

# 高黎贡山南段主要热泉水化学同位素特征研究

李向全<sup>1</sup> 侯新伟<sup>1</sup> 周志超<sup>1</sup> 刘玲霞<sup>1</sup>  
王振兴<sup>1</sup> 蒋良文<sup>2</sup> 杜宇本<sup>2</sup> 邓宏科<sup>2</sup>

(1. 中国地质科学院水文地质环境地质研究所, 河北 石家庄 050061;

2. 中铁二院工程集团有限责任公司, 四川 成都 610031)

**摘要:**笔者应用水化学同位素技术,对高黎贡山南段主要热泉成因及循环特征进行了研究,取得了一些重要认识。研究区热泉水为低矿化、碱性、Na-HCO<sub>3</sub>型水;热泉水主要为大气降水起源,循环速率较快,水岩作用不充分,径流环境多处于相对开放的氧化环境之中。以黄草坝泉、三官泉特征比较明显;地下水补给区主要位于泉点附近高程在 1800 m 的区域范围之内,为附近区域大气降水补给形成;存在浅层、深层两种混合作用形式,黄草坝泉、三官泉现代大气降水混合比在 90%以上;热泉热储温度为 100~200℃,循环深度在 2000~4000 m。

**关键词:**高黎贡山;热泉;水化学;同位素

**中图分类号:**P641.3      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-3657(2011)05-1347-08

滇西地区是中国典型的地热异常区。目前,随着西南铁路网向该区的延伸,如何选择适宜铁路建设的低温走廊地带,已成为关乎铁路建设成败的重大工程问题。因此开展本区热泉形成机制研究具有重要现实意义。

长期以来,国内外学者对这一地区的地热异常成因及热流活动特征开展了大量研究工作。如云南腾冲热海热田的热储特性<sup>[1]</sup>,腾冲热海地热田气相组分的定量分析及其意义<sup>[2]</sup>,云南腾冲地区现代地热流体活动类型<sup>[3]</sup>。上述研究以腾冲热海为重点区域,并侧重热流起源类型的研究。在上述工作基础上,本次籍助于铁道部科技研发课题“大瑞铁路复杂地质艰险山区重大工程地质问题研究”,将高黎贡山南段热泉群作为研究工作重点,从热泉起源、循环速率、运移途径、与现代水转化关系、水岩石作用形式、影响区域等方面,深化本区水-热活动研究,取得一些重要的认识,从而为铁路线路设计提供重要的科学依据。

## 1 区域地质概况

研究区地处印度板块与欧亚板块碰撞缝合带附近之滇缅泰亚板块内,属青、藏、滇、缅巨型“歹”字型构造西支中段弧形构造带与经向构造带复合之“蜂腰部位”南段。深大活动断裂发育。SN 向转 SW 向弧形构造带、SN 及 NE 向构造带构成区内“A”字型构造格架体系<sup>[4]</sup>。

区内地层繁多,岩性复杂,除白垩系缺失以外,寒武系至第四系均有出露。其中高黎贡山群是一套中寒武—前寒武纪变质岩系,构成了高黎贡山中、南段山体的主要岩性。不同期岩浆岩均有分布(喜山期、燕山期、印支期以及加里东晚期—华力西中期)。

岩浆侵入活动的规模由东南到西北逐渐增大,空间上由深→中深→浅喷发。其中怒江断裂以西地区,以北东—南西向弧形构造带和近南北向构造带交替出现,具有多期多阶段持续活动的特点,加之断裂构造的控制,对地下热水活动起到明显的控制作用(图 1)。

