

潘明,郝彦珍,吕勇,等. 云南昌宁橄榄河热泉水化学特征及复合成因机制研究[J]. 中国岩溶, 2021, 40(2): 281-289.
DOI: 10. 11932/karst20210208

云南昌宁橄榄河热泉水化学特征 及复合成因机制研究

潘明^{1,2,3}, 郝彦珍^{2,3}, 吕勇^{2,3}, 李波¹

(1. 昆明理工大学国土资源工程学院, 云南 昆明 650093; 2. 中国地质科学院岩溶地质研究所, 广西 桂林 541004; 3. 自然资源部广西岩溶动力重点实验室, 广西 桂林 541004)

摘要:通过对橄榄河温泉盖层和热储层地质体的岩性和构造特征分析,依据水化学数据,利用Piper三角图解法、同位素水文学方法和地球化学温标等方法,对橄榄河温泉地下热水的水化学类型、补给机制、热储特征和冷热水混合机制等关键问题进行了分析。结果表明地下热水源于大气降水补给,且地下热水在上升至地表的过程中与浅层冷水发生着混合,冷水混入比例约为62%~64%;温泉水化学类型为HCO₃-Na型,表明热水化学组分与围岩化学成分之间具有耦合关系;地下热水循环深度约2 070 m,橄榄河温泉的成因受控于柯街深大断裂,其控制着地下热水的储存、运移和混合程度。研究成果填补了橄榄河热泉的相关研究空白,为该温泉的开发利用提供了科学支撑。

关键词: 云南; 温泉; 水化学; 同位素; 柯街断裂

中图分类号: P314 **文献标识码:** A

文章编号: 1001-4810(2021)02-0281-09 **开放科学(资源服务)标识码(OSID):**



0 引言

地热能是来自地球深处的可再生能源。云南省位于特提斯地热带中部,是我国大陆新近地史时期构造活动最活跃、最强烈的地区之一,中低温地热资源广泛分布^[1-3],温泉是地热资源在地表最直接的表现形式。同时,云南地处亚欧板块和印度板块结合部位,复杂的地质构造和十分发育的深大断裂,是温泉形成的主要因素^[4-5],此外,受控于岩浆活动的温泉类型在滇西南地区也最为典型^[6-7]。近年来,国内外对温泉的研究主要集中于水化学类型^[8-9]、热储特征^[10]和形成机制等方面^[11-12],关于温泉中微生物的研究成果也十分丰富^[13-14],此外,对活动断裂附近温泉中稀有气体与地震耦合关系的研究方法也日臻成

熟^[15-17]。保山市是国家实施“桥头堡”战略和“一带一路”战略的前沿,区内温泉资源十分丰富,具有热储量大、水质好、水温高和用途广等特点。

1:20万保山幅区域水文地质普查,将昌宁县地热资源划分为3个主要区域,分别为柯街-卡斯街分布区、昌宁小桥街分布区和澜沧江断裂带分布区,其中橄榄河温泉位于柯街地热分布区^[18]。已有成果已对该温泉做了简要介绍,但是缺乏高精度的水化学数据以及基于此的相关研究。本文拟结合其他学者对研究区附近昌宁温泉乡温泉^[19]和卡斯河谷温泉^[4]、高黎贡山苏帕河电站热泉^[20]、黄瓜箐温泉^[21]等研究成果,开展橄榄河天然地热泉的水化学特征及成因机制研究,有助于填补该温泉的相关研究空白,如地下水补给类型、补给高程、热储深度和温度、以及

基金项目:中国地质科学院岩溶地质研究所基本科研业务费项目(编号2020014);中国地质调查局地质调查项目(12120114042601)、(DD20190022)和(DD20190342)

第一作者简介:潘明(1985-),男,助理研究员,在读博士研究生,研究方向:构造地质学。E-mail:panming@mail.cgs.gov.cn。

通信作者:郝彦珍(1984-),女,助理研究员,硕士,研究方向为水文地质。E-mail:haoyanzhen@mail.cgs.gov.cn。

收稿日期:2021-01-10

温泉形成机制等内容,进而深化对研究区中低温地热场的认识,为温泉的开发利用提供科学支撑。

1 研究区概况

1.1 热泉简况

研究区年平均气温 19℃,年降雨量 960 mm,降雨集中在 5-10月,占全年降雨量的 80%以上^[18]。橄

榄河温泉位于昌宁县柯街镇境内(图 1),西北距保山市 50 km,东南距昌宁县城 46 km,因温泉出露在橄榄河畔而得名。泉口位于河谷北侧,与河谷水面高差约 20 m,水质清澈透明,具有较轻硫磺味,钙华较少。据实地调查,橄榄河温泉的泉眼有 10 多处,主泉从岩石中喷涌而出,最大泉眼出水量 $0.025 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$,水温常年处于 80℃以上,富含钾和钠等多种化学元素。



图 1 橄榄河温泉区地质构造简图

Fig. 1 Simplified geologic map of Ganlanhe spring area

1.2 构造特征

研究区地质构造复杂,深大断裂发育,地热资源十分丰富,从其分布特点来看,温泉活动与断裂有明显的关系,主要沿断裂带或其边缘附近分布。其中柯街断裂(F1)是研究区内主要构造形迹,根据最新地球物理资料显示,其走向为北东向,断面向南东倾斜,倾角 $60^\circ \sim 90^\circ$,为深切割型断裂^[22]。该断裂对古生代,尤其是晚古生代以来的变质作用和岩浆活动均有明显的控制作用。橄榄河温泉位于柯街断裂东侧约 3 km,受侵入接触面和韧性剪切带双重控制,发育的节理和裂隙为地下水的运移提供了良好通道。

