

怒江跃进桥温泉水化学特征及成因分析

屈丽丽¹ 徐世光^{1,2} 杨秀梅³ 糕传塬¹

(昆明理工大学¹, 昆明 650093; 云南省地矿局², 昆明 653100; 云南省地质调查局³, 昆明 650000)

摘要 跃进桥温泉为上升泉群,其热水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca}$ 型。根据 δD 、 $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素分析温泉水源为大气降水; $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素确定其补给高程为 2 050 m; ^3H 放射性同位素确定温泉水的年龄为 (10 ~ 20) a。跃进桥温泉的热源来自区域高热流背景,称嘎断裂、F1 断裂起到导热导水作用,其成因模式为大气降水补给的断裂渗入循环型中、低温地热系统。

关键词 跃进桥温泉 水化学特征 成因模式

中图法分类号 P641.135; **文献标志码** A

跃进桥温泉群出露于怒江大峡谷切割区,位于六库以东 500 m 一带。温泉水富含锶、氢、铷、铯、锂等多种对人体健康有益的微量元素,具有保健、祛病之功效。一百多年来正当农历正月,生活在怒江峡谷的傈僳族人民,都要在此举行“澡堂会”,形成了这一独特的人文历史文化遗产。

本文利用样品测试结果,总结了跃进桥温泉群的出露条件,并对热水的水化学和同位素特征进行分析,探讨了温泉的起源,补给高程,年龄、初始温度以及循环深度等问题。在分析热源、水源、导热通道等要素基础上提出了温泉成因模式,对今后该区地热资源的开发利用远景规划和文化遗产的保护具有指导意义。

1 区域地质背景

温泉出露区属滇西横断山系的南部,地势总体上北高南低,主要山脉和水系呈近南北向延伸,周围多构造高原、台地或方山,两坡由崖壁组成。温泉出露在高山与山间谷地的接触部位上,属于裂隙构造上升泉。主要地貌类型为怒江峡谷深切地貌和季节性河流侵蚀地貌,此种地貌类型提供了导水

构造裂隙得以侵蚀暴露的良好条件。同时由地貌形态所决定的标高差的存在,增大了水头压力、缩短了上升热水的流程,使热水易于流泻于地表。

区内出露的地层和岩体岩性主要有石炭系上统卧牛寺组($\text{C}_{3\text{w}}$)。岩性以玄武岩为主,顶部为一层火山角砾岩及凝灰角砾岩,局部夹灰岩透镜体,属于隔水层。三叠系中统河湾街组上段($\text{T}_{2\text{h}}^1$),岩性为纯灰岩、白云质灰岩、泥质灰岩等,属于含水层。第四系全新统(Q_4)主要为冲积、洪积及泥石流堆积,岩性主要碎块石、砂土、粉土及砂卵砾石、漂石等的混杂堆积,坡积层厚度一般数米到十余米,属于盖层,其中,江边冲积层为透水层,江中冲积层为隔水层。

从构造上看,温泉出露区内褶皱、断裂发育。构造形迹以断裂为主,主要构造线近南北向展布,东西向次之,部分为北东向。断裂构造导致了温泉群沿怒江呈近南北向分布,同时受怒江断裂影响而发育的其他次级断裂,成为了地下水补径排的良好通道。跃进桥温泉群沿 F1 断层出露(图 1)。该断裂是温泉地区起控制性作用的主干断裂。并结合物探工程采用可控源音频大地电磁法(CSAMT)和高密度电法,确认 F1 断层为跃进桥温泉群的导热导水构造。