收稿日期:2010-12-24;改回日期:2011-04-18

基金项目:铁道部科技研发课题(2008G027-A-1,2008G027-C-2)及国家自然科学基金项目(40672169)资助。

作者简介:李向全,男,1966年生,博士,教授,主要从事水文地质、环境地质研究;E-mail:lxqm2003@yahoo.com.cn。

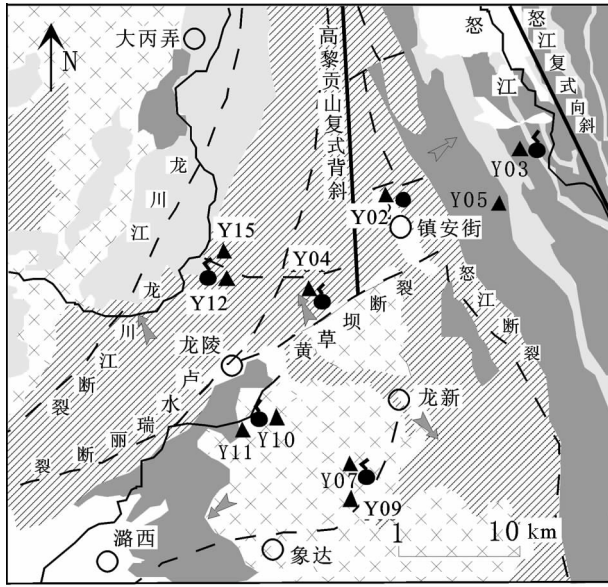


图 1 高黎贡山南段区域地质略图  
 Fig.1 Geological map of southern Gaoligong Mountain

高黎贡山越岭地段所处的滇西地区是地中海—南亚地热异常带的重要组成部分，具有较高的区域地热背景，热水活动强烈。高温地下水水温 25~108℃，地温梯度一般大于 4℃/100 m，高于正常的地温梯度(2.5℃/100 m)<sup>[5]</sup>。

## 2 热泉水化学特征

### 2.1 地下水水化学基本特征

本次主要针对高黎贡山南段主要热泉包括热水塘热泉、黄草坝热泉、三官泉、苏帕河热泉展开研究。为对比研究，补充采集部分地表水和冷泉样品。于 2009 年 3 月完成野外样品采集，共 10 组样品。取样位置如图 1 所示。测试项目包括主要水化学离子成分、部分微量元素，测试工作由中国地质科学院水文地质环境地质研究所测试中心完成。

测试结果(表 1)表明，调查区地表水(八零八水库水、苏帕河水库水、三官河水)和浅层地下水(惠通桥上游大泉)为 Ca-HCO<sub>3</sub> 型水居多。优势阳离子成分为 Ca<sup>2+</sup>，优势阴离子成分为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>(图 2)。而深层热水泉(热水塘热泉、黄草坝热泉、三官泉、苏帕河热泉)多为碱性 Na-HCO<sub>3</sub> 型水。优势阳离子成分为 Na<sup>+</sup>，优势阴离子成分为 HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>。邦腊掌大滚锅泉水

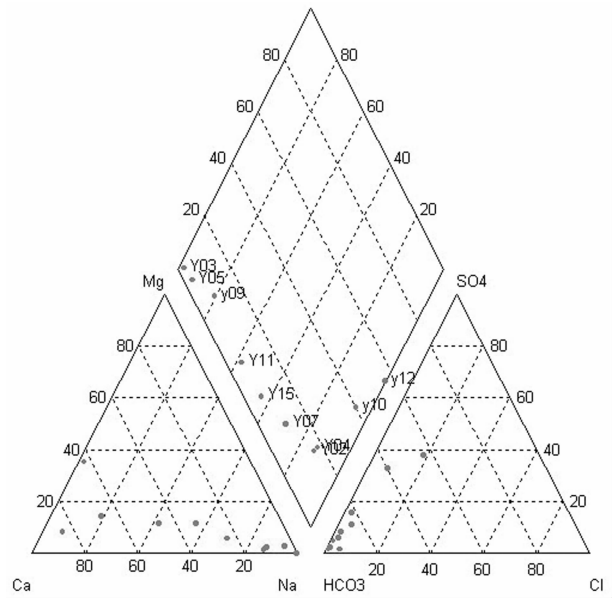


图 2 水化学三线图  
 Fig.2 Piper diagram of groundwater samples

为 Na-CO<sub>3</sub> 型水。都属低矿化水，地表水矿化度在几十毫克每升左右，而地下水也大多在 1 g/L 之下。pH 值都显碱性。深层热水明显具有火成岩区地下水特征。

