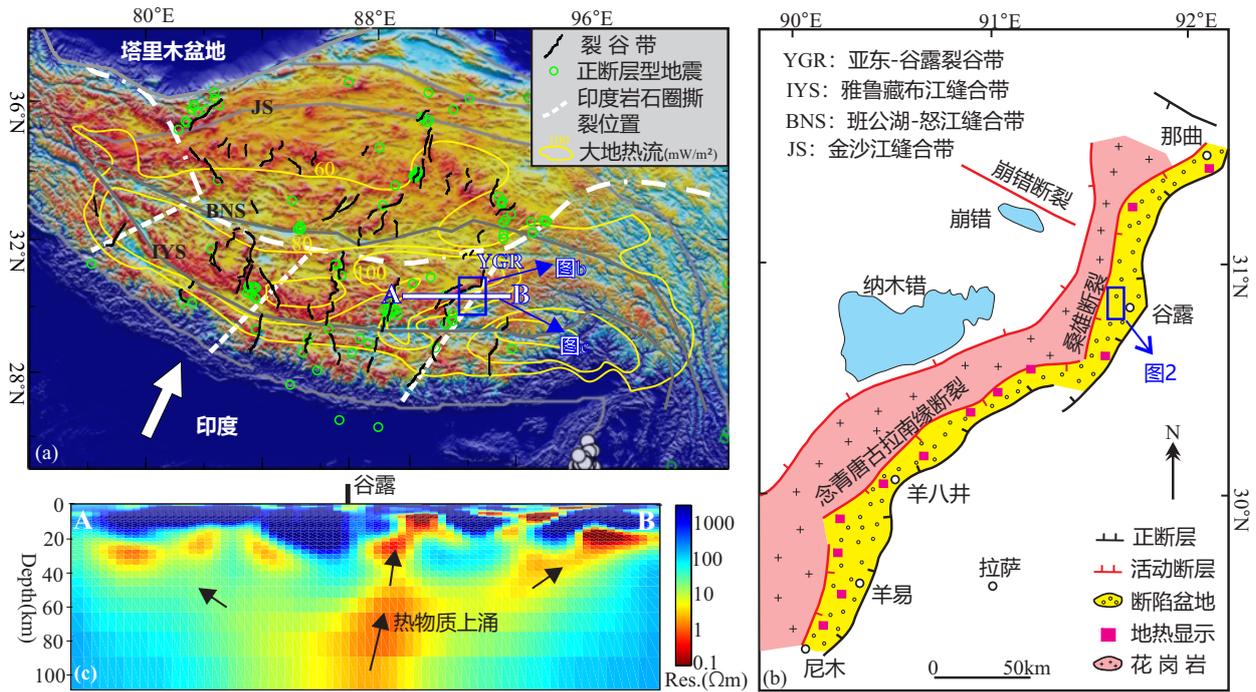
地热研究的热点。

本文基于前人最新的研究资料,梳理了西藏谷露地区的深部热动力背景;通过地质调查解析了地表地热地质条件,对比分析了谷露地热田与羊八井地热田的地热模式,并结合钻孔资料揭示了谷露地热田具有良好的地热资源前景。在此基础上,本文通过大地电磁和重力探测资料认为谷露地热田的地热资源分布具有南北分带性特征,为丰富和完善亚东-谷露裂谷带的地热系统模式以及勘探开发提供了重要的地球物理依据。

## 1 区域深部构造背景

印度-亚欧大陆碰撞形成的青藏高原是全球典型的大陆碰撞造山带之一,先后经历了碰撞聚合、转换和伸展 3 个演化阶段(Yin and Harrison, 2000; 侯增谦等, 2006; 莫宣学, 2010; 潘桂棠等, 2020)。在这一碰撞作用过程中,应力场亦随之发生自挤压到伸展的交替变化,导致青藏高原发生不同程度的构造形变(Tapponnier et al., 2001)。沿东西方向,分布着 3 条规模宏大的断裂带(图 1a):金沙江缝合带、班公湖-怒江缝合带和雅鲁藏布江缝合带,控制了青藏高原的整体构造格局(赵文津等, 2003)。中新世以来,青藏高原南部发生东西向伸展形成数条近南北向地堑(图 1a),称为“藏南裂谷带”,亚东-谷露裂谷规模最大且活动性最显著(Bian et al., 2022)。该裂谷整体呈 NNE 走向,全长近 500 km,其南端起于亚东县北部帕里镇,向北依次穿过藏南拆离系、特提斯喜马拉雅地体、雅鲁藏布江缝合带、拉萨地体,终止于拉萨地体北缘 NWW 走向的崩错断裂,局部发育成一定规模的地堑盆地(刘昭等, 2014)。念青唐古拉断裂和桑雄断裂控制了亚东—谷露裂谷带中新世的火山活动,并且诱发了强烈的现代水热活动,形成了著名的喜马拉雅大型地热带(多吉, 2014),具有高大地热流的谷露地热田正是位于该裂谷带的北侧(图 1b)。

大地热流直接反映了地球内部热动力状态,常与构造、岩浆活动密切相关,是评价地热资源潜力的必要参数(Furlong and Chapman, 1987; Majorowicz and Grasby, 2010)。藏南地区具有高热流值的区域



a. 青藏高原南北向裂谷带与大地热流分布图 (据 Li and Song, 2018; Hu et al., 2000, 修改); b. 亚东-谷露裂谷带地质与地热分布图; c. 亚东-谷露裂谷带壳幔电性结构图 (据 Wang et al., 2017 修改)

图1 西藏亚东-谷露地区区域地质背景图

Fig. 1 Geological map of Yadong-Gulu in the Tibetan

主要集中在雅江缝合带和南北向裂谷带附近,其形成原因与新生代的印度—欧亚板块碰撞密切相关 (Hu et al., 2000; 姜光政等, 2016)。近年来,诸多深部地球物理探测研究发现在谷露地热田的深部上地幔至上地壳范围内存在大量不连续分布的低速体或低阻体(图 1c; Chen et al., 2015; Wang et al., 2017; Wu et al., 2019),可能反应了软流圈热物质通过印度岩石圈板片撕裂窗口上涌(Li and Song, 2018; Wang et al., 2017)。此外,大量正断层型地震也发育在裂谷带附近(图 1a),进一步表明印度岩石圈深部板片正在发生着撕裂(Li and Song, 2018),并引起了深部热物质的上涌,这可能是谷露地热田高大地热流值的起源。然而,地表的地热地质条件很大程度上影响地热流体的分布 (Abiye and Haile, 2008),因此,厘清谷露地热田的地热地质条件是认识该地区地热资源前景的基础。

## 2 谷露地热地质条件

谷露地热田出露的地层主要为中侏罗统马里组( $J_2m$ )和第四系( $Q_4$ )。马里组主要由浅变质石英砂岩、条带状灰岩、砂岩与灰岩互层及凝灰质砂岩

组成(图 2a)。盆地西侧可见花岗闪长岩侵入至马里组中,局部出露规模较小的花岗斑岩体和酸性岩脉,侵入岩时代均为新生代(吴中海等, 2006)。第四系沉积地层底部为花岗闪长岩( $\gamma\delta E_2$ )(刘静等, 2009)。