1.3 围岩特征

研究区内地层繁多,岩性复杂,除白垩纪地层缺

失外,寒武纪至第四纪地层均有出露,温泉附近区域主要出露燕山晚期侵入岩,呈岩株产出,岩体内部以灰白色黑云母花岗岩为主,南部边缘为灰白色中细粒糜棱岩化细粒二长花岗岩。围岩蚀变在岩体南部较为发育,岩石普遍具轻微绢云母化和黑云母化。新元古界允沟岩组地层(Pt_3y) 在岩体南面出露,主要为一套二云片岩和少量大理岩。

通过对泉口附近岩石采样,薄片鉴定结果显示细粒二长花岗岩具糜棱岩化特征(图 2A),其主要成分为钾长石、斜长石、石英和绢云母,副矿物为锆石、磷灰石、电气石和赤铁矿。钾长石以正长石为主,少量条纹长石,大小 $0.1 \sim 1.5 \text{ mm}$,碎裂、微裂隙发育,被少量绢云母和细小黑云母充填。

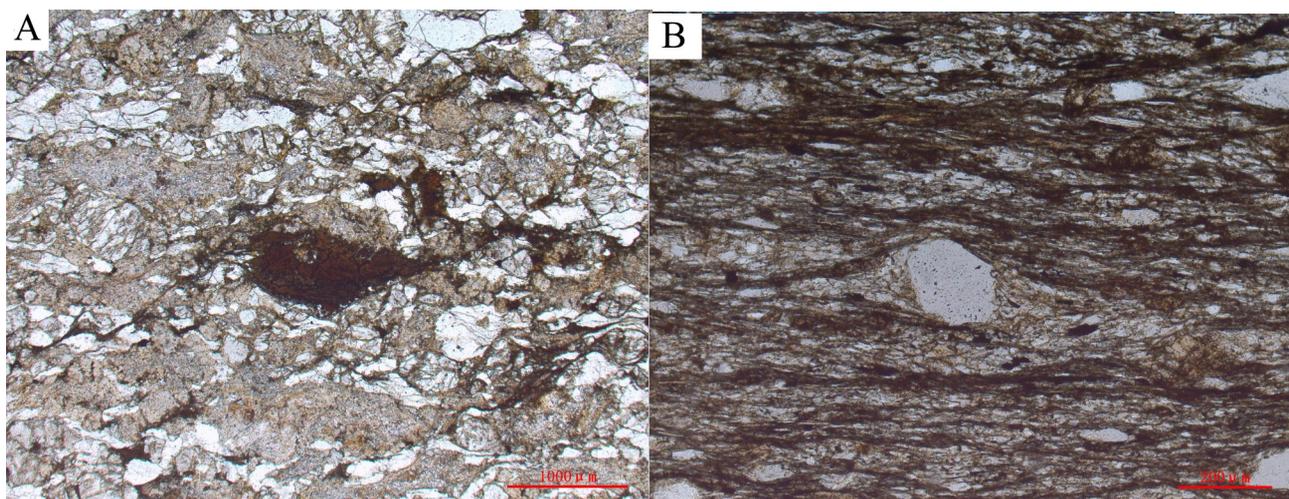


图2 岩石薄片显微照片

Fig. 2 Photomicrographs of rock slices

A—二长花岗岩 B—二云母片岩

二云母片岩(图2B)以黑—白云母和石英为主,并含有少量的长石,约占3%,电气石约占1%,锆石 $\leq 0.05\%$,磷灰石约占1%。鳞片状矿物黑云母、白云母含量为67%~77%;石英呈细小粒状,分布在云母间,亦作薄层状分布。岩石具明显的片状构造,副矿物见电气石、磷灰石和锆石不均匀混杂于其中。

2 样品与分析

2.1 采样与测试

泉口热水的温度和pH由便携式水质分析仪(美国Hach公司)现场测定。本次共采集4份测试样品,分别用于阴离子、阳离子、微量元素和 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素分析。阴离子和阳离子样品用清洁的500 mL容量PVC瓶采集,采样之前用现场水样润洗瓶子3次,采集时灌满不留气泡并用封口膜密封;微量元素样品采集方法与上述方法相同,但需在瓶内滴2~3滴1:1优级纯硝酸,调节 $\text{pH}<2$; $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素样品用50 mL容量PVC瓶采集,方法同阴阳离子样品采集相同。泉口处由数根钢管将热水直接引出,排出过程无任何人为污染或其他水体混入,实测泉温达80℃,属中低温地热型温泉^[8]。样品测试工作在中国地质科学院岩溶地质研究所、国土资源部岩溶地质资源环境监督检测中心完成,水质全分析检测仪器型号为IRISIntrepid II XSP全谱直读等离子体光谱仪和861型离子色谱仪。 $\delta^{18}\text{O}$ 、 δD 同位素分析测试仪器为离轴整合积分腔光谱输出技术(OA2ICOS)的液态水

稳定同位素分析仪(LWIA-24d, LOS Gatos Research, UAS)。结果以V-SMOW标准给出,精度分别为 $\pm 0.6\text{‰}$ 和 $\pm 0.2\text{‰}$,分析误差绝对值 $<2\text{‰}$ 。测试结果列于表1。

