

李传伟, 王宇, 曾威, 等. 红河流域元古界大红山群变质岩系的热储结构及热流特征[J]. 中国岩溶, 2022, 41(3): 384-394.

DOI: 10.11932/karst20220306

红河流域元古界大红山群变质岩系的热储结构及热流特征

李传伟¹, 王 宇², 曾 威¹, 王家兴¹, 庄海俊¹

(1. 西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司, 云南昆明 650051;

2. 云南省地质调查局, 云南昆明 650051)

摘 要: 经过地热地质调查、物探验证和分析论证, 在红河流域中段的戛洒盆地古元古界大红山群变质岩系中钻探获得了可供开发利用的热矿水。勘探孔深 2 200.71 m, 大红山群第 4 至第 5 段(Pt₁dhs⁴⁻⁵)热储层富水性强, 钻孔涌水量 1 089 m³·d⁻¹, 孔底测温 84.3 ℃, 地热水矿化度 9 777 mg·L⁻¹, 水化学类型为 Cl-Na 型, 水化学成分复杂。此次成功的勘探研究, 揭示了大红山变质岩系的热储特征及地热资源潜力, 拓展了地热水勘探开发的新领域。综合研究认为, 大红山群变质岩系中的硬脆性大理岩、石英片岩、火成岩等热储层(带)、导热导水的深大断裂及上覆隔水隔热的三叠系红层等盖层, 构成了较为典型的带状热储。热储层赋存承压地热水, 主要由地下水在重力和热力作用下, 沿区域深大断裂带的主干和次级导热导水断裂作深循环逐渐增温和对流运动所形成, 实测地热增温率为 3.0 ℃·(100 m)⁻¹。

关键词: 地热地质; 地下热水; 热储结构; 热流特征; 热水循环; 红河流域

中图分类号: P314 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810 (2022) 03-0384-11 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引 言

研究区主要为红河中游的古元古界大红山群地层分布区^[1-3]。既有地热勘查及研究文献显示, 研究区及周围区域过往的地热资源勘查与科研主要集中于滇藏地热带、扬子准地台及周边深大断裂影响带^[4-8], 高原断陷盆地区的研究程度最高^[9-12]。地热勘查研究和开发的热储层则主要集中在震旦系、古生界碳酸盐岩地层, 个别点涉及到的最古老地层层位为中元古界昆阳群浅变质碳酸盐岩地层, 相应的开发利用程度也以这些地区和层位为主, 很多地区因钻井密集, 开采影响强烈, 出现了历史名泉干涸、地

热田水位大幅度持续下降、水质明显变化等问题。亟待寻找更深层次的新热储层及地热资源, 以满足经济发展的强烈需求。而红河流域古元古界大红山群变质岩系的热储结构及热流特征研究尚无文选报道, 钻探试验揭示和验证仍是空白。西南有色昆明勘测设计(院)股份有限公司此次在新平县戛洒镇经精心调查论证, 钻获满足开发利用要求的深层地热水, 实现了新的突破, 揭示了古元古界大红山变质岩系的热储特征及地热资源潜力, 为地热资源勘查评价和开发利用提供了确切的地质科学依据。就开展系统、深入的研究总结, 对于边疆少数民族地区而言, 经济、社会、生态环境和学术意义重大^[13]。

基金项目: 云南省有色地质局产业发展专项资金(2022); 戛洒外滩酒店建设项目地热勘探与开发工程

第一作者简介: 李传伟(1970—), 男, 高级工程师, 主要从事水工环地质勘查研究。E-mail: 523280885@qq.com。

通信作者: 王宇(1960—), 男, 博士, 正高级工程师, 主要从事水工环地质调查研究。E-mail: ynddywy@163.com。

收稿日期: 2022-01-01

1 区域地理地质背景

1.1 自然地理概况

研究区位于滇南新平县戛洒河谷盆地(图 1), 盆地面积 11.65 km^2 , 盆地外围山区海拔 $700 \sim 2\,700 \text{ m}$, 沉积平坝区海拔 $500 \sim 700 \text{ m}$ 。沿戛洒江发育有 2 级阶地, 阶面平坦, 盆缘山间沟口有洪积扇展布, 盆地两侧洪积扇发育很不对称, 东面单个分布, 西面连成裙状。地热勘探孔位于 I 级阶地, 南恩河与戛洒江汇合处附近。

1.2 地层岩性

研究区地层主要为新生界、中生界和元古界地层,在大红山群分布区有辉长岩伴生(图 2)。各时代地层岩性及水文地质特征详见表 1。

大红山群属于古元古代,为一套海相火山喷发—沉积变质岩系,出露于绿汁江断裂以西的新平县戛洒-老厂-大红山一带、腰街漠沙等地,以及绿汁江断裂以东的元江县岔河、摄科、罗底、牛尾巴冲、石屏热水塘、东家域、东川县小溜口等地。在研究区,这一古老的变质岩系在上三叠统盖层中呈“天窗”出露于戛洒江河谷两岸。自下而上分为:①老厂河岩组,主要为石英片岩、大理岩,厚 1 284 m;②曼岗

河岩组, 为火山岩、大理岩, 炭质片岩, 厚 740 m; ③红山岩组, 主要为火山岩, 厚 319 m; ④肥味河岩组, 为白云石大理岩, 上部为炭质板岩, 下部夹变辉长辉绿岩, 底部 3 m 为含铜炭质板岩, 是含铜层位, 厚 254 m; ⑤坡头岩组, 为炭质条带片岩、白云质大理岩、炭质板岩, 厚 577 m。变质程度属高绿片岩相。红山岩组 U—Pb 年龄 17.3 亿年。

1.3 地质构造

红河断裂带是一条深大断裂带,为扬子地台与印支地块间的边界构造带,主干断裂北西端起自南涧西部,呈 NW—NE 走向,南延至河口附近进入越南,是一条斜贯云南中、南部的弧形断裂带^[15-16]。由一系列的次级断裂呈束状构成,沿断裂带发育有大量构造岩、挤压条带、揉皱、破碎带、透镜体带和各种颜色的断层泥^[2, 17]。研究区处于红河断裂带中段,地质构造复杂, NNE 向断裂带和近 NS 向断裂带为主体构造(图 2)。

1.4 新构造运动

研究区由红河断裂主导的新构造运动强烈,根据已有调查研究资料归纳,主要表现为:

红河断裂带及毗邻地区地壳强烈抬升,广大地区遭受侵蚀和夷平,形成广泛存在的山顶夷平面。大

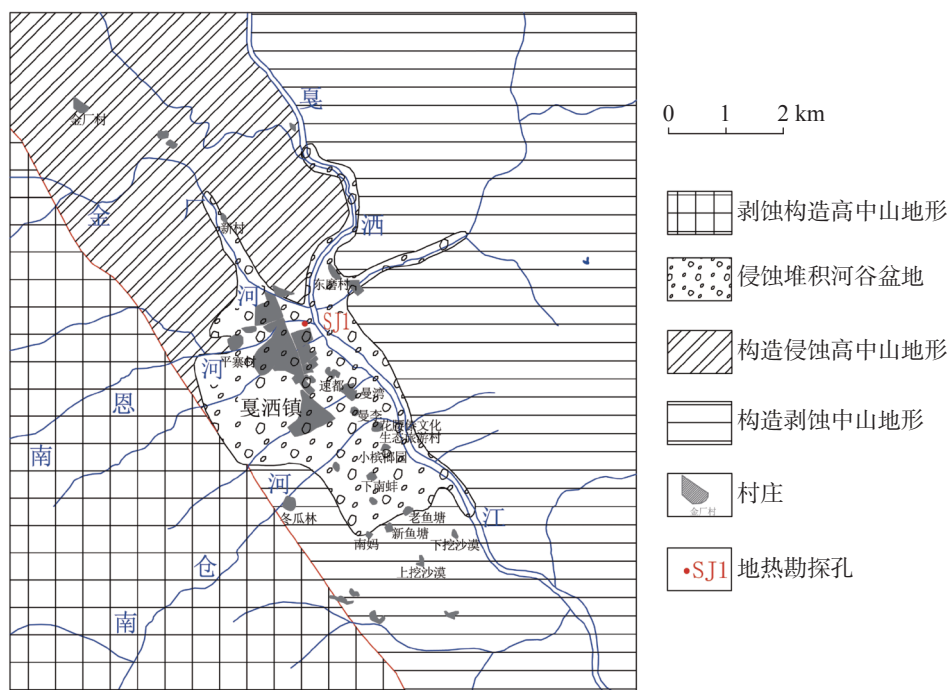


图 1 研究区地形地貌及水系图

Fig. 1 Topographic and water system map of the study area

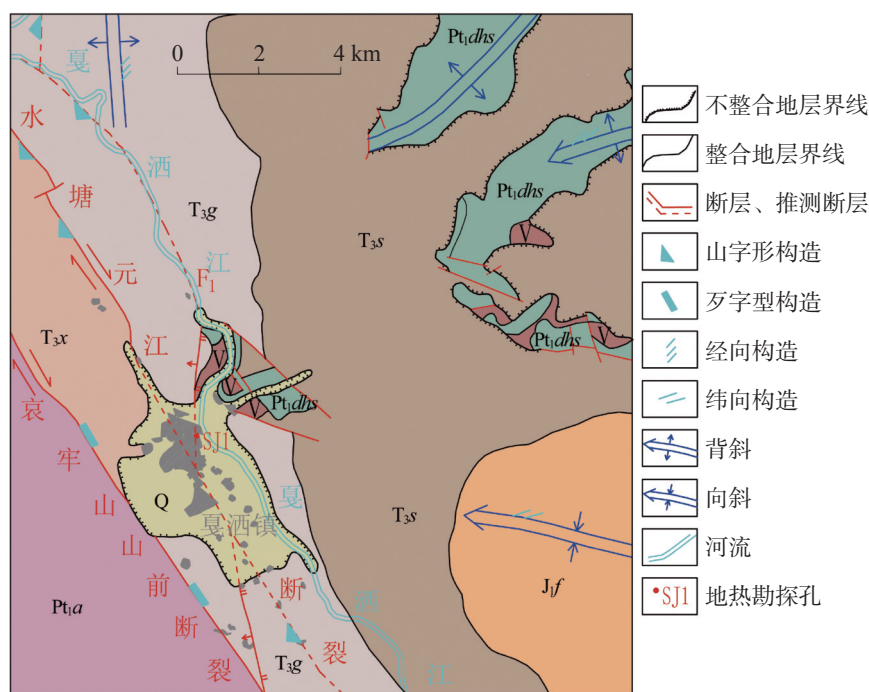


图2 区域地热地质图

Fig. 2 Regional geothermal geological map

面积掀斜运动明显,与整个川滇地区掀斜运动的规律一致,夷平面由西北向东南逐级倾斜。断裂新活动和断裂裂陷作用间歇性持续进行。断裂带两侧块体产生了明显的差异运动,断裂西南侧块体抬升,东北侧块体相对下降。古近纪以来,红河断裂早期以强烈挤压、逆冲兼左旋运动为主,而从上新世以来,受到青藏高原强烈隆升和川滇菱形块体挤压的影响,转换为右旋走滑运动^[18-19]。现今断裂运动速率约为 $0.82 \text{ mm} \cdot \text{a}^{-1}$,运动速率分级为 B 级^[2]。红河断裂强烈的新构造运动,致使新生界地层产生强烈的构造变形和破裂,岩层发生陡立和倒转,各种构造形迹非常发育。

2 区域地热地质特征

2.1 地热显示

根据云南省地质环境监测院编绘的云南省大地热流值区划图(图3,数据来源于中国大地热流数据库),研究区所处区域大地热流值为 $73.7 \text{ mW} \cdot \text{m}^{-2}$ 。在全省处于中等水平,沿红河断裂带温泉分布相对稀疏^[20-22],水温一般为 $25 \sim 40 \text{ }^{\circ}\text{C}$,反映出现今断裂活动以蠕滑运动为主、活动性相对于较弱的点^[23-24]。

2.2 变质岩储热和隔热层

沿红河断裂带附近,钻探揭露的大红山群(Pt_1dhs)变质岩系地层为白云石大理岩和片岩,由于断裂的持续活动,形成了导水裂隙带,在构造裂隙水的循环作用下,大理岩形成了岩溶裂隙热储层。红河断裂带小断裂十分发育,裂隙率一般为 $3\% \sim 12\%$,列宽 $1 \sim 40 \text{ cm}$,热储储于断裂破碎带,成为带状热储。

戛洒河谷盆地内上覆第四系松散层和三叠系碎屑岩层以及与白云石大理岩交替互层状相间分布的片岩主要为软质柔性岩层,渗透性差,岩石热导率低之 $2.4 \sim 2.6 \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$,构造裂隙闭合性好,使该岩层成为很好的隔水层,厚度大于 500 m ,是热田的主要盖层。破碎带物质多为压碎岩、强烈片理化和糜棱岩化的粉碎性构造岩、断层泥,透水性和含水性差。均为相对隔水隔热层,有利于白云石大理岩热储层内地热水的增温保温。

2.3 断裂的导水性及变化

红河断裂经历了多期挤压和剪切运动,断层岩带主要表现出阻水的性质。但在一盘或两盘为脆性岩层(体)的旁侧裂隙发育带、与红河断裂相交的分支断裂带上出露泉点依然较多,存在碳酸盐岩的地段流量较大(表2),透水性和导水性均较强。而在一