谷露地热田主要发育 E—W 向、N—S 向和 NE 向三组断裂(图 2a),其中 E—W 向和 N—S 向为区域性断裂构造,NE 向断裂出露于地热田基底花岗岩中。地表地质调查和重力观测资料揭示了断裂  $F_1$ — $F_5$  的展布特征。E-W 向展布的  $F_1$  和  $F_2$  断裂位于谷露地热田南北两侧,相距约 2 km。 $F_1$  断裂全长约 5 km,贯穿整个谷露盆地,沿断裂发育东西向河流,由东向西汇入桑曲。 $F_2$  断裂从泉华台地北侧通过,同样贯穿盆地,向西可一直延伸到念青唐古拉山前,在盆地西侧表现为宽缓的断层槽,南北最宽处约 900 m。

交错发育的断裂是流体运移的重要通道,上述断裂为流体的运移和热能量交换提供了通道(胡志华等, 2022)。例如,  $F_{4,2}$  断层东西两侧存在明显的温度差异,东侧热水活动强烈,发育大量泉华台、热泉及沸泉;同时,断裂东侧的测温井井底温度普

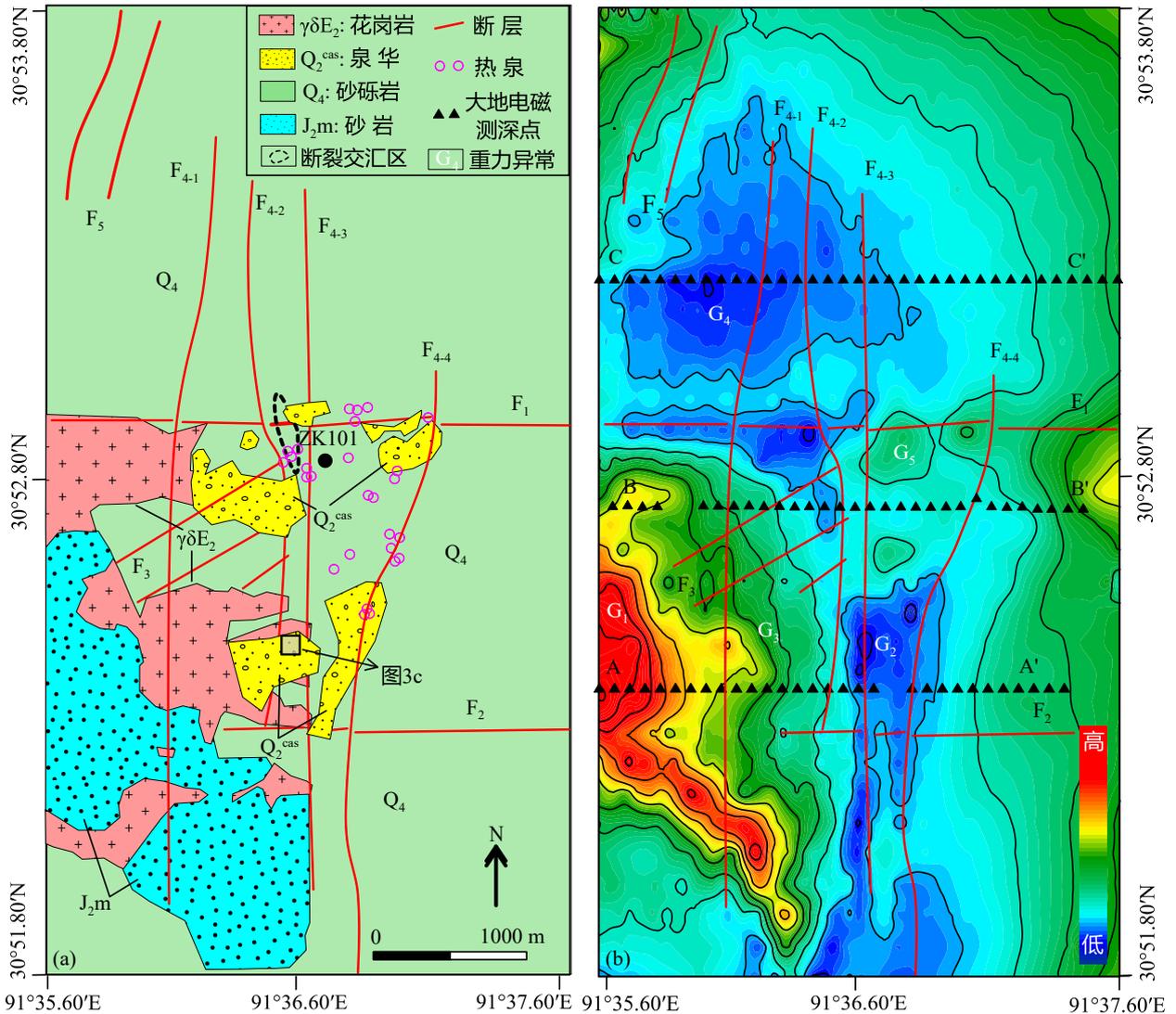


图2 谷露地热田地质简图(a)及重力异常及构造格架图(b);重力资料已脱密

Fig. 2 Geological map of Gulu geothermal field (a) and Map of gravity anomaly and tectonic framework (b)