表1 温泉水化学分析结果($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)Table 1 Chemical compositions of groundwater from Ganlanhe hot spring ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)

温度/℃	高程/℃	K^+	Na^+	Ca^{2+}	Mg^{2+}	NH_4^+
80	1 096	1.5	89.1	1.51	0.16	0.03
TFe	Cl^-	SO_4^{2-}	HCO_3^-	CO_3^{2-}	F^-	NO_3^-
0.015	5.55	16.15	91.24	24.75	20.73	1.09
NO_2^-	SiO_2	Mn	pH	TDS		
0.01	73.58	0.002 2	8.95	267.4		

2.2 温泉水化学特征

热泉泉口处由数根钢管将热水直接引出,排出过程无任何人为污染或其他水体混入,测试过程也严格遵循相关实验要求,数据具有较高的可信度。测试结果显示该温泉水矿化度 $4.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,热水中固形物含量 $267.4\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$,属于低矿化度水,pH为8.95,属碱性,显岩浆岩区地下热水特征。优势阳离子成份为 Na^+ ,占主要阳离子含量约95.5%, K^+ 、 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 含量极低;优势阴离子为 HCO_3^- ,占主要阴离子含量约66.3%,其次为 CO_3^{2-} (图3)。应用Piper图解分析,温泉水化学类型为 HCO_3^- -Na型(图4),推测主要是因为温泉热储层和盖层主要为花岗岩和变质

岩,岩石中大量的铝硅酸盐矿物,如钠长石,在 CO_2 和 H_2O 的参与下可以形成以 HCO_3^- 和 Na^+ 为主的低矿化水^[21],反应式如下:

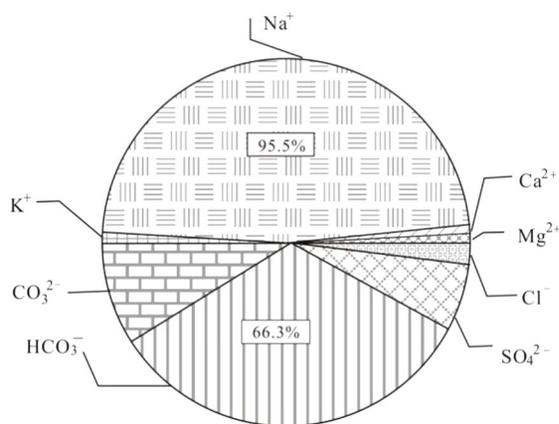
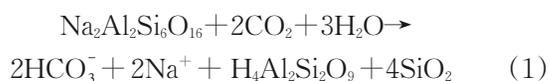


图3 温泉热水中主要离子含量饼图

Fig. 3 Chart of major ions in hot water of Ganlanhe spring

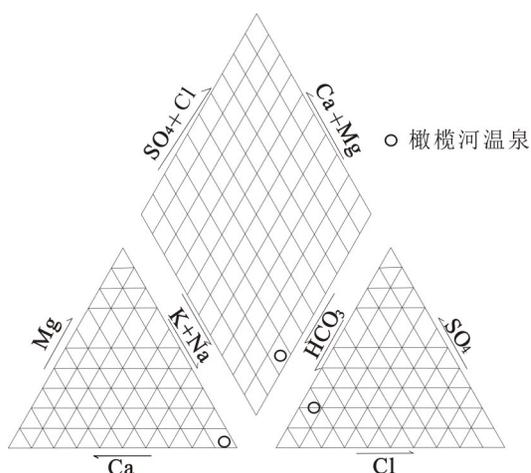


图4 温泉水样Paper图解

Fig. 4 Piper trilinear chart of hot water samples

氟在地下水中的含量差别很大,一般的浅层地下水中的氟含量小于 $1.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而来自深部的地下热水中F含量通常较高^[24]。橄榄河温泉样品中氟离子的含量很高(大于 $10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)与腾冲地区的氟含量($18.2 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)相似^[25]。氟含量超过饮用水标准,不能饮用,但具有一定的医疗用途。在自然界中,氟盐及含氟硅酸盐矿物及一些含羟基的矿物(如白云母、黑云母和磷灰石)是地下水中氟的主要来源^[26-27]。由上文可知,泉口附近出露岩石样品中含有云母、磷灰石和电气石,可能是岩石中的含氟矿物经溶解和水解作用,导致了地下热水中氟含量的增加。

水化学数据显示,样品中Mn的含量很低,为 $0.0022 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,而阳离子中Ca的含量也只有 $1.51 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,结合滇西其它典型温泉(昌宁温泉乡温泉^[19]和卡斯河谷温泉^[4]、高黎贡山苏帕河电站热泉^[20]和黄瓜箐温泉^[21])的水化学数据发现,Mn与Ca含量的关系对地下水循环区域岩性特征具有重要的指示意义。根据Mn和Ca含量的不同,图5被划分成三个区域:即以低锰低钙为特征区域,代表为橄榄河温泉和黄瓜箐温泉,表示地下热水主要流经了岩浆岩和变质岩区域;以较高锰含量为特征的区域,代表温泉为卡斯河谷温泉和苏帕河电站热泉,表明地下热水流经了碎屑岩区域;以低锰高钙为特征的区域,代表温泉为昌宁温泉和高黎贡山岩溶泉,表明地下热水流经碳酸盐岩区域。泉水中Mn和Ca含量不同的主要原因是砂岩和页岩等碎屑岩中富含绿泥石等含Mn矿物,而碳酸盐岩中则有大量富钙的矿物成份。