### 2.2 微量元素分析

由于地下水中某些微量元素，可以对地下水运移起到示踪作用，所以开展了地下水微量元素特征分析。根据研究区地下水化学特征和地层岩性，选取 Mn 和 Sr 作为标志性微量元素。由于砂岩、板岩、泥岩中绿泥石矿物富含 Mn 元素，如果地下水中富含 Mn 元素，说明地下水流经上述岩石分布区。而 Sr/Ca 比值的高低，能够反映水-岩作用程度，比值越高，反映水-岩作用程度越强烈，也说明地下水循环速率较慢、滞缓<sup>[7-8]</sup>。

从 Ca-Mn 图(图 3)可看出被分成 3 个区域，1 区包括 Y02(热水塘)、Y07(苏帕河电站)等水点，这些点 Mn 含量较高，说明地下水流经了砂岩、板岩、泥岩地层；2 区包括 Y04(黄草坝泉)、Y10(三官泉)、Y12(邦腊掌大滚锅)，这些水点以低锰、低钙为特征，主要流经岩浆岩、变质岩分布区，这与泉域周围的岩石分布相吻合，说明黄草坝泉、三官泉、邦腊掌大滚锅泉为泉点周围大气降水补给形成；3 区包括 Y03(惠通桥上游大泉)，主要特征是 Ca<sup>2+</sup> 含量较高，属典型的灰岩水。

表 1 地下水、地表水水化学成分测试结果 (mg/L)  
Table 1 The chemical analysis of groundwater and surface water (mg/L)

编号	类型	地点	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Cl <sup>-</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup>	Mn	Sr	TDS
Y02	热泉水	镇安热水塘	4.36	97.04	11.96	0.85	8.85	27.71	0.36	219.2	0	0.03	0.068	366.1
Y03	岩溶泉水	惠通桥上游	1.18	2.56	79.74	27.2	3.54	7.17	4.8	373.2		0.002	0.306	321.7
Y04	热泉水	黄草坝	1.26	68.67	7.38	0.97	5.31	23.89	0.8	109	22.14	0.003	0.02	252.7
Y05	地表水	八零八水库	0.91	2.97	30.5	1.81	1.77	2.39	5	106.6		0.035	0.048	109.2
Y07	热泉水	苏帕河电站	12.2	119.5	35.29	5.08	6.01	28.67	0.68	392.1		0.058	0.204	495.5
Y09	地表水	苏帕河水库	1.02	3.85	11.96	1.54	1.77	4.78	2.96	36.73	4.66	0.049	0.034	62.8
Y10	热泉水	三官泉	1.69	60.07	1.99	0.97	6.01	31.06	0.48	47.39	29.13		0.036	229.6
Y11	河水	三关河	1.19	6.58	6.38	0.97	2.48	10.03	1.2	35.54			0.084	69.46
Y12	热泉水	邦腊掌	16.18	197.4	0.97	0.03	6.01	56.38	2.64	82.93	142.7	0.001	0.036	688
Y15	冷泉水	邦腊掌	1.79	7.86	3.99	0.85	1.77	7.17	2.04	32.58		0.002	0.029	71.3