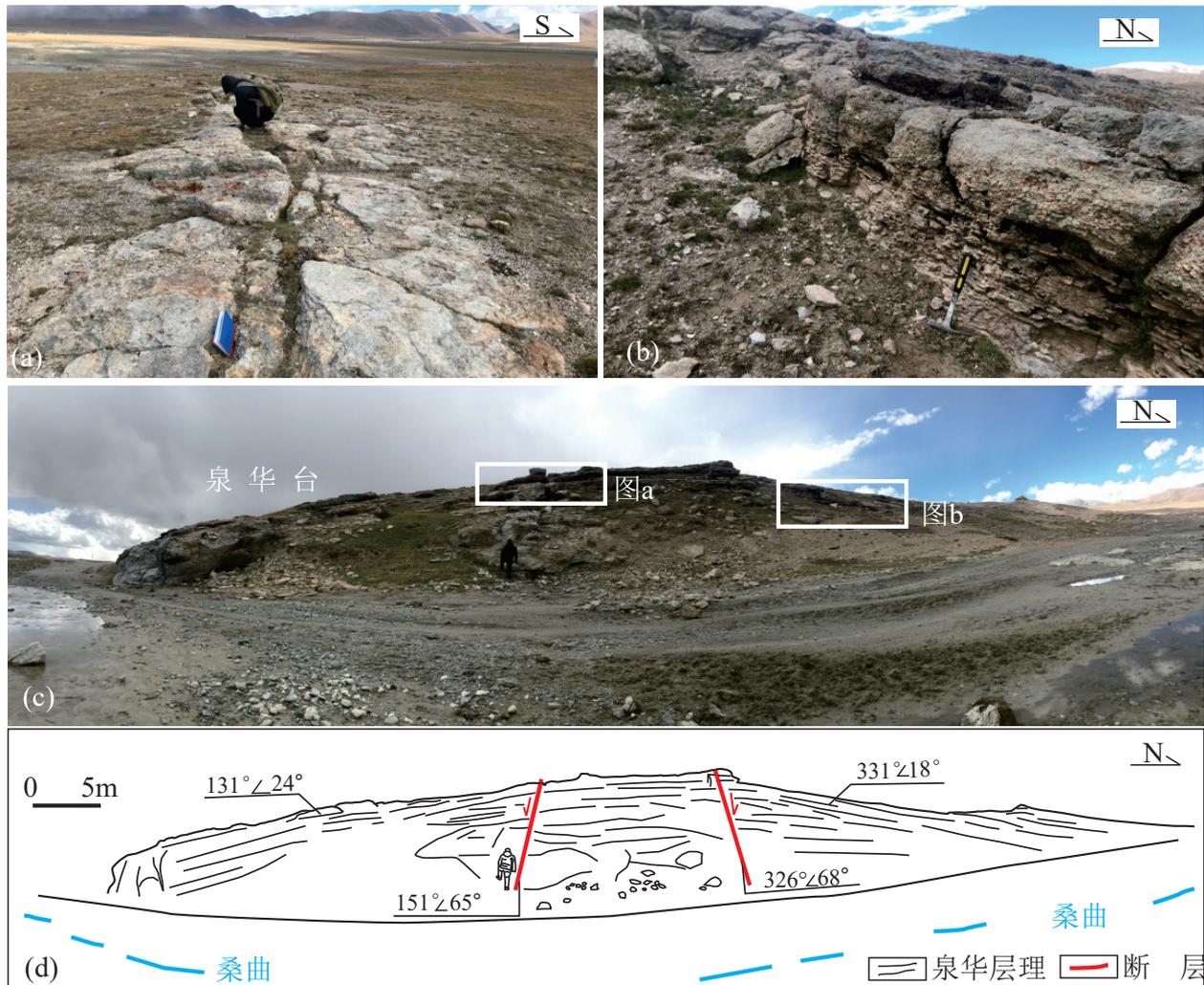
遍较高(约为  $80^{\circ}\text{C}$ ),而西侧测温井的井底温度较低(约为  $30^{\circ}\text{C}$ )。表明该断层东侧是流体热活动相对强烈的地区。 $F_{4.2}$ 断层与 $F_1$ 断层的深部交汇(图2),是引起 $F_{4.2}$ 断层东侧富含大量热流体的主要原因(高洪雷等,2022)。泉华台可见大量溢流沉积形成的层状层理(图3和图4),而这些溢流沉积物是热流体长期活动的结果,表明 $F_{4.2}$ 断层可能是热流体的上升通道。泉胶岩构成了盖层,可以有效的封闭热储(Abiye and Haile, 2008)。长期的热水活动可导致松散的沉积物热蚀变,从而转化为不透水的泉胶岩层,进一步形成封闭的盖层(赵元艺等,2010)。热水的运移由西向东,且井下的温度与泉华的发育厚度呈正相关(高洪雷等,2022)。谷露地热田的浅层钻孔测温显示地下57m的温度最高可

达 $162^{\circ}\text{C}$ 。综上所述,断裂系统、泉胶构造等良好的地热地质条件为探究谷露地热田的资源前景提供了良好的地热地质依据。

### 3 地热资源前景

#### 3.1 谷露与羊八井地热模式的对比

与同一构造带上已经商业开发的地热田对比,有利于进一步认识谷露地热田的资源前景(Guo et al., 2007)。羊八井地热田是陆陆碰撞板块边缘非火山型高温地热田,由浅层热储和深层热储构成(多吉,2003)。来自中上地壳的部分熔融体为其提供了热源,大气降水沿着盆地两侧的张性断裂下潜至深部形成热流体(沈敏子,1992),进一步沿着盆地中部的断裂或次级断裂向上运移(赵文津等,



a.  $F_{4-2}$  断层的次级断裂，热水活动通道；b. 泉华层理；c. 泉华台构造；d. 泉华台构造剖面

图3 谷露地热田泉华台构造特征图

Fig. 3 Structure of sinter platform from Gulu geothermal field

2003), 构成了一个完整的冷热循环系统, 并在盆地中部的地表形成一系列地热泉(图 5b)。具体而言, 浅层热储由第四系和风化壳组成, 深部的热液循环至浅部(180~280 m), 形成了温度达 130~173℃ 的热储; 深层热储包含两个层次, 分别位于 950~1350 m 深度(最高温度约为 260℃)和 1850 m 深度(最高温度约为 330℃), 变质杂岩中发育的断层破裂面为深层裂隙型热储提供了通道, 形成了随着深度显著增大的热储单元(多吉, 2003)。

对比谷露与羊八井地热田(图 5), 二者具有类似的地热系统特征, 如温度, 深度以及深部热源等。其构造位置属于青藏高原南部新生代岩浆活动最为强烈、地震活动最频繁的亚东-谷露裂谷带(吴中海等, 2006)。地震探测和大地电磁测深研究揭示了该构造带岩石圈存在局部低速体(或低阻体), 可

能是印度板块俯冲后撕裂引起的软流圈热物质上涌的结果(图 1c; Wang et al., 2017; Li and Song, 2018)。大气降水作为地热田的主要冷水补给, 沿着盆地两侧的正断层循环至深部形成热流体, 再沿着盆地中部的张性断裂上升至地表(张萌, 2014)。相较于羊八井地热田, 谷露地热田还具有泉华和泉胶结第四系碎屑沉积物构成的地热系统盖层, 将地热封闭于地表; 同时也反映出谷露地热田具有长期的地热流体活动(王鹏等, 2016)。综上所述, 谷露地热田与羊八井具有相似的构造背景及地热系统模式, 预示着谷露地热田也具有良好的地热资源前景。

### 3.2 谷露地热田地热资源前景

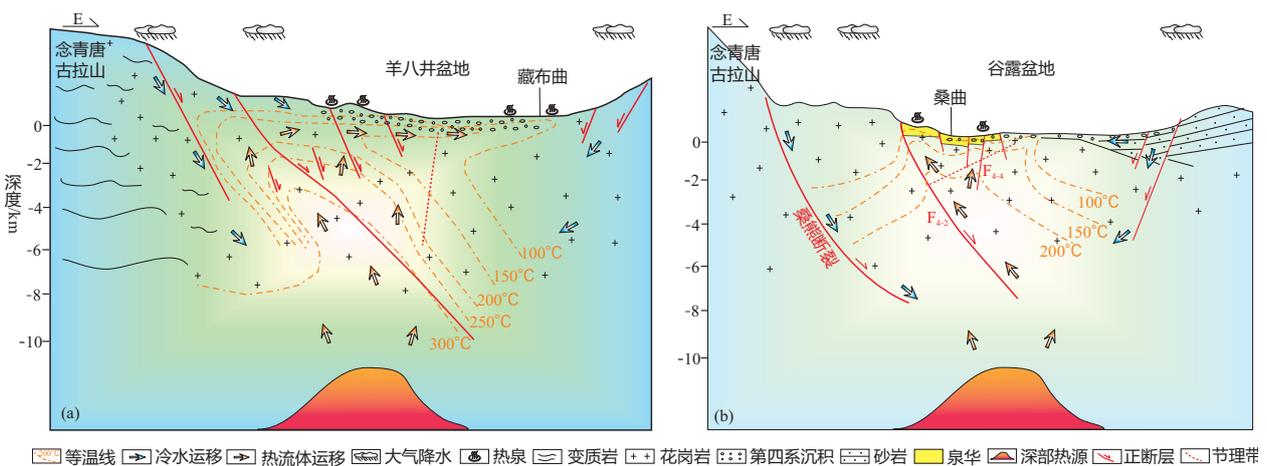
谷露地热田的地表发育了诸多温泉点和泉华台地构造。基于详细地野外调查发现了 42 个温泉点, 且多数为热泉或沸泉, 温度约 23~88℃, 总流