3 讨论

3.1 地下水补给类型

分析大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 在不同地区的分布特点,及其与各种环境因素之间的因果关系,有助于定性或定量地解决地下水的起源和成因,区分补给源区和补给高程等水文学问题^[28-29]。大气降水的同位素组成变化很大,同一地区不同时间的降水,其同位素组成也会有很大差异^[30],刘进达等通过汇总全国20多个监测站台1985-1993年大气降水的同位素监测数据,用最佳主轴线法求得中国西南区大气降水线方程^[31]:

$$\delta\text{D} = 7.54\delta^{18}\text{O} + 4.84 \quad (2)$$

根据表2绘制出橄榄河温泉和云南省其他县市的6个温泉的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 与中国西南大气降水线关系图(图6)。橄榄河温泉的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值分别为 -82.5‰ 和 -11.58‰ ,由图6可以看出大部分地区样品的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值均在大气降水线上,这一点与腾冲大滚锅温泉形成鲜明对比,大滚锅温泉属于火山、岩浆型热源,具有明显的氧同位素正漂移现象,而橄榄河温泉具有现代大气降水的氢氧同位素组成特征,地下热水的补给来源是大气降水,证明其隶属于正常的地热增温型的地热资源。

3.2 地下水补给高程

大气降水的 δD 和 $\delta^{18}\text{O}$ 值具有随高程增加而减小

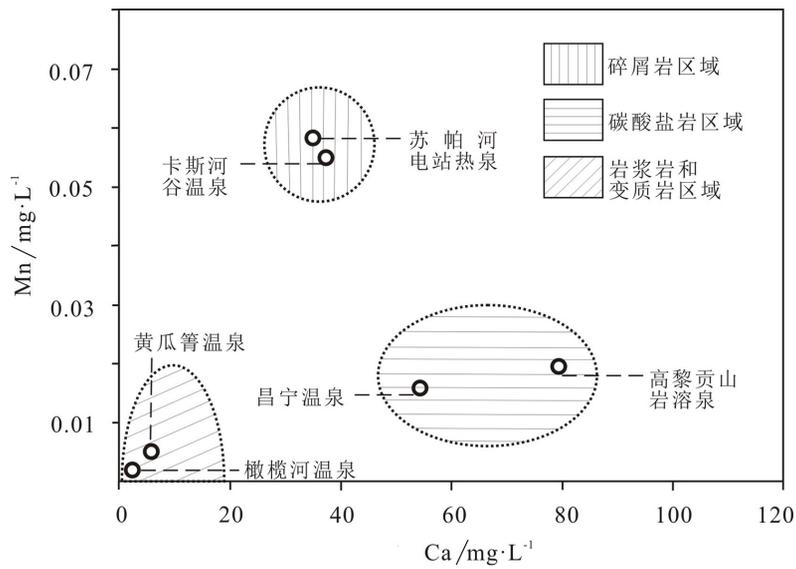


图 5 Mn-Ca 分析图解

Fig. 5 Diagram illustration of Mn-Ca analysis

表 2 云南省部分温泉 δD、δ¹⁸O 含量

Table 2 Contents of δD and δ¹⁸O of some hot springs in Yunnan Province

温泉	安宁天下第一汤 ^[8]	昌宁温泉乡温泉 ^[19]	龙陵邦腊掌大滚锅 ^[21]	腾冲大滚锅 ^[21]	大理下关温泉 ^[8]	昌宁玉地里温泉 ^[32]	橄榄河(本文)
δ¹⁸O/‰	-12.3	-11.1	-9.9	-7.2	-13.8	-11.77	-11.58
δD/‰	-86	-76	-68	-63	-102	-80.2	-82.5

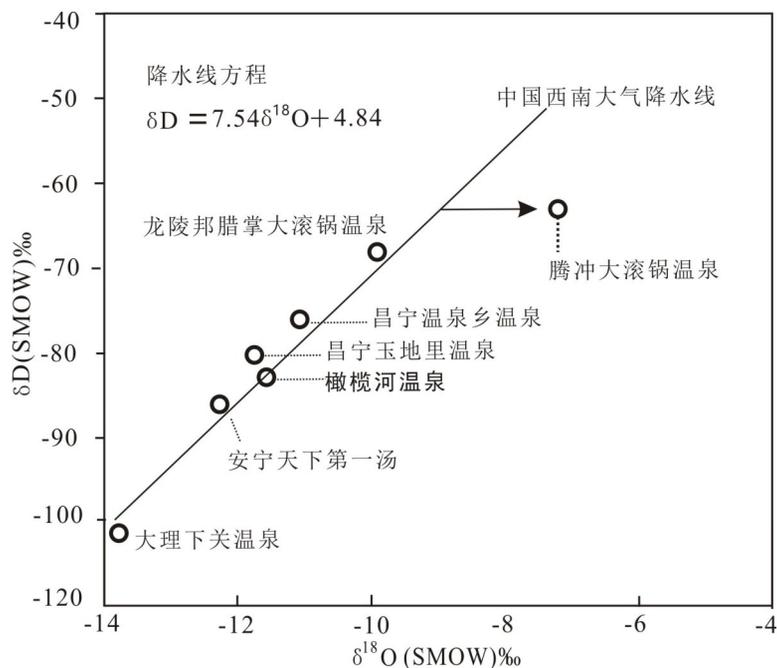


图 6 温泉水氢氧同位素组成

Fig. 6 Isotopic composition of hydrogen and oxygen

的高程效应,其高程效应梯度通常在-1.2‰~-4‰/100m 和 0.15‰~0.5‰/100 m^[31]。通过于津生

等^[34]对川西、藏东地区 δ¹⁸O 高程效应的研究,其梯度值为-0.26‰/100m,即高程每增加 100 m,δ¹⁸O 减少

0.26‰,据此可以确定地下水补给区的海拔高程:

$$H=100(\delta_{\text{样}}-\delta_{\text{雨}})/k+h \quad (3)$$

H —为补给区海拔高度(m); h —样品点的海拔高度(m); $\delta_{\text{样}}$ —样品的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; $\delta_{\text{雨}}$ —温泉附近大气降水的 $\delta^{18}\text{O}$ 值; k —大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 值的高度梯度(‰/100 m)。选择 $k=-0.26\text{‰}/100\text{m}$,大气降水 $\delta^{18}\text{O}=-9.13\text{‰}$ ^[35]。由式(3)可计算出橄榄河温泉的大致补给高程为2 038 m,高于泉口附近高程近1 000 m,说明温泉循环途径复杂,循环过程中发生了较为充分的水岩作用。综合研究区的地形和构造发育状况,橄榄河温泉的补给源主要是其东部山区,补给高程约2 038 m。

3.3 热储温度计算

深部热储温度是划分地热系统的成因类型和评价地热资源潜力等不可或缺的重要参数^[36]。利用地热温标方法可以估算地下热水的热储温度,常用的地热温标有二氧化硅温标、阳离子温标和同位素温标^[37]。在对橄榄河温泉的热储温度进行估算前,首先用Giggenbach提出的Na-K-Mg三角形图解法对地下热水的平衡状态和类型进行划分^[38]。图中分为完全平衡、部分平衡和未成熟水(处于岩石溶解淋滤过程中的水)3个区域。将温泉水投到该图(图7)上可以发现,本次研究的橄榄河温泉水位于部分平衡水区域,水-岩相互作用尚未达到完全平衡,说明Na、K、Mg地热温标法不适用于该温泉。

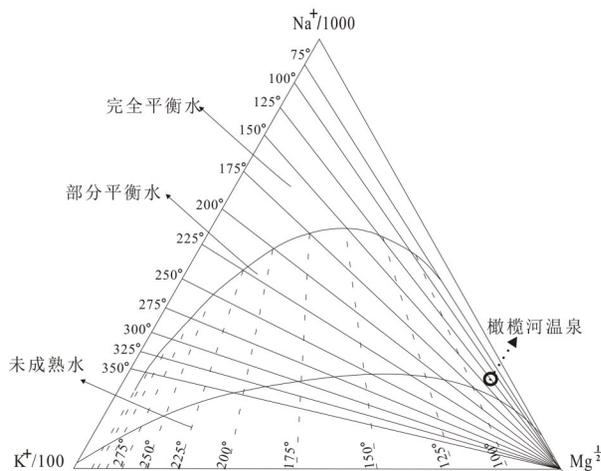


图7 温泉水的Na-K-Mg三角图解

Fig. 7 Na-K-Mg triangular diagram of hot spring water

由于石英和无定形二氧化硅的溶解度在小于300 °C的温度下几乎不受压力和附加盐度的影响,这一特点使得二氧化硅可作为地热温标^[38],运用

公式^[33]:

$$T=1309/(5.19-\lg C_{\text{SiO}_2})-273.15 \quad (4)$$

式中: T 代表无蒸汽损失石英温标计算的热储温度(°C); C_{SiO_2} 代表 SiO_2 的质量浓度($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)。计算结果显示橄榄河温泉的热储温度为121 °C,这一结果与图7中样品点所处位置对应的热储平衡温度相近。

3.4 热储深度的估算

橄榄河温泉位于柯街断裂东侧,大断裂使地下热水深循环成为可能,其附近破碎带和小型节理等地质构造有利于水体的运移,促进地表水的入渗和冷热水的混合。温泉水热储温度和当地地温梯度是计算温泉水循环深度的两个重要因素^[36]。依据前人资料^[12],将橄榄河温泉的地热增温率设置为20 m/°C。热储埋藏深度计算公式如下^[40]:

$$S=t(T-T_0)+h \quad (5)$$

式中: S 为热储深度(m); t 为地热增温级($\text{m}\cdot\text{°C}^{-1}$),是地温梯度的倒数,地温梯度取 $0.05\text{°C}\cdot\text{m}^{-1}$ ^[10],则 t 值为20; T 为热储温度(°C); T_0 为补给区多年平均气温(°C),取当地平均气温19 °C; h 为恒温层深度(m),当地年恒温带深度为30 m。上文已计算出该温泉的热储温度为121 °C,据此计算出橄榄河温泉的热水循环深度是2 070 m。