表 1 区域地层简表
Table 1 Brief table of regional strata

界	系	统	组	段	代号	厚度/m	地层岩性及水文地质特征	分布特征
新生界	第四系	全新统			Q_p	181.4	砂质黏土,下部为砂砾石层,砂砾石层厚23.6 m,富水性弱。	分布于戛洒盆地。
			侏罗系	下统	J_{jf}	1 085	泥质岩、粉砂岩、细砂岩不等厚互层。地下径流模数 $<0.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$,泉流量 $<0.1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,矿化度 $<0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$,富水性弱。	分布于戛洒盆地东部。
中生界					T_{3s}	444~758	泥岩夹砂岩、泥灰岩、长石石英砂岩夹泥岩、粉砂岩。裂隙率1%~2%,地下径流模数 $0.5\sim 1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$,泉流量 $0.1\sim 0.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 、 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Na}$ 型水,矿化度 $<0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。	盆地东侧大面积出露,盆地内没有该层分布。
					T_{3g}	347~1 665	页岩、含砾页岩和炭质页岩,地下径流模数 $<0.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$,泉流量 $<0.1\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型水,矿化度 $<0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。	戛洒盆地南侧、北侧大面积出露,东侧条带状出露,钻探揭露视厚度为347 m。
					T_{3x}	$>1\ 832$	泥岩、页岩、长石石英砂岩夹煤层,平均地下径流模数 $0.529\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{km}^{-2}$,泉流量 $0.1\sim 0.5\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$ 。为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$ 型水,矿化度 $<0.5\text{ g}\cdot\text{L}^{-1}$ 。	戛洒盆地外围西北侧大面积分布。
					Pt_{1dhs}	$>1\ 590$	炭质白云石大理岩、细纹状二云石英炭质板岩、炭质钠长石英岩、炭质石英岩夹炭质板岩,炭质大理岩及炭质绢云片岩、深灰色石榴二云片岩、石英白云石大理岩夹炭质板岩、白云石大理岩,富水性较强。	仅戛洒盆地外围东北侧小面积出露。
古元古界					Pt_{1a}	$>2\ 250$	大理岩、透辉角闪斜长变粒岩、石榴角闪斜长片麻岩、斜长角闪岩、砂线黑云(或二云)二长片麻岩、黑云斜长片麻岩、钾长方柱透辉岩、含石墨电气黑云斜长变粒岩、石榴黑云斜长片麻岩、变粒岩夹砂线黑云片麻岩、黑云钾长方柱透辉岩,富水性强。	哀牢山山前断裂西侧大面积出露。有文献认为大红山群与哀牢山群的阿龙组是平行关系 ^[14] 。
					v		辉长岩	仅戛洒盆地外围东北侧小面积出露。

盘或两盘为柔性岩层的地段,同样呈现阻水的性质。

戛洒盆地红河断裂东枝两盘均为三叠系上统页岩、泥岩,亦为断裂阻水段,位于勘探孔北侧的泉点,出露于与红河断裂相交的断裂带上,泉点流量仅 $0.48\text{ L}\cdot\text{s}^{-1}$,断裂南侧的泉点已干涸。

综合上述各要素分析,在地形高差产生的水力差以及地下水温差作用下,沿断裂带、特别是不同走向的断裂交汇部位,大红山群白云石大理岩层具

备形成带状热储的基本条件。

3 钻探突破与发现

3.1 孔位与孔深论证

按照地质勘查及认识问题的基本程序,通过区域地热地质背景(图 4)、项目区周边地层分布及构造格局调查研究,推断拟勘探孔位的地层层序、构造

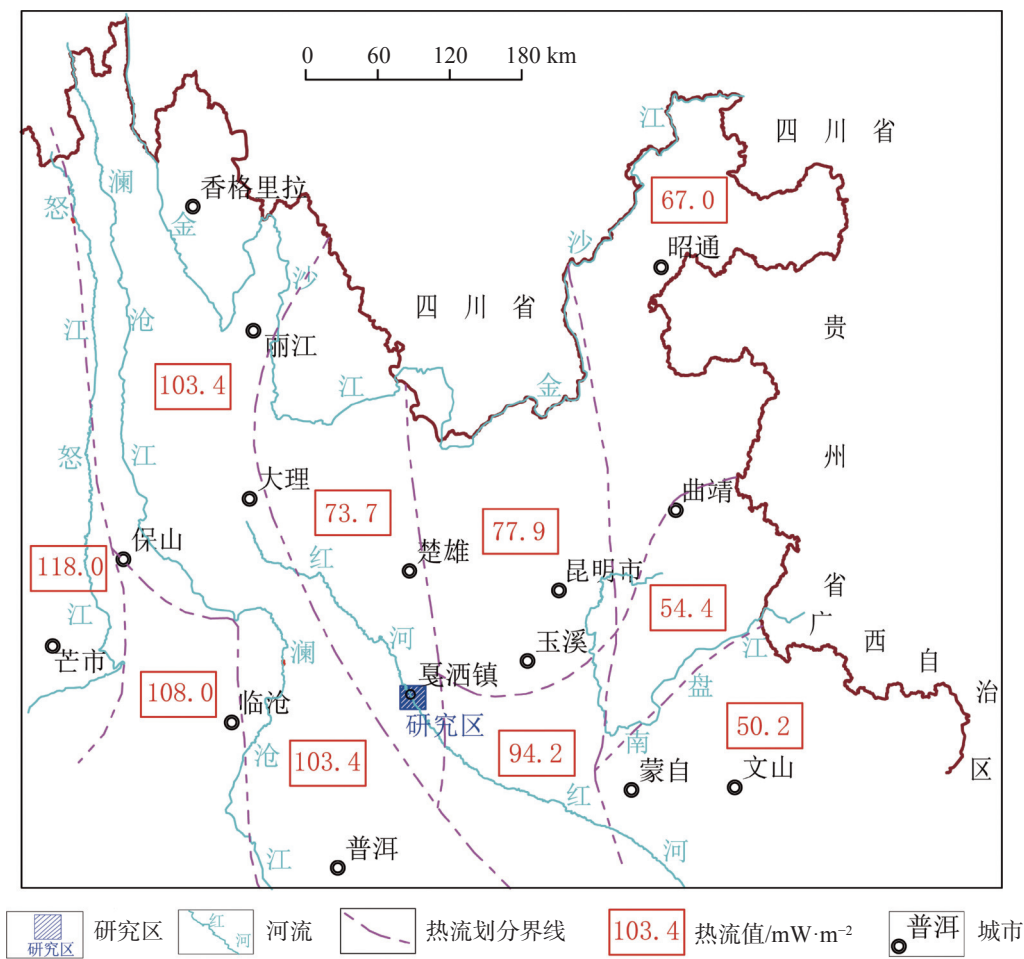


图3 云南省大地热流值区划略图

Fig. 3 Schematic regionalization map of terrestrial heat flow value in Yunnan province