2011 年 3 月 15 日收到

第一作者简介:屈丽丽(1985—),女,硕士研究生,研究方向:水文地质工程地质。E-mail:qulili_1985@163.com。

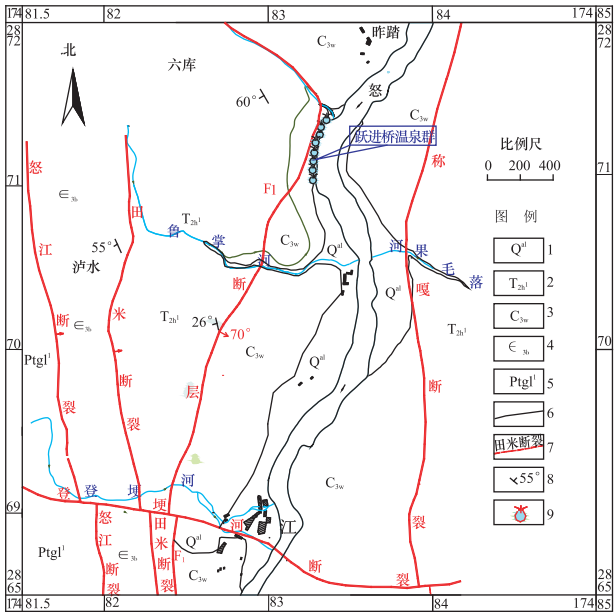


图1 跃进桥温泉群地质构造略图

1—第四系冲洪积层;2—三迭系中统河湾街组灰岩、白云质灰岩;3—石炭系上统卧牛寺组玄武岩;4—寒武系上统保山组板岩、微晶片岩、变质砂岩;5—高黎贡山群下亚群:花岗混合岩;6—地层界线;7—区域性大断层及名称;8—岩层产状;9—温泉

2 温泉简述

跃进桥泉群出露高程约 830 m,出露点达 8 个

之多,呈线状顺江分布,水温(37~59)℃;流量不等,最小流量(0.05~0.07)L/s,最大流量(8~10)L/s,一般流量(1~2)L/s。其流出口枯季高于江水面约10余米,雨季距江水面约(2~3)m,泉群流出口呈散流状沿层间挤压面流出;均为上升泉,详见表(1)。各泉口出水高程最大高差为8.50 m,整个泉群出口口高差不大,大致沿一个海拔高差较小地段流出,形成了云蒸雾绕的景观。

表1 跃进桥温泉群出露特征表
(各泉点编号顺序为自北向南)

温泉 编号	出露 地层	出露高 程/m	流量/ (L·s ⁻¹)	泉的 类型	温度 /(C°)	备注
S1	C _{3w} /T _{2h}	830.44	1.5	上升泉	73	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S2	C _{3w} /T _{2h}	827.91	3.2	上升泉	68	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S3	C _{3w} /T _{2h}	835.63	5	上升泉	50	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S4	C _{3w} /T _{2h}	836.41	0.5	上升泉	37	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S5	C _{3w} /T _{2h}	829.24	0.4	上升泉	59	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S6	C _{3w} /T _{2h}	831.26	1.7	上升泉	46	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S7	C _{3w} /T _{2h}	832.56	1.2	上升泉	52	沿 F1 断层出露,流量较稳定。
S8	C _{3w} /T _{2h}	831.41	0.3	上升泉	38	沿 F1 断层出露,流量较稳定。

表2 跃进桥温泉水和怒江水常量化学元素特征

样品编号	Ph	K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	Cl ⁻	SO ₄ ²⁻	HCO ₃ ⁻	NO ₃ ⁻	TDS	CO ₂
S1	7.20	5.60	18.70	138.68	28.66	2.13	24.20	583.93	1.42	836.94	30.33
S2	7.40	24.08	45.85	144.10	25.84	22.38	172.00	647.64	0.70	1 179.32	34.93
S3	6.80	7.70	24.41	96.97	20.41	3.95	3.20	76.97	5.87	781.35	32.18
S4	7.00	6.84	30.80	133.67	26.75	3.43	4.56	543.65	3.12	1 278.98	33.51
S5	7.00	7.09	15.91	120.70	23.20	15.76	67.82	520.34	1.87	995.34	29.78
S6	6.90	20.62	34.80	98.53	21.09	4.56	4.70	79.56	6.51	811.26	36.91
S7	9.80	7.51	20.32	100.39	22.87	3.89	18.76	81.23	4.56	976.35	29.36
S8	7.60	8.22	22.90	145.85	33.15	2.25	12.13	667.21	2.35	1 286.43	35.61
L9	7.30	1.73	5.12	71.76	13.15	0.00	13.76	114.13	0.84	586.99	6.43
L10	7.20	1.87	3.67	48.65	10.47	0.00	16.50	93.89	0.92	198.92	8.99
L11	7.00	1.98	4.70	55.63	11.89	0.00	18.06	105.90	0.88	632.12	7.32