3.5 冷热水混合机制

假定在热储中,流体与石英处于平衡,流体孔隙压力由纯水蒸气压力而定,在上升期间,冷热水发生混合,且 SiO_2 在混合前后没有发生沉淀,那么冷热水混合可能会引发热液的焓值和 SiO_2 含量降低,使其转变成相对应的温泉水的焓值和 SiO_2 含量^[39-40],根据质量守恒定律,设冷水混入的比例为 X ,则地下热水中 SiO_2 的初始含量以及初始焓值与其终焓值和 SiO_2 含量之间的关系方程如下面2个公式^[41],冷水混入的比例分别为 X_1 和 X_2 。

$$H_c X_1 + H_h(1-X_1) = H_s \quad (6)$$

$$\text{Si}_c X_2 + \text{Si}_h(1-X_2) = \text{Si}_s \quad (7)$$

式中: H_c —近地表冷水的焓,依据研究区多年平均气温(19 °C),其焓值为 $19 \times 4.1868\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$; H_h —深部热水的初焓,见表3; H_s —为泉水的终焓值,因泉口处泉水温度为80 °C,对应焓值为 $80 \times 4.1868\text{ J}\cdot\text{g}^{-1}$; Si_c —近地表冷水的 SiO_2 含量,参考附近鸡飞温泉,其值为 $10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[12]; Si_h —深部热水的 SiO_2 初始含量,见表3; Si_s —泉水的 SiO_2 含量,本文实测为 $73.58\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 。将式(6)和(7)转换为 X 的表达式为:

表 3 在选定温度下和对应于蒸汽与液态水共存时的压力下的石英溶解度和液态水的焓^[42]

Table 3 Enthalpies of liquid water and quartz solubilities at selected temperatures and pressures appropriate for coexistent steam and liquid water^[40]

热水初始 温度/°C ^[42]	H _h -深部热水初焓/ ×4.186 8 J·g ⁻¹ ^[42]	Si _h -深部热水 初始 SiO ₂ 含 量/mg·L ⁻¹ ^[42]	H _c -近地表 冷水的焓/ ×41868 J·g ⁻¹	Si _c -近地表 冷水 SiO ₂ 含 量/mg·L ⁻¹	H _s -泉水终焓/ ×4.186 8 J·g ⁻¹	Si _s -温泉水 的 SiO ₂ 含 量/mg·L ⁻¹	X ₁	X ₂
125	125.4	80	19	10	80	73.58	0.43	0.09
150	151	125	19	10	80	73.58	0.54	0.45
175	177	185	19	10	80	73.58	0.62	0.64
200	203.6	265	19	10	80	73.58	0.67	0.75
225	230.9	365	19	10	80	73.58	0.71	0.82
250	259.2	486	19	10	80	73.58	0.75	0.87

$$X_1 = (H_s - H_h) / (H_c - H_h) \quad (8)$$

$$X_2 = (Si_s - Si_h) / (Si_c - Si_h) \quad (9)$$

补给区含水层热水初始温度与溶解态二氧化硅含量的关系可以通过溶液蒸汽压条件下的石英溶解度给出^[41](表 3)。针对差异温度下的一系列焓值和 SiO₂ 含量分析,根据公式 8 可得出每一种焓值下的冷水混入比例 X₁;根据公式 9 可得出每一种 SiO₂ 含量下的冷水混入比例 X₂,结果见表 2。

根据 X₁ 和 X₂ 计算结果,得到橄榄河温泉假设热水温度与冷水份额的关系图(图 8),图中 X₁ 曲线和 X₂ 曲线相交于一点,该点对应的地下热水理论热储温度约为 175 °C,冷水混入比例约为 62%~64%。这一理论结果高于温标计算结果,可能是由于地下热水在与冷水混合之前的运移过程中发生了蒸汽损失或热损失。

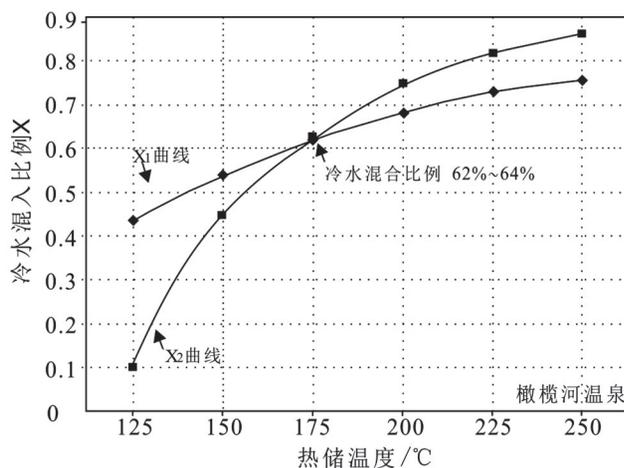


图 8 橄榄河温泉冷水份额与热水温度的关系

Fig. 8 Relationship between fraction of cold water and temperature of hot water in Ganlanhe spring

3.6 温泉成因模式分析

橄榄河温泉海拔 1 096 m, 泉温 80 °C, 热水循环深度约 2 070 m, 属于中低温对流型深循环地热温泉。该温泉地处柯街断裂东侧约 3 km 处, 受侵入接触面和韧性剪切带双重控制, 是构造体系的复合部位, 且该区经历过多次构造运动, 断裂切割较深, 因此, 为深部热流向浅部运移创造了条件。断裂带附近次级断裂、节理、裂隙和面理极其发育, 是大气降水和地下水下渗运移的良好通道; 泉区地层为变质程度不同的糜棱岩化二长花岗岩和石英绢云千枚岩, 岩石中大量的铝硅酸盐矿物, 如长石和云母, 在 CO₂ 和 H₂O 的共同参与下, 形成了以 HCO₃⁻ 和 Na⁺ 为主的低矿化水。同位素示踪研究表明, 橄榄河温泉是大气降水经深循环而成。