a. 沸泉; b. 热泉; c. 泉胶砾岩; d. 层状硅华

图 4 谷露地热田热泉与泉华示意图

Fig. 4 Hot springs and sinter from Gulu geothermal field



a. 羊八井地热模型 (据多吉, 2003, 修改); b. 谷露地热模型 (据高洪雷等, 2022, 修改)

图 5 谷露与羊八井地热系统模型图

Fig. 5 Models of Gulu and Yangbajing geothermal system

量可达 7.9 L/s, 并伴有浓烈的硫化氢气味(高洪雷等, 2022)。此外, 谷露地热田发育了两级泉华台地,

分别高出了桑曲河面 2~5 m 和 10~30 m。泉华胶结了砾岩与砂岩, 胶结物以硅质为主。泉华台地

的发育表明了该区处于长期的热液活动中。

钻孔揭示的地质现象及测温曲线可以有效反映地热田的资源前景(赵平等, 2002)。钻孔 ZK101 位于谷露盆地的中部, 夹持于两条南北向断裂  $F_{4.1}$  和  $F_{4.2}$  之间。该钻孔在 58 m 以浅为泉华或泉华胶结的砂砾石, 58 m 以下则是花岗闪长岩, 局部发育黑云母二长花岗岩、正长花岗岩、石英脉等。同时, 在该钻孔发现了数十个水热蚀变带以及诸多热储层(图 6a), 表明了谷露地热田深部强烈的地热流体活动。

钻孔测温揭示了 5 个有利的热储层, RC1-RC5 (图 6a), 分布于  $F_{4.2}$  断层的上盘。深度 0 ~ 120 m, 井内的温度梯度较高, 以 72 小时恢复温度曲线来计算, 温度梯度达到了  $67^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ (图 6b), 该段地层示意了由泉华和花岗岩组成的盖层。120 ~ 437 m 代表了热储层, 分布于断裂  $F_{4.2}$  附近的裂隙中, 并主要集中在该断层的上盘。此外, 另一个位于调查区南部切穿了  $F_{4.2}$  断层的钻孔 ZK1301, 其测温结果显示该断层下盘的流体温度明显下降。据此, 本文推断认为热流体可能主要集中在  $F_{4.2}$  断层的上盘。

产能测试直接反映了谷露地热田良好的地热资源前景(Newman et al., 2008)。ZK101 井底最高温度为  $189.4^{\circ}\text{C}$ , 而井口的温度为  $177^{\circ}\text{C}$ , 端压约为

$0.4\text{ Mpa}$ 。根据詹姆斯公式(James, 1975), 计算出汽水总量为  $313\text{ t/h}$ ; 按照 12% 的转换效率计算, 得出可发电潜力为  $8.57\text{ MW}$ 。采用热焓平衡法(Spycher et al., 2014)计算, 参考羊易电厂尾水排放温度为  $60^{\circ}\text{C}$ 、转换效率在 16% 的情况下, 其可发电潜力为  $7.68\text{ MW}$ 。钻孔 ZK101 的产能测试预示了谷露地热田蕴含着巨大的地热资源, 而其勘探方向亟需厘清。

## 4 勘探方向探讨

### 4.1 重力揭示南北部差异性构造背景

重力观测可以揭示花岗岩体和构造分布。谷露地热田的重力异常特征为“两边高, 中部低”, 异常形态特征表现为“北部呈块, 南部呈带, 中部呈过渡”。首先, 谷露盆地两侧具有高的密度, 可能是深部花岗岩逐步出露至地表的反映, 而谷露盆地中部的低密度异常可能与第四系的松散沉积物和近南北走向的断裂  $F_{4.1}$ 、 $F_{4.2}$ 、 $F_{4.3}$  和  $F_{4.4}$  有关。

谷露地热田南部与北部存在显著重力异常差异。谷露盆地南部的重力异常具有分带性特征, 即“两侧高, 中部低”, 西侧的高重力异常  $G_1$ (图 2b) 指示了花岗岩的存在。中部的南北向串珠状低重力异常  $G_2$ , 则与断裂  $F_{4.3}$  和  $F_{4.4}$  具有良好的对应, 重力异常梯度带( $G_3$ )清晰地揭示了断裂  $F_{4.1}$  的存

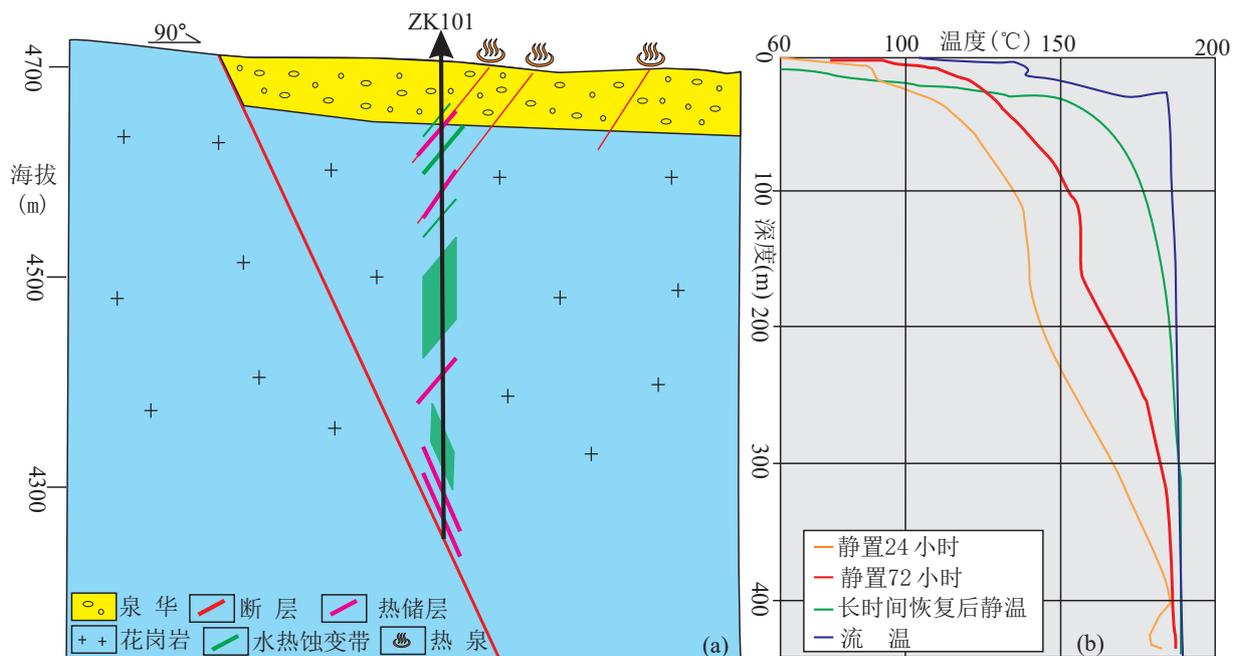


图 6 谷露地热田 ZK101 钻孔地质剖面 (a) 及测温曲线 (b)