注:以 S 开头的为温泉水,以 L 开头的为地表水。

3 温泉水化学特征

温泉的化学成分主要取决于循环过程中的围岩和构造环境,一方面深大断裂会带给温泉深部的化学成分,另一方面,温泉会不断地溶解围岩的矿物质成分。一般地,地下热水循环越深,其矿物质含量就越高,水化学类型就越复杂。

3.1 常量组分特征分析

为综合分析研究区的地下水水化学特征,于2008年3月按温泉出露地点采集水样,同时采集了地表水水样做分析对比。测试工作采取的是全分析方法,测试结果见表2。

由表2可得温泉区内温泉水中总溶解固体物(TDS)为(781.35~1 286.43)mg/L,属于微矿化淡水。pH值变化在6.8~9.8之间,均值为7.46,显中性。常量组分中阳离子 Ca^{2+} 含量最高,平均为122.36 mg/L;这主要来源于地下水在运移过程中与碳酸岩的水岩作用。主要阴离子为 HCO_3^- ,含量(76.97~667.21)mg/L,平均400.07 mg/L。重碳酸根主要来源于碳酸盐的分解。温泉水只有 Na^+ 、 K^+ 含量极低, Cl^- 、 SO_4^{2-} 含量变化较大。区内地表水主要为怒江江水,其矿化度变化在(198.92~632.12)mg/L之间,平均值为472.68 mg/L。主要阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} ,主要阴离子为 HCO_3^- 。地表水中 Na^+ 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 含量极低,不含有 Cl^- 离子。

此外跃进桥温泉群泉水中含有的侵蚀性 CO_2 ,根据温泉的循环途径判断,主要由碳酸盐岩溶解所产生,由于 CO_2 是一种弱酸性的还原性强的气体,其存在指示着温泉水的循环过程处于弱还原环境。

对比温泉水和地表水的分析结果可以看出,二者之间常量组分趋势有明显的相似。但各种离子均在热水中含量偏高。由于跃进桥温泉出露区位于怒江江边,根据上述分析跃进桥温泉水很可能与怒江水发生了混合,因此有必要将温泉水与怒江水做对比性研究。从Piper三线图^[1](图2)可比较直观地得出温泉水的特征及其与常温地表水的水化学分布特征。

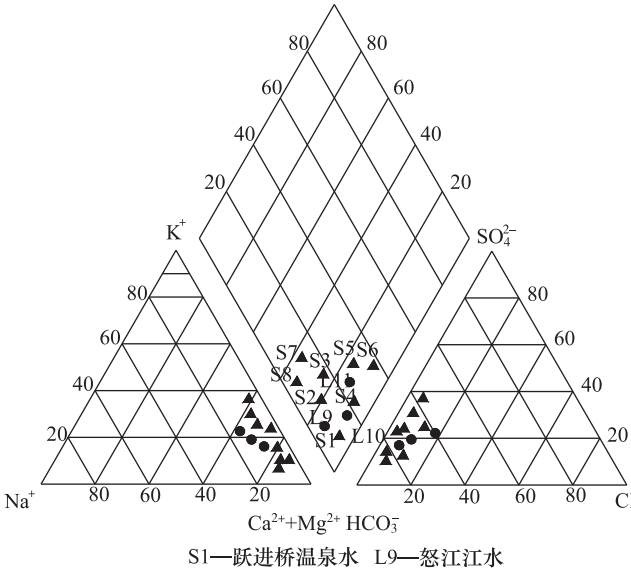


图2 跃进桥温泉群泉水和怒江水 Piper 三线图解

图2显示,在阳离子三线图中,绝大部分水样点落在三角形的右边,说明研究区温泉水和怒江水中 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 为主要阳离子, Na^+ 、 K^+ 相对比较贫乏。在阴离子三线图中,绝大部分水样点落在三角形的左边,说明研究区温泉水和怒江水中 HCO_3^- 含量丰富, Cl^- 、 SO_4^{2-} 相对比较贫乏。结合平行四边形图中水样点的分布可知,研究区温泉水化学类型主要为 HCO_3-Ca 型,这主要因为跃进桥温泉群泉水在运移过程中,当深循环的热水与围岩流经碳酸岩地层接触时, Ca^{2+} 能迅速且最大限度地溶解于水,所以其在热水中的含量较高。特别在靠近怒江河床部位,出现明显的钙化现象。同时也表明了温泉的分布很可能与怒江主河道的水流循环系统相关。怒江水水化学类型主要为 $\text{HCO}_3\cdot\text{SO}_4-\text{Mg}$ 型,这主要是与怒江径流路径较长,汇流面积较大有关。