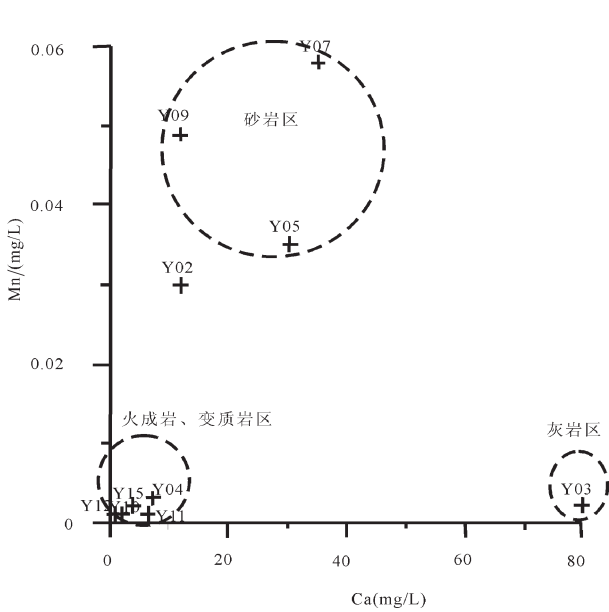


图 3 Mn-Ca 分析图  
Fig.3 Diagram of Mn-Ca

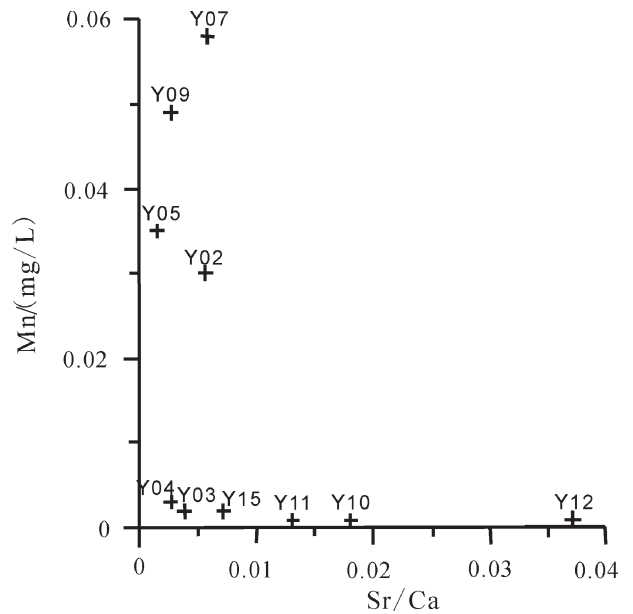


图 4 Mn-Sr/Ca 分析图  
Fig.4 Diagram of Mn-Sr/Ca

从 Sr/Ca 比值看出 (图 4), 自 Y04→Y03→Y10→Y12, Sr/Ca 依次增加, 说明黄草坝泉 (Y04)、惠通桥上游大泉 (Y03)、三官泉 (Y10) 水循环速率快, 水-岩作用不充分。而尤其是邦腊掌大滚锅 (Y12), Sr/Ca 比值较高, 反映水-岩作用程度相对充分, 循环速率相对缓慢, 循环深度相对较大。

### 3 环境同位素特征

#### 3.1 同位素特征值分析

为进一步分析主要热泉的形成机制, 开展了环

境同位素测试分析工作。同位素类型包括  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $3H$ 、 $\delta^{34}S$ , 其中  $\delta D$ 、 $\delta^{18}O$ 、 $3H$  测试工作在中国地质科学院水文地质环境地质研究所完成,  $\delta^{34}S$  测试在中国科学院地质与地球物理研究所完成 (表 2)。

从氕氧同位素分析结果看 (图 5), 包括邦腊掌大滚锅在内的几个热泉点基本分布在当地雨水线附近, 说明泉水主要为大气降水起源。这一点与腾冲热海泉形成鲜明对比, 腾冲热海泉水同位素“氧漂移”现象明显。邦腊掌、黄草坝、三官泉等泉水同位素无“氧漂移”现象, 在一定程度上说明, 这些水点的地下