Fig. 6 Geological profile (a) and temperature measurement curves (b) of borehole ZK101

在。被大量第四系沉积物覆盖(厚度大于 400 m)的盆地北部,呈现出块状的低密度异常  $G_4$ (胡志华等, 2022);局部为南北向串珠状和东西向串珠状低密度异常,可能暗示了隐伏断层的存在。谷露盆地南北差异性的重力异常反应了其不同的深部构造背景,可能也暗示了其不同的流体分布格局。

谷露盆地中部的东西向断裂协调了南部与北部重力异常的差异性。相较于盆地南部和北部,盆地中部的重力异常具有东西向串珠状重力异常( $G_5$ )特征,该异常带显著不同于盆地南部与北部的异常,它指示了东西向断裂系统  $F_1$  的存在。 $F_1$  断裂可能具有多组东西向的次级断层组合,并具有多期活动性(赵元艺等, 2010)。 $F_1$  断裂分割了谷露地热田南部与北部不同的构造特征。其北部沉积了数百米的第四系沉积物,而南部则仅有数十米(胡志华等, 2022),在如此短的距离之内分布着截然不同厚度的第四系沉积物,可能暗示了东西向  $F_1$  断裂控制着谷露盆地第四系的沉积,即该断裂的北部相对于南部处于长期的沉降。少量第四系沉积的盆地南部,花岗岩和侏罗系砂岩暴露于地表形成了高的重力异常带  $G_1$ ,而北部则是堆积了大量的第四系的松散沉积物,呈现低的重力异常  $G_4$ 。正是由于构造背景的差异性,影响了谷露地热田深-浅不同层次的地热覆存情况,为开展精细深部结构研究指明方向。

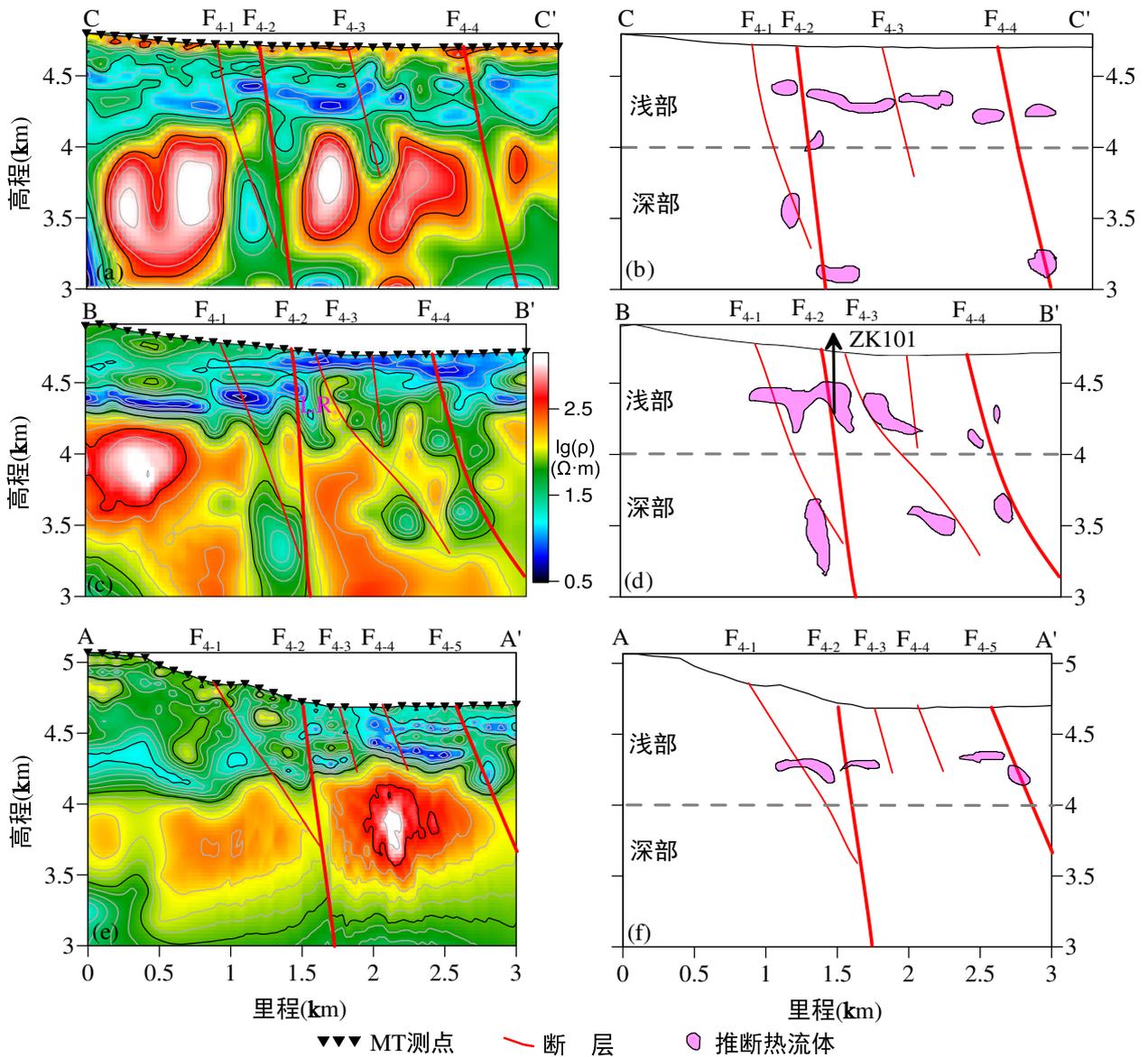
#### 4.2 大地电磁测深揭示断裂构造与流体分布

为了精细厘定断裂以及深部流体分布状态,本文布设了三条大地电磁测深剖面(图 2b), AA'、BB'、CC'剖面分别位于谷露地热田的南部、中部和北部。测点距一般为 100 m,在断层核心区加密到 50 m。观测设备为 V8 多功能电法仪,测量时间约为 8~10 小时,有效观测频率为 10 000~0.1 Hz。通过非线性共轭梯度二维反演(Rodi and Mackie, 2001),本文获得了三条剖面的电性模型(图 7a, c 和 e)。地热系统通常由充满地热流体的断层和裂缝系统组成,它们可能含有高浓度的溶解盐,从而导致岩石基质中存在导电电解质。由流体和电解质组成的地热系统的电阻率一般为  $n \times 10 \Omega \cdot m$ ,花岗岩的电阻率为  $n \times 100 \Omega \cdot m$ ,它们分别在电性模型上呈现为低电阻率和高电阻率异常(Newman et al., 2008; Peacock et al., 2012),这些特征为大地电磁测深资料的解释提供了重要的依据。在此基础上,结合地质资料和区域重力资料,对电性结构模型进行综合