3.2 微量组分特征分析

热水中除了溶解有一般常量元素以外,含有某些微量元素,如Sr、Ba、Rb、Cs等,它们在地热水中的含量比一般地下水化学成分较高,可以作为一种标志性元素来区分热水和冷水,详见表3。

表3 跃进桥温泉水和怒江水微量
化学元素特征[单位 $\times 10^{-6}/(\text{ppm})$]

样品编号	Sr	Ba	Rb	Cs
S1	1 149.01	102.56	33.14	11.25
S2	1 089.34	122.89	45.2	11.31
S3	1 293.52	109.32	34.76	15.72
S4	1 078.15	113.21	36.26	10.98
S5	1 169.52	127.66	40.74	12.57
S6	1 267.3	115.9	29.78	10.32
S7	1 042.29	105.34	36.71	9.69
S8	1 266.71	107.22	38.53	13.86
L9	325.75	56.86	6.89	1.28
L10	298.46	59.32	7.29	2.66
L11	303.61	62.1	8.31	3.04

表3显示,跃进桥温泉群泉水中锶的含量相对较高,比地表水相差近三倍,它们在水中的含量取决于地下热水溶滤岩层中锶的富集程度以及地下热水的水温和pH值。钡含量较高是因为热液可以从围岩中提取钡,钡易于被含氟的气体和溶液转移和集中到热液中,说明温泉同火成岩(石炭系上统卧牛寺组玄武岩)发生了水岩相互作用。温泉水中铷、铯的含量都相对较高,且含量比地表水高很多,这是由于铷、铯易于被沉积物所吸附,因此在温泉在流经途径中,必然同沉积岩石发生了淋滤作用,导致温泉水中铷、铯富集。

4 同位素特征

4.1 δD 、 $\delta^{18}O$ 稳定同位素确定温泉水的来源

氢和氧的同位素组成是寻找地热水补给源的天然示踪剂。将地热水及各种可能的补给源的氢和氧的稳定同位素组成进行比较分析,研究地热水的补给来源^[2]。克雷格(1961)提出大气降水中 δD 和 $\delta^{18}O$ 之间具有明显的线性关系 $\delta D = 8\delta^{18}O + 10$,称为克雷格雨水线方程,该方程可以用来判断地下热水的补给来源。如果地下水有几种不同地区的降水补给来源,而且在不同地区形成降水的蒸发凝结条件各不相同,那么就会在不同地区降水来源的

$\delta D - \delta^{18}O$ 图上出现不同的斜率和截距。结合我国西南降雨线 $\delta D = 7.96\delta^{18}O + 9.52$,得出图3。

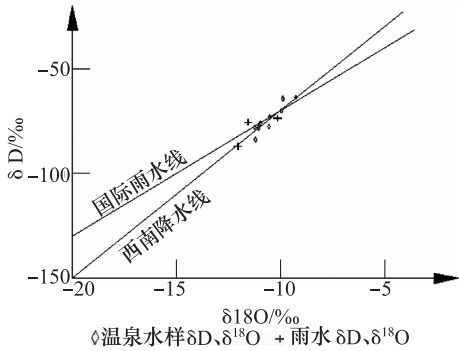


图3 $\delta D - \delta^{18}O$ 关系示意图

据图3可知,跃进桥温泉群泉水、雨水样品 $\delta D - \delta^{18}O$ 偏离很小,因此,可以得出跃进桥温泉的水源来自大气降水的结论。同时表明温泉热水属于渗滤成因的深循环地下热水。