表2 红河断裂代表性温泉点概况

Table 2 Overview of representative hot spring points of Honghe fault

泉点位置	水量/L·s ⁻¹	水温/℃	泉点与断层的关系
金平勐桥乡麻木树	5.62	90~103	出露于断裂带哀牢山群片麻岩
金平勐桥乡茅草坪	0.38	40	
金平勐桥乡小热水塘	5.1	52	
金平勐桥乡石洞	0.99	38	
红河他龙—元阳排沙河	1.35~19	23~51.5	出露于断层西盘哀牢山群片麻岩
新平戛洒硬寨	0.48	43	出露于断层F1东盘三叠系泥岩
元江热水塘	3.2	42	出露于断层东盘昆阳群
元江红河农场	3.1	25	出露于隐伏断裂带

组合关系,论证钻孔深度、水温、水量、水质,进行重点地段物探检验,完成勘探孔设计。

根据1:20万水文地质普查报告和大红山铁矿产探矿资料,结合现场地质调查、3条大地音频电磁测深剖面探测,基本查明了戛洒盆地上覆地层为第四系(Q₄)冲洪积、坡洪积、泥石流堆积物,盆地周边出露三叠系干海子组(T_{3g})、祥云组(T_{3x}),元古界

大红山群第4至第5段(Pt₁dhs⁴⁻⁵)、元古界阿龙组地层(Pt₁a)。Pt₁dhs⁴⁻⁵地层为白云石大理岩、片岩,大理岩为坚硬脆性岩石,断层影响带张性裂隙发育,加之深循环径流溶蚀,可能形成带状中等至强含水层,为戛洒盆地地热钻探的最佳目的层位。与上覆第四系、三叠系地层为断层接触或不整合接触,上覆地层总体透水性、富水性弱,构成了热储盖层。

盆地及周边主要有哀牢山山前断裂,位于戛洒盆地西侧边缘,水塘—元江断裂、马鹿塘断裂从盆地中部隐伏通过,戛洒盆地地质结构大致可分为两个单元(图2)。

I单元位于戛洒盆地东侧,水塘—元江断裂以东。地层从上至下为: Q_h 、 Q_p 地层、 T_{3g} 地层、 v 侵入岩地层(局部分布)、 Pt_1dhs^{4-5} 地层, Pt_1dhs^{4-5} 地层埋深600~1 500 m,具完整的热储层结构,埋深在经济技术条件允许范围内。

II单元位于戛洒盆地西部,水塘—元江断裂以西。地层为从上至下为: Q_h 、 Q_p 地层、 T_{3g} 地层(北段缺失)、 T_{3x} 、 T_{3m} 、 v 侵入岩地层(局部分布)、 Pt_1dhs^{4-5} 地层(东段)、 Pt_1a^a 地层(西段), Pt^{4-5} 地层埋深1 400 m至3 000 m,开采经济技术条件较差。

综合论证确定勘探孔布置在I单元的戛洒江与南恩河交汇的阶地上,主干断裂与次级断裂交接处附近。设计孔深2 200 m,推断揭露 Pt_1dhs^{4-5} 热储层约950 m,保证足够的预留进尺、出水段和沉砂段。根据所处区域一般地热增温率 $2.28\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$ 和当

地年平均气温 $22\text{ }^{\circ}\text{C}$ 推算,SJ1勘探孔孔底温度理论值为 $69.9\text{ }^{\circ}\text{C}$,考虑取水段较长,取水段上部温度偏低,同时,地热水抽取到孔口的温度损失导致水温降低 $6\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,推测SJ1孔口水温为 $55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。勘探钻孔位于断裂影响带并揭露地层不整合带,认为涌水量能够达到开发利用要求。

3.2 钻探成果及认识

SJ1钻孔于2021年4月开孔,2021年8月竣工。采用正循环不取芯钻进,终孔深度2 200.71 m,静水位埋深1.8 m,涌水量 $1\,089\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,井口温度 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。终孔抽水试验结束72 h后,进行了自然伽玛(API)、水温和钻孔偏斜测井(图5)。水井静水位1 m,抽水试验稳定水位为46 m。初始抽水流量为 $55\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$,2 h后流量稳定在 $45.3\text{ m}^3\cdot\text{h}^{-1}$ 。初始井口温度为 $24\text{ }^{\circ}\text{C}$,2 h水温为 $56\text{ }^{\circ}\text{C}$,4 h水温为 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$,6 h水温为 $62\text{ }^{\circ}\text{C}$,12 h后水温稳定在 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$,井口水温 $65\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。抽水结束后20 min水位由46 m恢复至3.6 m,又经过3 h后由3.6 m恢复为1 m(初始水位)。