解释,获得了谷露地热田的深部构造展布(图 7b, d 和 f)。

谷露地热田的南部与北部存在显著不同的电性结构特征,即南部的电性结构完整,北部和中部的电性结构破碎,暗示了谷露地热田不同区域具有不同地热背景。谷露地热田的电性结构总体可分为两层,浅部地层电阻率低( $\rho < 30 \Omega \cdot m$ ),深部地层电阻率高( $\rho > 500 \Omega \cdot m$ )。首先,4.2 km 以浅,存在一层明显的低电阻率异常,它们可能代表了富水的花岗岩或断裂破碎带。对于浅层的而言,不同地区含水温度存在显著的差异,可能与断裂是否切穿深部的花岗岩形成热通道有关(郭镜和夏时斌, 2022)。大地电磁方法成像深部流体为低电阻率异常,但并不是所有低电阻率异常表征了热流体(Cumming, 2009),深切断裂附近或者裂隙发育的区域是热流体分布的有利区(Wright et al., 1985),此外羊八井地热田的热流体同样分布在这些区域(多吉, 2003)。结合钻孔 ZK101,认为靠近深切断裂的低电阻率异常带是谷露地热田有利地热储层。其次,在 4.2 km 以下,存在着较为完整的块状高电阻率异常体,局部包含小尺度的低电阻率异常梯度带,高电阻率异常反映了较为完整的花岗岩,而其间包含的局部低电阻率异常则可能是富水的破碎带,该深度的低阻异常带可能是连通深部热源的通道,表明这些局部的低阻异常梯度带可能为有利的地热找水空间(王桥等, 2023)。值得注意的是,位于剖面的北部 240 m 处的钻孔 ZK101,其深部发现的地热异常带也可以延伸至剖面 BB',表明这个低电阻率异常带(LR, 图 7c)规模较大,指示了良好的地热潜力,同时也表明了地热与低电阻率异常具有空间上的耦合性(郭镜等, 2022)。

分布于深切断裂  $F_{4.2}$ 、 $F_{4.4}$  附近的低电阻率异常带与有利的地热分布在空间上具有一致性。地质资料揭示了谷露地热田的基岩主要为花岗岩,这在电性结构剖面中有很好的反映。低阻异常带错断了高阻体,可能是连通深部热源的通道(高洪雷等, 2022)。地表的大气降水会沿着断层破碎带,由浅部运移到深部进行冷热循环(赵平等, 2002)。因此,沿着深切断裂带分布的低阻异常体暗示了良好的地热前景(刘静等, 2009)。例如,  $F_{4.2}$ 、 $F_{4.4}$  断裂可能切穿深部的花岗岩,沿着它们分布的低阻体可能就是有利的地热勘探区域,结合谷露地热田的中部和北部 BB'、CC'剖面,可圈出了有利的热流体



a. CC'剖面的电性结构; b. CC'剖面的综合解释; c. BB'剖面的电性结构; d. BB'剖面的综合解释; e. AA'剖面的电性结构; f. AA'剖面的综合解释;

图7 谷露地热田电性模型及解释模型图

Fig. 7 Electrical models and its interpretation models in the Gulu geothermal field

覆存区(图7b、d和f)。断裂F<sub>4-1</sub>、F<sub>4-3</sub>虽然没有切穿里程3.8 km以下的花岗岩,但沿深部分布的低电阻率异常同样也是有利的地热分布空间。在谷露地热田中部BB'剖面存在一系列高程为4~3.5 km、深度约为0.7~1 km的低电阻率异常带,足够大的深度也是有充分的深部热(刘昭等,2014)。因此,断裂F<sub>4-1</sub>、F<sub>4-3</sub>的地热勘探方向应该选择深部低阻异常带(图7b、d和f)。

谷露地热田地热勘探方向存在南北向差异,中部和北部存在“深—浅”两个层次的地热异常带

(图8)。其中,“深”指的是高程为3.7~3.2 km的地热异常带,“浅”指的是高程为4.5~4.0 km的地热异常带,它们可能是有利的地热勘探方向(图8)。值得注意的是,谷露地热田的北部存在厚度大于400 m的砂砾岩覆盖层,这可能是有利的盖层(高洪雷等,2022),以至于深部的热水运移至浅部,形成浅层循环,且在电性结构上有着良好的显示。谷露地热田北部的浅部地热含水层与羊八井地热田的浅部地热储类似(多吉等,2003),而谷露地热田南部主要为一系列高程位于4.5~4.0 km的

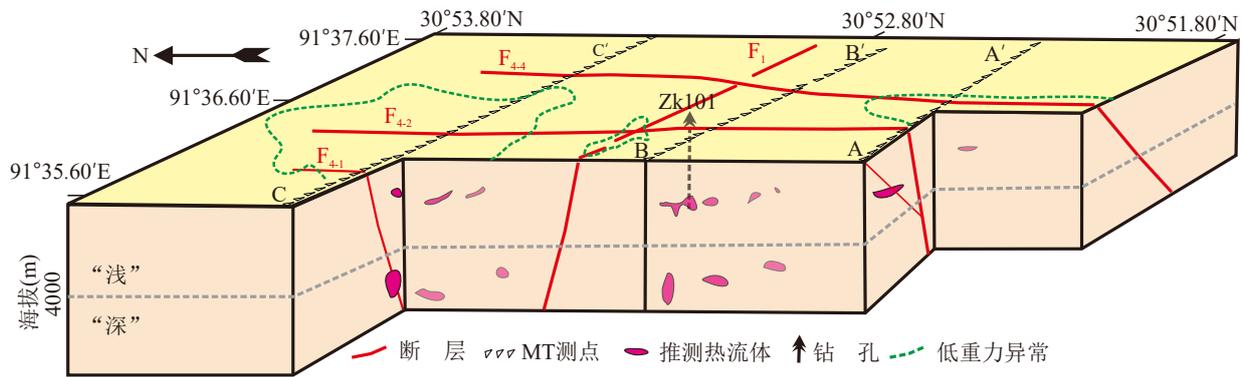


图8 谷露地热田地热勘探方向卡通图

Fig. 8 Cartoon of exploration direction in Gulu geothermal field

“浅”层次地热异常带(图8),主要分布于切穿花岗岩的断裂带附近。

## 5 结论

通过对西藏谷露地热田地表地质研究分析,并结合前人的研究成果,开展了重力和大地电磁测深测深调查,获得了如下认识:

(1) 谷露地热田具有良好的地热资源前景。谷露地热田中北部具有与羊八井类似的地热系统模式;地表发育了大量的热流体构造;交叉发育的断裂系统成为流体运移的通道和储层空间;以及单井的高效地热潜能测试,均预示了谷露地热田具有良好的地热潜能。

(2) 谷露地热田的地热勘探方向具有南北分带性特征。谷露地热田中部和北部是理想的勘探区域,具有“深—浅”两个层次的地热储层,主要分布于切穿深部花岗岩的断裂附近。谷露地热田南部的地热储层可能主要集中在“浅”层次。