4.2 $\delta^{18}O$ 稳定同位素确定温泉的补给高程

大气水同位素组成变化很大, $\delta^{18}O$ 由 $-10\text{‰} \sim 50\text{‰}$, δD 由 $-50\text{‰} \sim -350\text{‰}$ 。所有这些水的氢氧同位素组成呈现很有规律的变化。纬度越高或海拔高度越高,水的 δD 及 $\delta^{18}O$ 值越低。根据中国科学院贵阳地球化学研究所于津生等人(1980)^[3]对川西藏东地区 $\delta^{18}O$ 高程效应的研究,其梯度值为 $\sim 0.26\text{‰}/100\text{ m}$,即高程每增加100 m, $\delta^{18}O$ 减少0.26‰。在删除离群值后,藏东地区的 $\delta^{18}O$ 值随海拔高度的变化显示出线性相关:

$$H = 100(\delta^{18}O - \delta_0^{18}O)/(-0.26\text{‰}) + 1\,300 \quad (1)$$

H 为待求水点的补给高程(m)。 $\delta_0^{18}O$ 大气降水所对应的 $\delta_0^{18}O$,温泉区 $\delta^{18}O$ 平均值为 -10.95‰ ,大气降雨 $\delta_0^{18}O$ 平均值为 -9.13‰ 。推算得温泉补给高度在海拔2 000 m左右,结合温泉地区地形地貌及高程分析,温泉出露地区山顶高程一般在(2 100 ~ 2 400)m,得出此补给高程与当地地形及高程相吻合。同时温泉区地热水补给高程高于温泉出露高程1 200 m左右,说明温泉循环深度相对较大,循环途径复杂,循环过程中发生了充分的水岩相互作用。

4.3 3H 放射性同位素估算温泉水的年龄

放射性同位素不受温度、压力或化学组分等外

界条件的影响,而以一定的速度衰减。每种放射性元素的半衰期是一个常数,利用这一特征,可以测定地下水的年龄,即水在地下水含水层中的平均滞留时间。Kaufman 和 Libby (1954)^[4]首先认识到用宇宙射线氚进行地下水年龄测定的可能性。³H 成为近年来测定年龄在 50 a 以内的地下水的重要同位素方法^[5]。

大气中产生的氚的基本途径是由于高空宇宙射线中快中子与大气层中稳定的氮发生核反应形成的,即 $^1_0\text{n} + ^{14}_7\text{N} \rightarrow ^3_1\text{H} + ^{12}_6\text{C}$ 。其产生率大约为 $(0.25\text{—}0.75)$ 原子/ $(\text{cm}^2 \cdot \text{s})$;另一条途径是由人工热核实验产生的。氚的衰变是通过释放 β 射线衰变成 ^3He 而实现的。

定量计算地下水平均滞留时间需要大气降水系列资料^[6],此次研究采用经验法来进行估算,据法国 J. gr (丰特)的经验估算法认为: $0 \sim 5$ IU 说明 40 a 以前的“古水”成分占优势; $(5 \sim 40)$ Tu 表示新近入渗水与“古水”之间有混合作用;大于 40 Tu 表明新近入渗水占优势。测得温泉水的氚值大部分介于 $(5 \sim 15)$ TU 之间,说明温泉水的补给来源的循环时间相对较短,新近的入渗水占主要优势,而非“古水”。即温泉流出来的水是 $(10 \sim 20)$ a 前渗入的地下水。

5 温泉成因模式浅析

5.1 热源

根据覃玉玺,潘用泛^[7]划分的云南省温泉区划,跃进桥温泉属于腾冲-潞西温泉区中的泸水-六库温泉带。从岩石圈低温分布特征看,该区属于高温型的腾冲地块,地壳上地幔特定深度温度、莫霍面温度 $(1\ 140\ ^\circ\text{C})$ 、各结构层地温梯度均为云南最高值。以 $550\ ^\circ\text{C}$ 代表居里面温度,则本区居里面埋深最浅 $(16.7\ \text{km})$ 。岩石圈底界面温度为 $(1\ 460 \sim 1\ 526)\ ^\circ\text{C}$ 。上述地温分布反映了该单元强烈的高热背景和相应的岩石圈热结构。