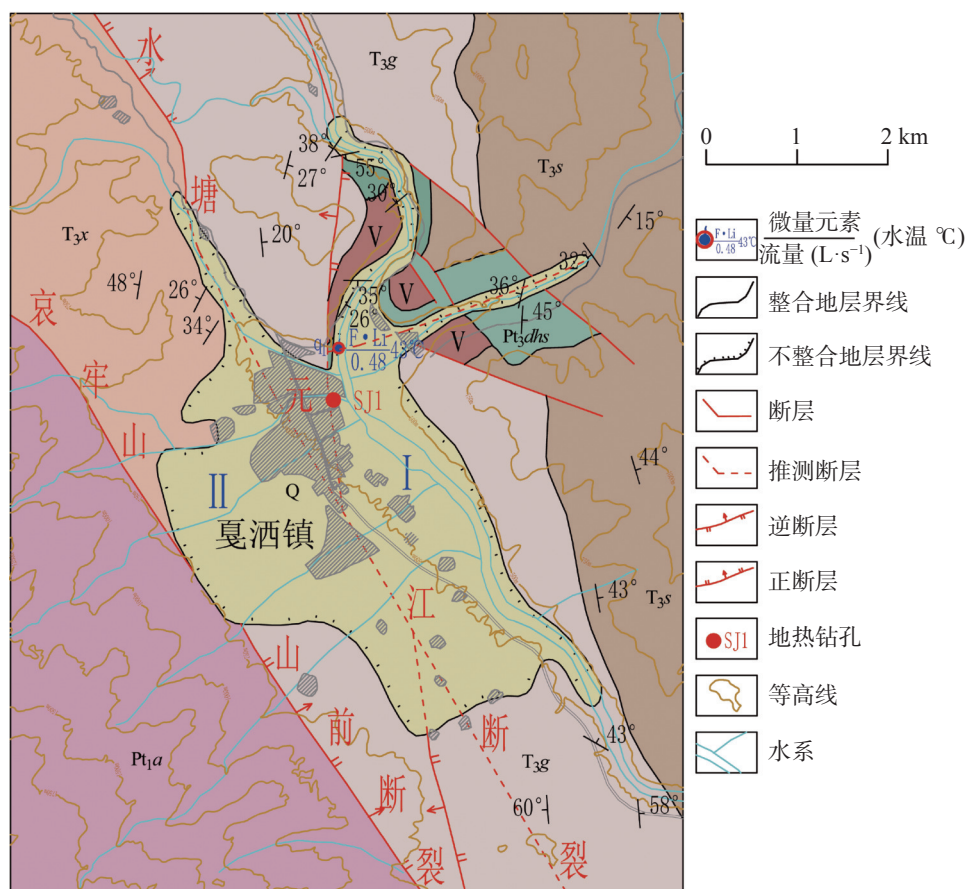


图4 研究区地热地质图

Fig. 4 Geothermal geological map of the study area

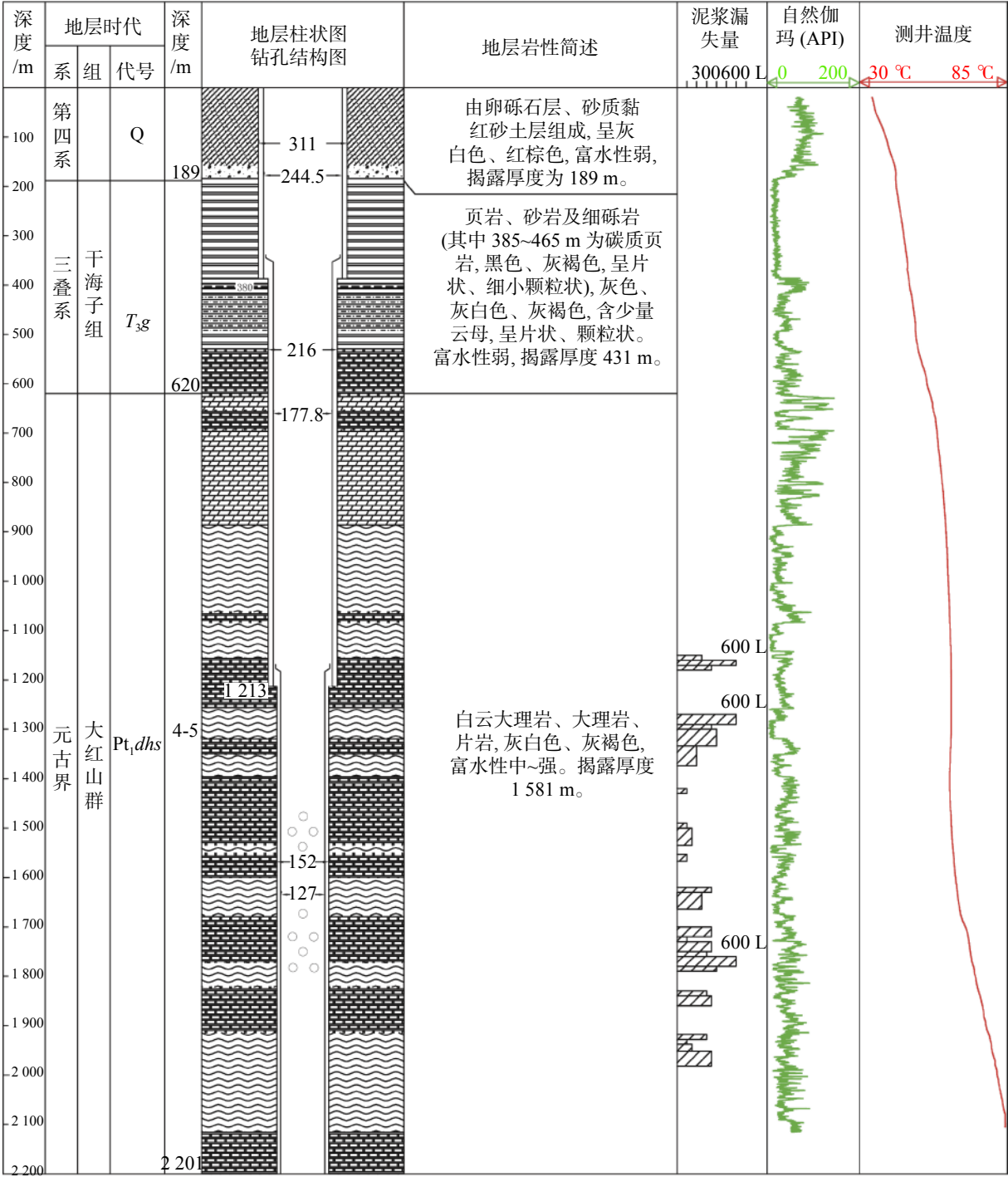


图 5 SJ1 地热勘探孔综合柱状图

Fig. 5 Comprehensive drill column of SJ1 geothermal exploration hole

钻孔内水温测量成果显示, 10~170 m 段, 水温降速较快, 该段地下水与夏洒江水有水力联系; 520~680 m 段, 地下水平均增温率达 $4.2\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$, 存在地层不整合接触带影响; 根据在含水层顶板界面处, 地温梯度有一明显的急变特征划分了六个含水段: 130~170 m、520~670 m、1 310~1 530 m、1 700~1 740 m、1 780~1 800 m、1 960~1 990 m, 其中 130~

170 m 段为第四系孔隙含水段, 520~670 m 段为地层不整合接触带裂隙含水段, 1 310~1 530 m 段岩性为白云石大理岩为主, 局部夹片岩, 1 700~1 740 m 段岩性为白云石大理岩, 1 780~1 800 m、1 960~1 990 m 两段均为片岩, 1 219 m 以下为取水段, 钻探显示取水段赋水空间以裂隙为主。

自然伽玛 (API) 测试孔内自然放射性强度最大

值为 $1.45 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$, 最小值为 $0.03 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、平均值为 $0.41 \text{ pA} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。根据综合测井曲线在不同地层中所表现出的物性特征、曲线变化形态、幅值大小、物性数值变化范围, 结合钻探资料, 划分地层岩性分层为: 20.00~157.80 m 砂质黏土层、157.80~181.10 m 砂砾层、181.10~385.95 m 页岩层、385.95~395.60 m 泥岩层、395.60~398.65 m 页岩层、398.65~417.00 m 泥岩层、417.00~493.40 m 砂质页岩层、493.40~528.70 m 页岩层、528.70~625.90 m 大理岩层、625.90~632.25 m 泥岩层、632.25~639.75 m 大理岩层、639.75~653.65 m 泥岩层 653.65~2 115.70 m 大理岩层。