表 2 地下水、地表水同位素测试数据统计

Table 2 Isotopic data for groundwater and surface water

编号	类型	地点	$\delta D$ /(‰ vs. SMOW)	$\delta^{18}O$ /(‰ vs. SMOW)	$^3H(TU)$	$\delta^{34}S/‰$
Y02	热泉水	镇安热水塘	-81	-10.7	3.9	1.925
Y03	岩溶水	惠通桥上游	-77	-10.2	8.7	2.368
Y04	热泉水	黄草坝	-76	-10.7	3.7	2.543
Y05	地表水	八零八水库	-72	-9.9	9.1	2.633
Y07	热泉水	苏帕河电站	-70	-9.9	3.6	8.534
Y09	地表水	苏帕河水库	-60	-8.4	6.6	4.256
Y10	热泉水	三官泉	-63	-9.4	3.2	2.242
Y12	热泉水	邦腊掌	-67	-9.5	4.5	
Y15	冷泉水	邦腊掌	-63	-8.5	13.1	

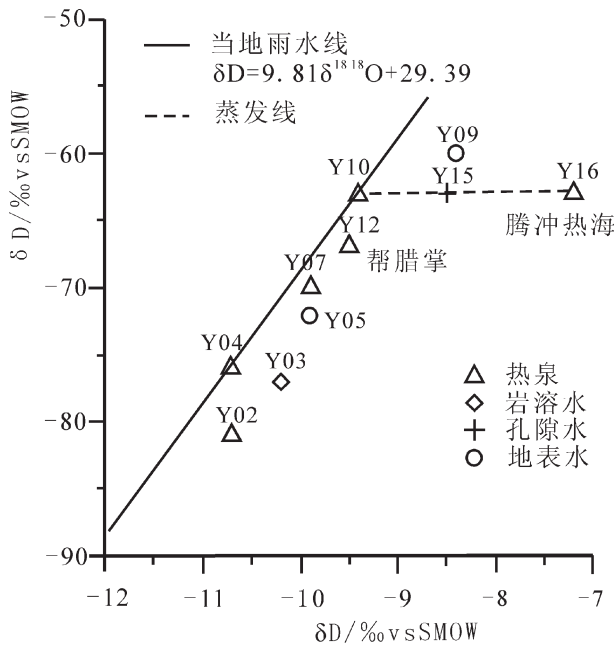


图 5  $\delta D - \delta^{18}O$  分析图  
Fig.5 Diagram of  $\delta D - \delta^{18}O$

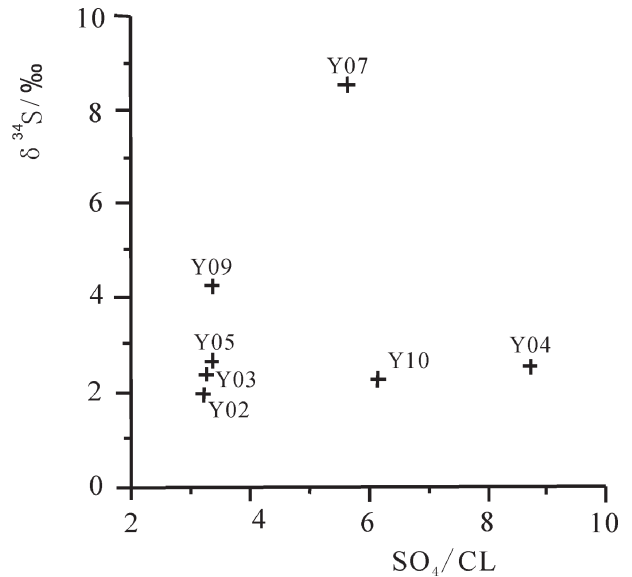


图 6  $SO_4/Cl - \delta^{34}S$  分析图  
Fig.6 Diagram of  $SO_4/Cl - \delta^{34}S$

水循环较快,水-岩作用不太充分,未发生与围岩的氧同位素强烈交换。也进一步证明这些热泉主要为周边范围内大气降水补给形成。氘同位素值的高低应主要反映降水补给高程的差异性。

从硫同位素分析结果看,  $\delta^{34}S$  同位素变化区间为 +1.925‰~+8.534‰。一般来说,当地下水系统中硫酸盐大量消耗时,将发生硫的重同位素富集而为还原性环境,反映在  $SO_4/Cl - \delta^{34}S$  关系中,则为  $\delta^{34}S$  升高而  $SO_4/Cl$  降低,含水层为弱或滞缓交替环境、弱补给和低渗透条件。当低  $\delta^{34}S$  伴随高  $SO_4/$