跃进桥温泉沿断层带出露,难免会产生温泉热来自断层活动的认识。但断层活动究竟能产生多

少热,假定断层带物质的黏度为 $1\ 021\ \text{Pa} \cdot \text{s}$,断层的平均滑移速度为 $1\ \text{mm/a}$,计算结果表明^[14]:断层运动的升温仅为 $0.03\ ^\circ\text{C}$ 。显然断层运动不可能给温泉的形成提供足够的热源。跃进桥附近地壳浅部无年轻岩浆侵入岩体,故不存在岩浆热等附加热源。因此,可以认为,地幔热流和上地壳含放射性元素衰变产生的地壳热流构成了跃进桥温泉地热系统的热源。

5.2 热通道

受区域性怒江断裂带影响,区内断裂构造发育,发育有怒江断裂、田米断裂、称嘎断裂、登埂河断裂和 F1 断层。其中,怒江断裂为区内的主干断裂,控制了区域内的沉积建造及构造格局,分布于研究区怒江右岸,为西侧的元古界高黎贡山群深变质岩与东部古生代沉积建造的分界。田米断裂为怒江断裂的分支断裂,其走向与怒江断裂平行分布。称嘎断裂分布于研究区怒江左岸,根据勘探资料揭示,该断裂在研究区内出露宽度及形态变化较大,破碎带宽度相对较小。登埂河断裂走向为近 EW、陡倾,规模相对 SN 向区域性断裂小,但将近 SN 走向的区域性断裂错断。

称嘎断裂、F1 断层为跃进桥温泉的主要导热断层,该断层延伸较长,总体呈近南北展布,在下游登埂河乡村公路边坡上出露,断裂带两侧岩石破碎、裂隙网络发育,为地下水富集和热水对流提供的必要的空间。该既沟通了深部的热源,也为地下水深循环并在沿途吸收深部传导上来的热量,然后在水压差、密度差作用下向上运移提供了必要的通道,起到了导热导水的作用。

5.3 热水的补给、径流和排泄

根据地下水同位素特征和水文地质条件分析,温泉补给高度在海拔 $2\ 000\ \text{m}$ 左右,补给水源地为元古界高黎贡山群上亚群和寒武系上统保山组附近的怒江断裂和田米断裂。该区接受大气降水补给后,经一定的地表径流,沿怒江断裂和田米断裂下渗,其中,沿田米断裂入渗的地下水主要在三叠系中统河湾街组灰岩中径流,然后地下水沿沟通了怒江断裂和田米断裂的次级断裂,运移至石炭系下

统铺门前组灰岩(主要的径流区),受石炭系上统丁家寨组隔水层的限制,继续向深部径流,径流到一定深度,最后受石炭系上统卧牛寺组玄武岩(隔水层)的阻隔和怒江河谷切割的影响,温泉水沿三叠系中统河湾街组和石炭系上统卧牛寺组的地层界线-断层 F1 出露,概念模型见图 4。