综合岩粉样编录、钻探记录、测井资料, SJ1 热水井地层结构为: 0~189 m, 第四系(Q)冲洪积、泥石流堆积砂卵砾石层; 189~620 m, 三叠系干海子组(T_3g)页岩、粉砂质泥岩; 620 m 以下, 元古界大红山群第4至第5段(Pt_1dhs^{4-5})白云石大理岩、片岩。第四系冲洪积、泥石流堆积层、三叠系干海子组碎屑岩地层为热储盖层, 元古界大红山群白云石大理岩层与断裂破碎带、裂隙发育带为热储层(带)。

3.3 热流物理化学特征

3.3.1 流体温度和化学特征

SJ1 勘探孔抽水试验井口水温 65°C 。测井深度至 2 090 m, 水温 84.3°C , 底段大红山群片岩、白云石大理岩, 地热增温率较为稳定, 为 $4.2^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$, 孔底(2 200.71 m)温度预计为 88.9°C 。全孔平均地热增孔率约 $3.0^\circ\text{C} \cdot (100 \text{ m})^{-1}$ 。

地热水中阳离子 Na^+ 含量明显成倍高于 K^+ 、 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} , 阴离子含量以 Cl^- 为主, 水化学类型为 Cl-Na 型, pH 值为 8.14, SiO_2 为 $75.65 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 所含 F 离子为

$7.46 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 水的矿化度和离子组分含量都较高。说明含水介质中可溶盐矿物成分较多, 地热水循环途经含盐类矿物和变质矿物成分较多的变质岩系, 经过深循环溶解了大量的矿物质。水样取样时清澈, 水温降低后有固体沉淀物。

地热水中溶解性总固体 $9\,428 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 由于试样在降温后有固体物质析出, 因而分析结果偏低。阳离子均以 Na^+ 为主, 毫克当量含量 88.3%, 其次为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+ , 这四种离子总量占阳离子总含量的 99% 左右, 阴离子以 Cl^- 、 HCO_3^- 为主, Cl^- 占组分的 81.47%, HCO_3^- 占 17.21% (图 6), 热流体中的 Cl^- 、 Na^+ 分析主要来源于大红山群第 1 至第 3 段(Pt_1dhs^{1-3})火山熔岩段氯磷灰石和方钠石, 热水中含有 F、Li、B、偏硅酸等具有理疗功效的组分, 是较为优良的理疗矿泉水。

3.3.2 地球化学温标估算热储温度

本次勘探获取的地热水化学成分分析测试数据显示, 适宜的地球化学温标主要为 SiO_2 、 K-Mg 温标。

采用无蒸气损失的 SiO_2 温标计算, 热储温度 t 为 122.17°C , 与孔深 2 090 m 实测温度 84.3°C 差异较大。可能原因是 SiO_2 的来源复杂且丰富, 与温标计算公式的适用前提不符。

K-Mg 地热温标计算公式:

$$t = \frac{4410}{13.95 - \lg[\rho(\text{K})/2\rho(\text{Mg})]} - 273.15$$

式中: t 为热储温度 ($^\circ\text{C}$); K 为水中钾的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$); Mg 为水中镁的浓度 ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)。

水中钾的浓度 $121.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 镁的浓度 $113.9 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 计算热储温度 t 为 99.48°C 。孔深 2 090 m 测温 84.3°C , 考虑实际孔深 2 200.71 m 及其以下热储层尚有较大的厚度, 这一计算结果与实际吻合度高,

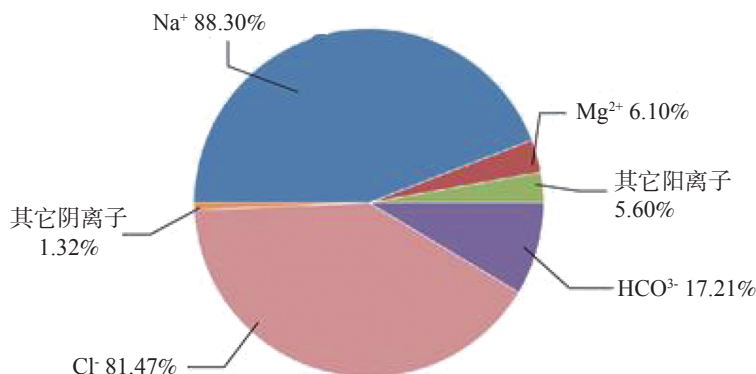


图6 地热水阴阳离子组分占比

Fig. 6 Proportion of anion and cation components in geothermal water

说明 K—Mg 地热温标较为适合大红山群变质岩系中的热储温度估算。

4 地热水运动及赋存状态分析

4.1 地热水赋存状态

根据研究区的地热地质条件分析,沿红河大断裂带的主干和次级导热断裂上涌的深源热流,不断加热了深循环的地下水,形成浅层地下水流与深层地热水的对流运动,地热水沿断裂上升经过大红山群变质岩系的可溶岩及硬脆性裂隙发育岩层时,侧向扩散进入透水性较强的这些层位,形成热储层。热储层被 T_{3g} 以上盖层封存,使得热储层的地下水得以保温和储存,形成了大红山变质岩系地下热储。

大红山群第 4 至第 5 段(Pt_1dhs^{4-5})是本区热储层,厚度大于 1 590 m。综合自然伽玛、测温等测井资料、sj1 勘探孔钻井液漏失量及温度变化记录、岩粉样编录资料,白云质大理岩层中测井温度、钻井液漏失量无突变,显示赋水空隙以节理裂隙为主。

sj1 井位于戛洒河谷,与西侧哀牢山相对高差大于 2 000 m,哀牢山东坡以哀牢山阿龙组变质岩为主,该地层节理裂隙发育,富含裂隙水。哀牢山地下水除一部份在山麓与三叠系碎屑岩接触带以泉形式排泄,一部份向深部径流。但 sj1 井内静水位低于地表,未形成自涌,显示取水段与河谷两侧山区地下水水力联系弱。地下水矿化度 $9\,777\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,溶解性总固体 $9\,428\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,水化学类型为 Cl—Na 型水。显示地下水封存条件好,水循环周期长,为封闭较好的储水构造。据测井资料 1 210 m、1 520 m 两点测温均为 $64.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,1 210 m~1 520 m 段地热增温率连续多测点为 0,显示该段节理裂隙发育强烈,富水性较强。

4.2 地热水运动过程

大红山变质岩系热储为封闭较好的储水构造。热源主要来自沿断裂带上升的热流和区域性地热增温,在深入地幔的红河大断裂附近,地下水与深部热源沟通顺畅,吸收深部岩浆、放射性衰变、构造运动释放的热量,形成地下热水,在水压差、密度差作用下,沿哀牢山山前断裂、水塘—元江断裂、F1 等导热水的断裂和构造裂隙带向浅部运移,扩散至导水储水空隙发育的热储层中储存,形成厚度巨大、宽度狭窄的热储层(带),部分达到地表形成温、热泉露头。