## References

- Abiye T A, Haile T, 2008. Geophysical exploration of the Boku geothermal area, Central Ethiopian Rift[J]. *Geothermics*, 37: 586 – 596.
- Bian S, Gong J, Zuza A V, et al., 2022. Along-strike variation in the initiation timing of the north-trending rifts in southern Tibet as revealed from the Yadong-Gulu rift[J]. *Tectonics*, 41: e2021TC007091.
- Chen Y, Li W, Yuan X, et al., 2015. Tearing of the Indian lithospheric slab beneath southern Tibet revealed by SKS-wave splitting measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 413: 13 – 24.
- Cumming W, 2009. Geothermal resource conceptual models using surface exploration data[C]. In: proceedings, 34th workshop on geothermal reservoir engineering, Stanford University, SGP-TR-187: 1 – 6.
- Deng Y, Tesauro M, 2016. Lithospheric strength variations in Mainland China: Tectonic implications[J]. *Tectonics*, 35: 2313 – 2333.
- Dorji, 2014. "Geothermal Museum" on the Roof of the World in Yangbajing[J]. *Science popularization and culture of land resources*, 1: 12 – 17 (in Chinese with English abstract).
- Dorji, 2003. The basic characteristics of the Yangbajing geothermal field—A typical high-temperature geothermal system[J]. *China engineering science*, 5 (1) : 42 – 47 (in Chinese with English abstract).
- Furlong K P, Chapman D S, 1987. Thermal state of the lithosphere[J]. *Reviews of Geophysics*, 25 (6) : 1255 – 1264.
- Gao H, Hu Z, Wan H, et al., 2022. characteristics of geothermal geology of the Gulu geothermal field in Tibet[J]. *Earth Science*, 48 (3) : 1014 – 1029.
- Guo J, Xia S B, 2022. Spatial carrier of geothermal system in eastern Sichuan fold zone—interconnected fault system: A case study of geothermal well Moujia Town, Guangan, Sichuan[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 42 (2) : 642 – 652.
- Guo J, Tang F W, Guan H, et al., 2022. The structure–thermal coupling model of the high temperature geothermal system in Rujiao on the Tibet Plateau[J/OL]. *Geology in China*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220919.1606.002.html>.
- Guo Q H, Wang Y, Wei L, 2007. Major hydrogeochemical processes in the two reservoirs of the Yangbajing geothermal field, Tibet, China[J]. *Journal of Volcanology & Geothermal Research*, 166 (3–4) : 255 – 268.
- Hou Z Q, Mo X X, Gao Y F, et al., 2006. Early Processes and Tectonic Model for the Indian—Asian Continental Collision: Evidence from the Cenozoic Gangdese Igneous Rocks in Tibet[J]. *Acta Geologica Sinica*, 80 (9) : 1233 – 1248 (in Chinese with English abstract).
- Hu S B, He L, Wang J, 2000. Heat flow in the continental area of China: a new data set[J]. *Earth & Planetary Science Letters*, 179 (2) : 407 – 419.

- Hu Z H, Gao H L, Wan H P, 2022. Temporal and spatial evolution of hydrothermal alteration in the Yangbajing Geothermal Field, Xizang (Tibet) [J]. *Geological Review*, 68 (1) : 359 – 374 (in Chinese with English abstract).
- Jiang G Z, Gao P, Rao S, et al., 2016. Compilation of heat flow data in the continental area of China (4<sup>th</sup> edition) [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 59 (8) : 2892 – 2910 (in Chinese with English abstract).
- James R, 1975. Rapid estimation of electric power potential of discharging geothermal Wells[J]. 176 (26) : 7 – 11.
- Li J T, Song X D, 2018. Tearing of Indian mantle lithosphere from high-resolution seismic images and its implications for lithosphere coupling in southern Tibet[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 115 (33) : 8296 – 8300 .
- Liu J, Shen X H, Meng K, 2009. Preliminary study on late Quaternary activity of faults in the western margin of Gulu Basin[J]. *Earthquake*, 29 (3) : 45 – 53 (in Chinese with English abstract).
- Liu Z, Lin W, Zhang M, et al., 2014. Origin of geothermal fluid and contribution of mantle source in Nimu-Nagqu, Tibet[J]. *Earth Science Frontiers*, 21 (6) : 356 – 371 (in Chinese with English abstract).
- Majorowicz J, Grasby S, 2010. Heat flow , depth –temperature variations and stored thermal energy for enhanced geothermal systems in Canada[J]. *Journal of Geophysical Engineering*, 7 (3) : 232 – 241 .
- Mo X X, 2010. A review and prospect of geological researches on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Geology in China*, 37 (4) : 841 – 853 (in Chinese with English abstract).
- Newman G, Gasperikova E, Hoversten G, et al., 2008. Three-dimensional magnetotelluric characterization of the Coso geothermal field. *Geothermics*, 37: 369 – 399.
- Pan G T, Wang L Q, Geng Q R, et al., 2020. Space-time structure of the Bangonghu–Shuanghu–Nuijiang–Changning–Menglian Mega-suture zone: A discussion on geology and evolution of the Tethys Ocean. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, 40 (3) : 1 – 19.
- Peacock J R, Thiel S, Reid P, et al., 2012. Magnetotelluric monitoring of a fluid injection: Example from an enhanced geothermal system[J]. *Geophysical Research Letters*, 39(L18403) : 1 – 5.
- Qin J S, 2003. Hydrothermal alteration and evaluation in Yangyi geothermal field[J]. *Journal of Taiyuan University of Technology*, 34 (2) : 161 – 165 (in Chinese with English abstract).
- Rodi W, Mackie R L, 2001. Nonlinear conjugate gradients algorithm for 2-D magnetotelluric inversion[J]. *Geophysics*, 66, 174 – 187.
- Shen M, 1992. Evolution and model of Yangbajing hydrothermal system[C]// International Symposium on High Temperature Geothermal Development and Utilization in Tibet, China, 95 – 98.
- Spycher N, Peiffer L, Sonnenthal G L, et al., 2014. Integrated multicomponent solute geothermometry[J]. *Geothermics*, 51: 113 – 123 .
- Tao W, Shen Z K, 2008. Heat flow distribution in Chinese continent and its adjacent areas[J]. *Progress in Natural Science*, 18: 843 – 846.
- Tapponnier P, Xu Z Q, Roger F, et al., 2001. Oblique Stepwise Rise and Growth of the Tibet Plateau[J]. *Science*, 294: 1671 – 1677 .
- Tong W, Zhang T M, Zhang Z F, et al., 1981. Geotherm in Tibet[M], Beijing: Science press, 1 – 128.
- Wang Q, Yang J, Tang F W, et al., 2021. Audio magnetotelluric detection of hidden karst in deep carbonate coverage area: A case study of Dagan area in Yunnan province, China[J]. *Sedimentary Geology and Tethyan Geology*, <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08002>.
- Wang P, Chen X H, Shen L C, et al., 2016. Reservoir temperature of geothermal anomaly area and its environmental effect in Tibet[J]. *Geology in China*, 43 (4) : 1429 – 1438 (in Chinese with English abstract).
- Wang G, Wei W B, Ye G F, et al., 2017. 3-D electrical structure across the Yadong-Gulu rift revealed by magnetotelluric data: New insights on the extension of the upper crust and the geometry of the underthrusting Indian lithospheric slab in southern Tibet[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 474: 172 – 179 .
- Wang S, Chevalier M L, Pan J, et al., 2020. Late Quaternary activity of the southern Yadong-Gulu rift, southern Tibet[J]. *Tectonophysics*, 790: 228545 .
- Wu C D, Nelson K D, Wortman G, et al., 1998. Yadong cross structure and South Tibetan Detachment in the east central Himalaya (89°–90°E) [J]. *Tectonics*, 17 (1) : 28 – 45 .
- Wu C L, Tian X B, Xu T, et al., 2019. Deformation of crust and upper mantle in central Tibet caused by the northward subduction and slab tearing of the Indian lithosphere: New evidence based on shear wave splitting measurements[J]. *Earth and Planetary Science Letters*, 514: 75 – 83 .
- Wu Z, Zhao X, Wu Z, et al., 2006. Quaternary geology and faulting in the Damxung-Yangbajain basin, southern Tibet[J]. *Journal of Geomechanics*, 12 (3) : 3005 – 315.
- Wright P M, Ward S H, Ross H P, et al., 1985. State of the art geophysical exploration for geothermal resources[J]. *Geophysics*, 50: 2666 – 2696 .
- Yin A, Harrison T, 2000. Geologic evolution of the Himalayan - Tibetan orogen[J]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 28: 211 – 280 .
- Zhang M, Lin W, Liu Z, et al., 2014. Hydrogeochemical characteristics and genetic model of Gulu high-temperature geothermal system in Tibet[J]. *Journal of Chengdu University of Technology (Science and Technology Edition)*, 41 (3) : 382 – 392.
- Zhao P, Xie E J, Dorji, et al., 2002. Geochemical characteristics and geological significance of geothermal gases in Tibet[J]. *Acta Petrology. Sinica*, 18 (4) : 539 – 550 (in Chinese with English abstract).
- Zhao W J, Jiang W, Wu Z H, et al., 2003. Investigation and