根据以上分析, 初步建立了橄榄河温泉的成因模式: 大气降水沿断裂(裂隙)向地壳深部渗流循环, 由于深度逐渐增加, 一方面, 水体与深部围岩不断进行着热量交换, 循环至地下 2 070 m 时, 深部热储形成; 另一方面, 通过系列的水-岩化学反应, 岩石中的部分离子溶解到地下热水中, 使水化学成分得以改变, 形成了 HCO₃-Na 型的地下热水。由于上下部水体的密度及其所受压力的差异性, 致使热水沿有利导水构造上升, 在此过程中热水与冷水发生了一定比例的混合作用, 最终在地质构造有利部位溢流地表。

6 结 论

(1) 橄榄河温泉水温常年处于 80 °C 以上, 属于中低温对流型深循环地热温泉。水化学数据分析表明, 其主要阴离子以 HCO₃⁻ 为主, 主要阳离子以 Na⁺ 为

主,水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型;同位素分析结果说明其地下热水的补给来源是大气降水,补给源区主要是其东部山区,补给高程约2 038 m。应用二氧化硅温标计算出橄榄河温泉的热储温度是121℃,热水循环深度约2 070 m;由混合模型获得的深部热储理论温度为175℃,冷水混入比例为62%~64%;

(2)柯街深大断裂及其次级断裂—节理系统是大气降水和地下水下渗运移的良好通道,也为深部热流向浅部运移创造了条件;围岩中大量的铝硅酸盐矿物,如长石和云母等,在 CO_2 和 H_2O 的共同参与下改造了泉水的化学组份,证明地下热水的化学组成与热水流经区的岩石特征存在耦合关系;

(3)温泉成因模式即大气降水沿断裂(裂隙)向地壳深部渗流循环,由于深度逐渐增加,一方面,导致深部围岩与水体不断进行热量交换,最终形成了深部热储;另一方面,通过系列的水—岩化学反应,形成了 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ 型的地下热水。由于上下部水体的密度及其所受压力的差异性,致使热水沿有利导水构造上升并溢流出地表,形成了橄榄河热泉。

参考文献

- [1] 姚永仲,唐小莉.弥渡温泉地质构造背景探析[J].有色金属设计,2010,37(1):1-5.
- [2] Wang Mengmeng, Zhou Xun, Wang Jieqing, et al. Occurrence, genesis and travertine deposition of the Adong hot springs in northwestern Yunnan of China [J]. *Geothermics*, 2020, 87:101851.
- [3] Zhang Yuqi, Zhou Xun, Liu Haisheng, et al. Geochemistry of rare earth elements in the hot springs in the Simao Basin in southwestern China [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2020, 79(6):1-10.
- [4] 郝彦珍,潘明,吕勇,等.云南昌宁柯街断裂带温泉水化学特征[J].地质科技情报,2014,33(4):191-196.
- [5] Ba Junjie, Su Chuntian, Li Yanqing. Characteristics of heat flow and geothermal fields in Ruidian, Western Yunnan Province, China [J]. *International Journal of Heat and Technology*, 2018, 36(4):1203-1211.
- [6] 赵慈平,冉华,陈坤华.由相对地热梯度推断的腾冲火山区现存岩浆囊[J].岩石学报,2006,22(6):1517-1528.
- [7] 赵慈平,陈有丽,王云,等.云南宁洱—通关火山区最上地壳地热场:构造和岩浆活动意义[J].岩石学报,2014,30(12):3645-3656.
- [8] 苗慧帅.云南省下关温泉和安宁温泉的特征及成因研究[D].北京:中国地质大学,2009:21-32.
- [9] 余琴,杨平恒,王长江,等.重庆市统景温泉水化学特征及混合作用[J].中国岩溶,2017,36(1):59-66.
- [10] 徐刚,伍坤宇,王鹏,等.藏北温泉盆地地热田水文地球化学特征研究[J].中国岩溶,2020,39(3):299-310.
- [11] 李明礼,多吉,王祝,等.西藏日多温泉水化学特征及其物质来源[J].中国岩溶,2015,34(3):209-216.
- [12] 刘亚平,云南省昌宁县鸡飞温泉成因及钙化形成浅析[D].北京:中国地质大学,2009:27-32.
- [13] Urbietta, María Sofia, González-Toril, Elena, Bazán, Ángeles Aguilera, et al. Comparison of the microbial communities of hot springs waters and the microbial biofilms in the acidic geothermal area of Copahue (Neuquén, Argentina) [J]. *Extremophiles*, 2015, 19(2):437-450.
- [14] 马瑞,陈成,李海峰.中国温泉微生物物种多样性及其酶活性研究进展[J].微生物学通报,2020,47(9):2959-2973.
- [15] Wang Y, Liu Y, Zhao C, et al. Helium and carbon isotopic signatures of thermal spring gases in southeast Yunnan, China [J]. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, 2020, 402:106995.
- [16] Lei Zhang, Lishuang Guo, Yun Wang, Dongying Liu, Yao-wei Liu, Jing Li. Continuous monitoring of hydrogen and oxygen stable isotopes in a hot spring: Significance for distant earthquakes. *Applied Geochemistry*, 2020:104488.
- [17] 王云,李其林,冉华.青藏高原东南缘地热与地震活动:来自氦同位素的约束[J].矿物岩石地球化学通报,2018,37(4):652-662.
- [18] 中国人民解放军零零九三九部队,中华人民共和国区域水文地质普查报告:保山幅[R].1980,148-170.
- [19] Ba Junjie. Geochemical features, Isotope Compositions and environmental impacts of hot springs in Kejie fault and Changning-Menglian structural belt [J]. *Applied Ecology and Environmental Research*, 2019, 17(4):9007-9024.
- [20] 李向全,侯新伟,周志超,等.高黎贡山南段主要热泉水化学同位素特征研究[J].中国地质,2011,38(5):1347-1354.
- [21] 刘永涛.云南省龙陵县邦腊掌温泉水文地球化学与间歇喷泉研究[D].北京:中国地质大学,2009:21-40.
- [22] 韩凯,甘伏平,陈玉玲,等.柯街断裂北段的结构特征及地质意义研究[J].地球物理学进展,2015,30(1):70-76.
- [23] 谭梦如.云南西双版纳地区部分温泉水化学和同位素特征及成因研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018:1-68.
- [24] 孙红丽,马峰,刘昭,等.西藏高温地热显示区氟分布及富集特征[J].中国环境科学,2015,35(1):251-259.
- [25] 刘明亮,曹耀武,王敏黛.腾冲热海热泉水化学组分来源及其形成机制探讨[J].安全与环境工程,2014,21(6):1-7.
- [26] Chen Zhengshan, Yang Jingyuan, Zhu Lijun, et al. Classification of typical hot springs and their relationship with health in Guizhou, China [J]. *Environmental geochemistry and health*, 2020:1573-2983.
- [27] 徐立荣.地层—地下水系统中的氟[M].郑州:黄河水利出版社,2012.1-10.
- [28] 陈中笑,程军,郭品文,等.中国降水稳定同位素的分布特点及其影响因素[J].大气科学学报,2010,33(6):667-679.
- [29] 罗维均,王世杰,刘秀明.中国大气降水 $\delta^{18}\text{O}$ 区域特征及其对古气候研究的意义[J].地球与环境,2008,36(1):47-55.
- [30] 谭梦如.云南西双版纳地区部分温泉水化学和同位素特征及