地热水在对流循环过程中,不断与围岩进行水化学作用,溶解了大量的矿物成分,形成了高矿化度水,在大红山群第 1 至第 3 段(Pt_1dhs^{1-3})火山熔岩段,溶解较多的 Na^+ 、 Cl^{-} 。

5 结 论

(1)古元古界大红山群变质岩系中的硬脆性大理岩、石英片岩、火成岩等热储层(带)、导热导水的深大断裂及上覆隔水隔热的三叠系红层等盖层,构成了断裂控制的带状热储;

(2)热储层赋存高水头的承压地热水,主要由地下水在重力和热力作用下,沿区域主干和次级导热断裂作深循环逐渐增温和对流运动所形成,在北西向主干断裂和与之相交的次级断裂的斜接或交切部位附近地热水较为富集,实测地热增温率 $3.0\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(100\text{ m})^{-1}$;

(3)大红山群第 4 至第 5 段(Pt_1dhs^{4-5})热储层富水性强,赋存低温热水,本次钻孔涌水量达 $1\,089\text{ m}^3\cdot\text{d}^{-1}$,孔深 2 090 m 处测温 $84.3\text{ }^{\circ}\text{C}$,地热水矿化度较高,水化学成分复杂,是宝贵的理疗热矿水。

参考文献

- [1] 范承均,熊家镛,王义昭.云南区域地质志[M].北京:地质出版社,1990.
FAN Chengjun, XIONG Jiayong, WANG Yizhao. Regional geology of Yunnan Province [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [2] 王宇.红河断裂南段活动性分析[J].地质灾害与环境保护, 1994, 5(2): 28-35.
WANG Yu. Activity analysis of the southern section of the Red River fault [J]. Journal of Geological Hazards and Environment Preservation, 1994, 5(2): 28-35.
- [3] 潘桂堂,肖庆辉,陆松年,邓晋福,冯益民.中国大地构造单元划分[J].中国地质, 2009, 36(1): 1-16.
PAN Guitang, XIAO Qinghui, LU Songnian, DENG Jinfu, FENG Yimin. Subdivision of tectonic units in China[J]. Geology in China, 2009, 36(1): 1-16.
- [4] 陈墨香,汪集旸.中国地热研究的回顾与展望[J].地球物理学报, 1994, 37(S1): 320-338.
CHEN Moxiang, WANG Jiyang. Review and prospect on geothermal studies in china[J]. Chinese Journal of Geophysics, 1994, 37(S1): 320-338.
- [5] 廖志杰,赵平,多吉,等.滇藏地热带[M].北京:科学出版社, 1999年.
LIAO Zhijie, ZHAO Ping, DUO Ji, et al. Yunnan-Tibet geothermal belt-geothermal resources[M]. Beijing: Science Press, 1999.

- [6] 汪集旸, 熊亮萍, 庞中和, 等. 中低温对流系统[M]. 北京: 科学出版社, 1993年.
WANG Jiyang, XIONG Liangping, PANG Zhonghe, et al. Low-medium temperature geothermal system[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [7] 蔺文静, 刘志明, 王婉丽, 王贵玲. 中国地热资源及其潜力评估[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 312-321.
LIN Wenjing, LIU Zhiming, WANG Wanli, WANG Guiling. The assessment of geothermal resources potential of China[J]. *Geology in China*, 2013, 40(1): 312-321.
- [8] 匡耀求, 黄宇生, 吴志峰, 胡振宇, 孙波. 大地热流对中国西部环境与生态演变的影响及其研究意义[J]. 地球科学进展, 2003, 18(1): 22-27.
KUANG Yaoqiu, HUANG Ningsheng, WU Zhifeng, HU Zhengyu, SUN Bo. Effects of terrestrial heat flow on the environment and ecologic evolution of western china and its significance[J]. *Advances in Earth Science*, 2003, 18(1): 22-27.
- [9] 张翼飞, 曹其林, 王宇, 等. 中国矿床发现史·云南卷[M]. 北京: 地质出版社, 1996.
ZHANG Yifei, CAO Qilin, WANG Yu, et al. The discovery history of mineral deposits of China-Volume of Yunnan Province[M]. Beijing: Geological Publishing House, 1990.
- [10] 方丽萍, 丁建博. 云南地热资源的成因分析及开发利用[J]. 水文地质工程地质, 1997(4): 45-48.
FANG Liping, DING Jianbo. Genesis analysis, development and utilization of geothermal resources in Yunnan Province[J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 1997(4): 45-48.
- [11] 王宇, 杨世瑜. 香格里拉盆地地热地质特征及勘探前景[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(3): 265-269.
WANG Yu, YANG Shiyu. The geothermal feature and exploring prospect of the Xianggelila basin in northwestern Yunnan, China[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 2003, 22(3): 265-269.
- [12] 王宇, 康晓波, 张华, 王燕. 昆明地热田的成因与外延[J]. 中国岩溶, 2016, 35(2): 125-133.
WANG Yu, KANG Xiaobo, ZHANG Hua, WANG Yan. The genesis and extension of Kunming geothermal field[J]. *Carso-logica Sinica*, 2016, 35(2): 125-133.
- [13] 张定源, 施华生, 周汉民, 王力波. 地热绿色新能源与可持续发展[J]. 火山地质与矿产, 2001, 22(4): 236-243.
ZHANG Dingyuan, SHI Huasheng, ZHOU Hanming, WANG Libo. Geothermal energy and sustainable development[J]. *Volcanology & Mineral resources*, 2001, 22(4): 236-243.
- [14] 张远志, 张定辉, 刘世荣, 等. 云南省岩石地层[M]. 武汉: 中国地质大学出版社, 1996.
ZHANG Yuanzhi, ZHANG Dinghui, LIU Shirong, et al. Rock Strata in Yunnan Province[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [15] 郝天珧, 江为为, 胥颐, 丘学林, 刘建华. 红河断裂带研究区深部结构特点的地球物理研究[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(3): 584-593.
HAO Tianyao, JIANG Weiwei, XU Yi, QIU Xuelin, LIU Jianhua. Geophysical research on deep structure feature in study region of red river fault zone[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 584-593.
- [16] 张建国, 皇甫岗, 谢英情, Phan Trong Trinh. 中越红河断裂带考察与研究(一)[J]. 地震研究, 2008, 31(4): 362-368.
ZHANG Jianguo, HUANGFU Gang, XIE Yingqing, Phan Trong Trinh. Investigation and research of the Red River fault zone in China and Vietnam (1)[J]. *Journal of seismological research*, 2008, 31(4): 362-368.
- [17] 胥颐, 杨晓涛, 刘建华. 云南地区地壳速度结构的层析成像研究[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1904-1914.
XU Yi, YANG Xiaotao, LIU Jianhua. Tomographic study of crustal velocity structures in the Yunnan region southwest China [J]. *Chinese Journal Of Geophysics*. 2013. , 56(6): 1904-1914.
- [18] 朱俊江, 詹文欢, 丘学林, 徐辉龙, 唐诚. 红河断裂带两侧地震震源机制及构造意义[J]. 大地构造与成矿学, 2004, 28(3): 239-247.
ZHU Junjiang, ZHAN Wenhuan, QIU Xuelin, XU Huilong, TANG Cheng. Earthquake focal mechanism and its tectonic significance along the two sides of the red river fault zone[J]. *Geotectonicaetmetallogenia*, 2004, 28(3): 239-247.
- [19] 魏顺民, 计凤桔, 向宏发, 等. 红河活动断裂带[M]. 北京: 海洋出版社, 2001年.
YU Shunmin, JI Fengju, XIANG Hongfa, et al. Red River active fault zone[M]. Beijing: Ocean Press, 2001.
- [20] 林元武. 温泉热储温度对断裂的弱化作用及其对地震活动性的影响[J]. 地震学报, 1994, 16(2): 251-257.
LIN Yuanwu. The weakening effect of hot spring thermal storage temperature on fracture and its influence on seismic activity[J]. *Acta Seismologica Sinica*, 1994, 16(2): 251-257.
- [21] 林元武. 红河断裂带北段温泉水循环深度与地震活动性的关系探讨[J]. 地震地质, 1993, 15(3): 193-206.
LIN Yuanwu. A discussion on the relation of circulation depth of hot spring water to seismic activity on the northern segment of the Honghe fault zone[J]. *Seismology and geology*, 1993, 15(3): 193-206.
- [22] 任纪舜, 金小赤. 红河断裂的新观察[J]. 地质论评, 1996, 42(5): 439-442.
REN Jishun, JIN Xiaochi. New observations of the Red River fault[J]. *Geological Review*, 1996, 42(5): 439-442.
- [23] 胥颐, 刘建华, 刘福田, 宋海斌, 郝天珧, 江为为. 哀牢山-红河断裂带及其邻区的地壳上地幔结构[J]. 中国科学(D辑), 2003, 33(12): 1201-1208.
XU Yi, LIU Jianhua, LIU Futian, SONG Haibin, HAO Tianyao, JIANG Weiwei. The crust upper mantle structure of the Ailaoshan-red River fault zone and adjacent regions[J]. *Science in China Ser D:Earth Sciences*, 2003, 33(12): 1201-1208.
- [24] 孙云梅, 李金平. 红河断裂带不同构造区段的现今滑动速率与应变积累状况[J]. 海洋地质学, 2018, 37(4): 86-96.
SUN Yunmei, LI Jinping. Current slip rate and strain accumulation in different tectonic sections of Red River fault zone[J]. *Marine Geology*, 2018, 37(4): 86-96.