mechanism of tectonic-seismic-geothermal relationship in deep Yangbajing, Xizang Province[J]. Chinese Academy of Geological Sciences: 95–97 (in Chinese with English abstract).

- Zhao Y Y, Zhao X T, Ma Z B, et al., 2010. Chronology and significance of Gulu geothermal spring type cesium deposit in Xizang Province[J]. *Acta Geologica Sinica*, 84 (2) : 211–220 (in Chinese with English abstract).
- Zheng K Y, Zheng F, 2020. Discussion on the prospect of geothermal power industry in China[J]. *China and Foreign Energy*, 25 (11) : 17–23 (in Chinese with English abstract).
- ### 附中文参考文献
- 多吉, 2014. 羊八井世界屋脊上的“地热博物馆”[J]. *国土资源科普与文化*, 1: 12–17.
- 多吉, 2003. 典型高温地热系统-羊八井热田基本特征[J]. *中国工程科学*, 5 (1) : 42–47.
- 高洪雷, 胡志华, 万汉平, 等, 2023. 西藏谷露地热田地热地质特征[J]. *地球科学*, 48 (3) : 1014–1029.
- 郭镜, 夏时斌, 2022. 川东褶皱带地热系统的空间载体——相互连通的断裂系统: 以四川广安牟家镇地热井为例[J]. *沉积与特提斯地质*, 42 (4) : 642–652.
- 郭镜, 唐发伟, 官辉, 等, 2022. 青藏高原如角高温地热系统构造-热耦合成热模式[J/OL]. *中国地质*, <https://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1167.P.20220919.1606.002.html>.
- 侯增谦, 莫宣学, 高永丰, 等, 2006. 印度大陆与亚洲大陆早期碰撞过程与动力学模型: 来自西藏冈底斯新生代火成岩证据[J]. *地质学报*, 80 (9) : 1233–1248.
- 胡志华, 高洪雷, 万汉平, 等, 2022. 西藏羊八井地热田水热蚀变的时空演化特征[J]. *地质论评*, 68 (1) : 359–374.
- 姜光政, 高翔, 饶松, 等, 2016. 中国大陆地区大地热流数据汇编(第四版)[J]. *地球物理学报*, 59 (8) : 2892–2910.
- 刘静, 申旭辉, 孟恺, 等, 2009. 谷露盆地西缘断裂晚第四纪活动初步研究[J]. *地震*, 29 (3) : 45–53.
- 刘昭, 蔺文静, 张萌, 等, 2014. 西藏尼木—那曲地热流体成因及幔源流体贡献[J]. *地学前缘*, 21 (6) : 356–371.
- 莫宣学, 2010. 青藏高原地质研究的回顾与展望[J]. *中国地质*, 37 (4) : 841–853.
- 潘桂棠, 王立全, 耿全如, 等, 2020. 班公湖—双湖—怒江—昌宁—孟连对接带时空结构——特提斯大洋地质及演化问题[J]. *沉积与特提斯地质*, 40 (3) : 1–19.
- 秦进生, 2003. 西藏羊易地热田的水热蚀变及地热地质意义[J]. *太原理工大学学报*, 34 (2) : 161–165.
- 沈敏子, 1992. 羊八井水热系统的演变和热田模式[C]//中国西藏高温地热开发利用国际研讨会论文集, 95–98.
- 佟伟, 章铭陶, 张知非, 等, 1981. 西藏地热[M]. 北京: 科学出版社, 1–128.
- 王桥, 杨剑, 唐发伟, 等, 2023. 碳酸盐岩深覆盖区隐伏岩溶构造的音频大地电磁测深探测——以云南大关地区为例[J]. *沉积与特提斯地质*. <https://doi.org/10.19826/j.cnki.1009-3850.2021.08002>.
- 王鹏, 陈晓宏, 沈立成, 等, 2016. 西藏地热异常区热储温度及其地质环境效应[J]. *中国地质*, 43 (4) : 1429–1438.
- 吴中海, 赵希涛, 吴珍汉, 等, 2006. 西藏当雄—羊八井盆地的第四纪地质与断裂活动研究[J]. *地质力学学报*, 12 (3) : 305–315.
- 张萌, 蔺文静, 刘昭, 等, 2014. 西藏谷露高温地热系统水文地球化学特征及成因模式. *成都理工大学学报(自然科学版)* [J], 41 (3) : 382–392.
- 赵平, 谢鄂军, 多吉, 等, 2002. 西藏地热气体的地球化学特征及其地质意义[J]. *岩石学报*, 18 (4) : 539–550.
- 赵文津, 江万, 吴珍汉, 等, 2003. 西藏羊八井深部构造-地震-地热关系及机理调查研究[J]. *中国地质科学院*: 95–97.
- 赵元艺, 赵希涛, 马志邦, 等, 2010. 西藏谷露热泉型铀矿床年代学及意义[J]. *地质学报*, 84 (2) : 211–220.
- 郑克棣, 郑帆, 2020. 中国地热发电产业前景探讨[J]. *中外能源*, 25 (11) : 17–23.