- 成因研究[D].北京:中国地质大学(北京),2018:1-68.
- [31] 刘进达,赵迎昌.中国大气降水稳定同位素时—空分布规律探讨[J].勘察科学技术,1997,(3):34-39.
- [32] 潘明,吕勇,郝彦珍,等.云南昌宁玉地里温泉水文地球化学特征及形成模式[J].地球与环境,2015,43(1):98-103.
- [33] 文蓉,田立德,翁永标,等.喜马拉雅山南坡降水与河水中 $\delta^{18}\text{O}$ 高程效应[J].科学通报,2012,57(12):1053-1059.
- [34] 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[J].地球化学,1980,(2):113-121.
- [35] 李向全,侯新伟,周志超,等.高黎贡山南段主要热泉水化学同位素特征研究[J].中国地质,2011,38(5):1347-1354.
- [36] 王莹,周训,于溪,等.应用地热温标估算地下热储温度[J].现代地质,2007,21(4):605-612.
- [37] 方斌,周训,梁四海.青海贵德县扎仓温泉特征及其开发利用[J].现代地质,2009,23(1):57-63.
- [38] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na—K—Mg—Ca geothermometers [J]. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 1988(52): 2749-2765.
- [39] 周训,金晓媚,梁四海,等.地下水科学专论(第二版.彩色版)[M].北京:地质出版社,2017:75-76.
- [40] Truesdell A H, Fournier R O. Procedure for estimating the temperature of a hot—water component in a mixed water by using a plot of dissolved silica versus enthalpy[J]. *Journal of Research United States Geological Survey*, 1997,5(1):49-52.
- [41] Fournier R O, Truesdell A H. Geochemical indicators of subsurface temperature—Part 2, Estimation of temperature and fraction of hot water mixed with cold Water[J]. *US Geol. Survey*, 1974,3(2): 263-270.

Hydrochemical characteristics and composite genesis of a geothermal spring in Ganlanhe, Changning, Yunnan Province

PAN Ming^{1,2,3}, HAO Yanzhen^{2,3}, Lv Yong^{2,3}, LI Bo¹

(1. Faculty of Land Resources Engineering, Kunming university of Science and Technology, Kunming, Yunnan 650093, China; 2. Institute of Karst Geology, Chinese Academy of Geological Sciences, Guilin, Guangxi 541004, China; 3. Key Laboratory of Karst Dynamics, MNR & GZAR, Guilin, Guangxi 541004, China)

Abstract This paper presents an analysis of lithology and structural characteristics of cap rock and the thermal reservoir of the Ganlanhe hot spring. It covers hydrochemical types, recharge mechanism, thermal reservoir characteristics and mixing mechanism of hot and cold water. The analysis is based on hydrochemical data, using the piper triangle diagram, isotope hydrology method and the geochemical temperature scale. The results show that the underground hot water is supplied by atmospheric precipitation, mixed with the cold water from the shallow subsurface during the process of hot—water rising to the surface, and the proportion of cold water mixing is about 62%—64%. The chemical type of hot spring water is $\text{HCO}_3\text{—Na}$, which indicates that there is a coupling relationship between the chemical composition of hot water and the surrounding rocks. The circulation depth of underground hot water is about 2,070 m. The formation of the Ganlanhe hot spring is closely related to the Kejie fault, which controls the storage, migration and mixing degree of underground hot water. The research results fill the gap of the research on the Ganlanhe hot spring and provide scientific support for its development and utilization.

Key words Yunnan, hot spring, hydrochemistry, isotope, Kejie fault

(编辑 张玲)