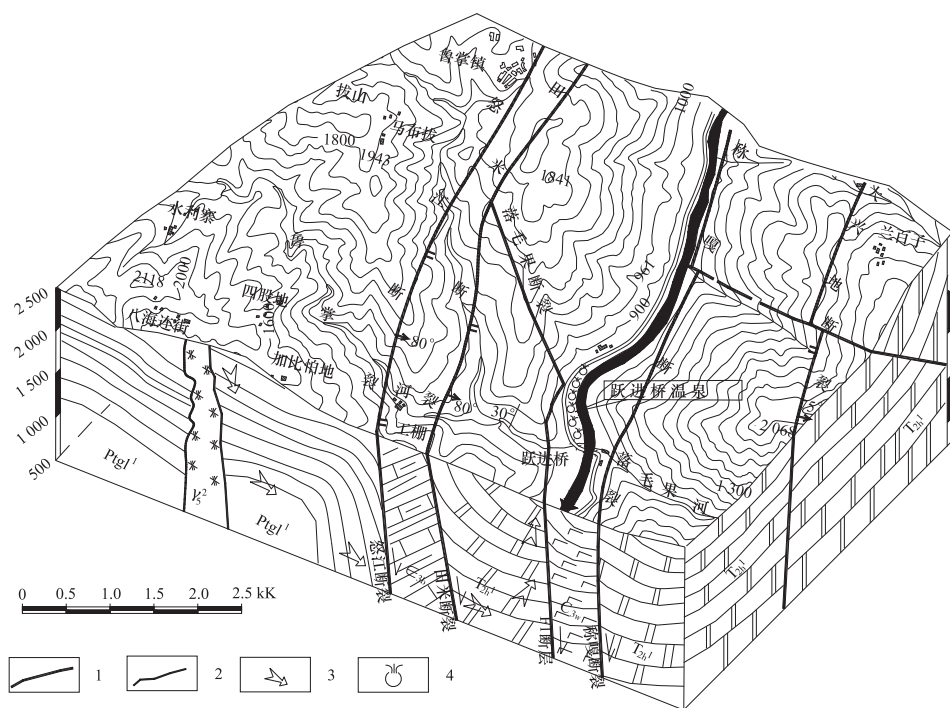
6 结论

(1) 跃进桥处在南北向、东西向断裂系列的交汇处,这些断裂大部分属于张性断裂,是构成温泉热水上升的主要通道。

(2) 温泉实测水温为 49°,属于中低温热水;水化学类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 型;根据温泉水化学元素与同位素分析,温泉水源为大气降水,而非内生水成因, $\delta^{18}\text{O}$ 稳定同位素确定其补给高程约为 2 000 m。

(3) 跃进桥温泉成因模式为在高热流区域热背景下,大气降水在向地壳深处渗流过程中,随着深度的增加温度而升高,然后在适宜的条件下又沿着导水的构造裂隙流至地表形成温泉,温泉具有随大气圈的影响而波动的明显规律性。

(4) 跃进桥温泉群与怒江水有混合关系,一旦地表水受到污染,温泉水也将发生水质的改变,进而影响到当地“澡堂会”风俗民俗的传承。



1—地层界线;2—区域性大断层;3—地下水径流方向;4—温泉
图 4 跃进桥温泉群成因模式三维立体图

参 考 文 献

1 王大纯,张人权,史毅虹,等. 水文地质学基础. 北京:地质出版社,1994:54—69
2 张惠,张新基. 水文地质学中的环境同位素. 郑州:黄河水利出版社,2006:1:144—206
3 于津生,张鸿斌,虞福基,等. 西藏东部大气降水氧同位素组成特征. 地球化学,1980;2:113—121

4 王增银,刘娟,王涛,等. 锶元素地球化学在水文地质研究中的应用进展. 地质科技情报,2003;22(4):91—95
5 Qin Dajun, Wang Hao. Chlorofluorocarbons and $^3\text{H}/^3\text{He}$ in groundwater-Applications in tracing and dating young groundwater. Science in China; Series E, 2001;44(s1):29—34
6 刘承志. 云南温泉之分布规律及其与地质构造关系. 地质论评,1966;24(3):211—220
7 覃玉玺,潘用泛. 云南省温泉区划与地震空间关系的初步探讨. 地震研究,1982;5(2):200—202

Chemistry Characteristics and Formation Analysis of Hot Spring on Yuejingqiao of Lu River

QU Li-li¹, XU Shi-guang^{1,2}, YANG Xiu-mei³, GAO Chuan-yuan¹

(Kunming University of Science and Technology¹, Kaming 650093, P. R. China;

Yunnan Bureau of Geography and Mining, Kunming 65100, P. R. China;

Bureau of Geological Savrvey of Yunan Province³, Kunming 650000, P. R. China)

[**Abstract**] Yuejingqiao hot spring is Rise Springs. The hot water chemical type is HCO_3^- - Ca^{2+} . According to analysis of the stable isotope δD , $\delta^{18}\text{O}$, source of the hot spring water is mospheric water; $\delta^{18}\text{O}$ stable isotopes determine that the supply elevation is 2 050 m. The ^3H radioactive isotope recognizes the age of hot springs water as (10 ~ 20) years. The heat of the springs comes from the area of high heat flux background, Chengka and F1 faults play the role of thermal and water conductivity. The formatiion model is low-temperature geothermal systems which the atmosphere water recharge and infiltration circular by fault.

[**Key words**] Yuejingqiao hot spring water chemistry characteristics formatiion mode