Geothermal reservoir structure and heat flow characteristics of proterozoic metamorphic rock series of Dahongshan group in Honghe river basin

LI Chuanwei¹, WANG Yu², ZENG Wei¹, WANG Jiaying¹, ZHUANG Haijun¹

(1. Southwest Nonferrous Kunming Survey and Design (Institute) Co., LTD., Kunming, Yunnan 650051, China;

2. Yunnan Geological Survey, Kunming, Yunnan 650051, China)

Abstract Hot mineral water for development and utilization has been drilled from the metamorphic rock series of Dahongshan group of paleoproterozoic in the Gasa basin in the middle part of the Honghe river basin through geothermal geological survey, geophysical exploration and analysis. The exploration hole depth is 2,200.71 m, and the water intake target layer of 4th to 5th section of Dahongshan group (Pt₁dhs⁴⁻⁵) thermal reservoir is rich in water with 1,089 m³·d⁻¹ of borehole water inflow, 84.3 °C of borehole bottom temperature and 9,777 mg·L⁻¹ of degree of mineralization of geothermal water.

The hydrochemistry type is Cl-Na type, and the hydrochemistry composition is complex. The successful exploration revealed the thermal reservoir characteristics and geothermal resource potential of Dahongshan metamorphic rock series, and expanded a new field of geothermal water exploration and development. The terrestrial heat flow value of the study region is 73.3 mW·m⁻². Hot springs are sparsely distributed along the Honghe fault zone, and the water temperature is generally 25 °C to 40 °C. The current fault activity is relatively weak. Due to the continuous activity of the fault, the brittle dolomite marble and schist in the metamorphic rock series of the Dahongshan group distributed in the Jiasa area have formed a water-bearing fissure zone, forming a deep permeable rock zone. The overlying Quaternary loose layers and Triassic clastic rock layers are soft and flexible rock layers in the Jiasa valley basin, with good structural plane closure and poor permeability, and the thermal conductivity of rocks is as low as 2.4 W·(m·k)⁻¹ to 2.6 W·(m·k)⁻¹, making the layer a good thermal reservoir caprock. The high-density cold water formed by Ailao mountain and the deep structural fissure water are exchanged in the layer, forming the geothermal water of the target mining layer. The content of cation Na⁺ in geothermal water is significantly higher than that of K⁺, Ca²⁺, Mg²⁺, the milliequivalent content is 88.3%, the anion content is mainly Cl⁻ which accounts for 81.47% of the components; the pH value is 8.14, the content of SiO₂ is 75.65 mg·L⁻¹, and the content of ion F⁻ is 7.46 mg·L⁻¹. The degree of mineralization and the content of ionic components of water are high, indicating that the metamorphic rock series with salt-bearing minerals and metamorphic minerals in the geothermal water circulation route has dissolved a large amount of minerals through deep circulation. The Cl⁻ and Na⁺ ions in the thermal fluid are mainly derived from chlorapatite and sodalite in the first to third volcanic lava section of Dahongshan group (Pt₁dhs⁴⁻⁵). The heat source in the study area mainly comes from the rising heat flow along the fault zone and regional geothermal heating. Near the Honghe fault, which penetrates deep into the mantle, the groundwater communicates smoothly with the deep heat source, absorbing the energy released by the deep magma, radioactive decay and tectonic movement, forming underground hot water. Under the action of water pressure difference and density difference, geothermal water migrates to the shallow part along the Ailao mountain piedmont fault, Shuitang-Yuanjiang fault, fault of heat conduction and water conduction such as F1, and structural fracture zone. When geothermal water migrates through the soluble rocks and the rock strata with hard brittle fracture in the metamorphic rock series of the Dahongshan group, it forms a thermal reservoir, and the water-bearing voids are mainly joint fractures.

Key words geothermal geology, geothermal water, geothermal reservoir structure, heat flow characteristics, hot water circulation, Honghe river basin

(编辑 张玲 杨杨)