Cl 值时,表现为氧化环境,含水层为强交替环境、强补给和相对为高渗透条件<sup>[9-11]</sup>。图 6 显示, Y04(黄草坝泉)、Y10(三官泉)具有  $\delta^{34}S$  低,  $SO_4/Cl$  高的特点,反映了地下水处于较开放的氧化环境之中,水中的硫酸根离子供给相对较强,也说明地下水循环速率较快。

从  $SO_4/Cl - \delta^{34}S$  对数图中(图 7),也可以看到本次所采集水点主要为大气降水起源,总体水环境处于较开放的氧化环境条件之下,水交替强烈,渗透条件良好,循环速率较快。

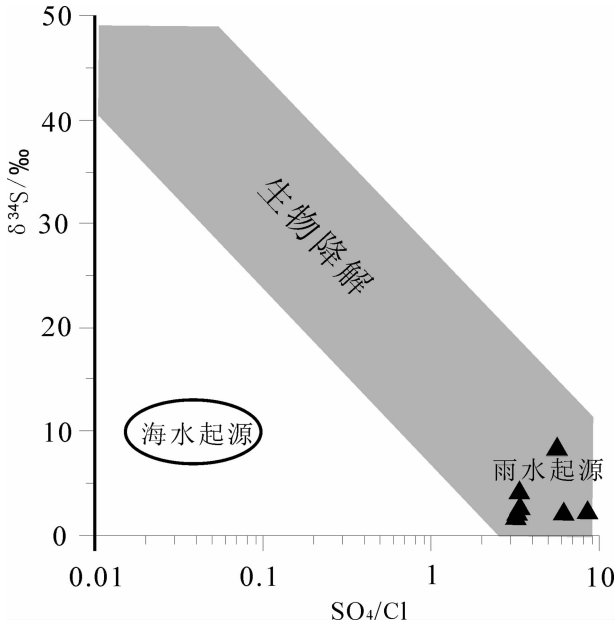


图 7 SO<sub>4</sub>/Cl<sup>-</sup>-δ<sup>34</sup>S 对数关系图

Fig.7 Logarithmic diagram of SO<sub>4</sub>/Cl<sup>-</sup>-δ<sup>34</sup>S

测试结果表明,水点氡值总体为 3~14TU,地表水和灰岩水氡值为 6~14TU。热水点氡值大都在 3~5 TU。

根据 TAEA 定性划分依据,综合考虑,这些水点地下水形成年龄有两种可能,一是形成于 1954—1961 年,年龄在 50 a 左右;二是形成于 20 世纪末至今,年龄在 10 a 左右。

从地下水形成年龄来看,热泉水形成年龄普遍年轻,证明热水在地下停留时间短,热水有较充足的补给量、良好的渗透性和径流排放条件,因而能在较短的时间内完成从补到排的径流过程。从另一方面也可以说,径流距离较短,地下水为周边补给形成。

### 3.2 混合作用分析

Cl<sup>-</sup>是水中较稳定的离子成分,通过将其与氡同位素进行对比分析可以了解地下水的混合状况。从图 8、图 9 中可以看到两条明显的线性关系。第一条线上的点包括 Y09(苏帕河水水库水)、Y15(浅层孔隙水)、Y10(三官泉水)、Y07(苏帕河热泉水)、Y02(热水塘泉水),表示了一种浅层混合作用,主要指地下水具有与地表水、浅层孔隙水发生了混合的现象;第二条线上包括了 Y03(岩溶泉)、Y04(黄草坝泉),反映了深层混合作用,主要指与地表水的混合作用不明显,主要发生在深部地下水之间的混合交换。

根据上述分析,选择 Cl<sup>-</sup>作为开展质量平衡计

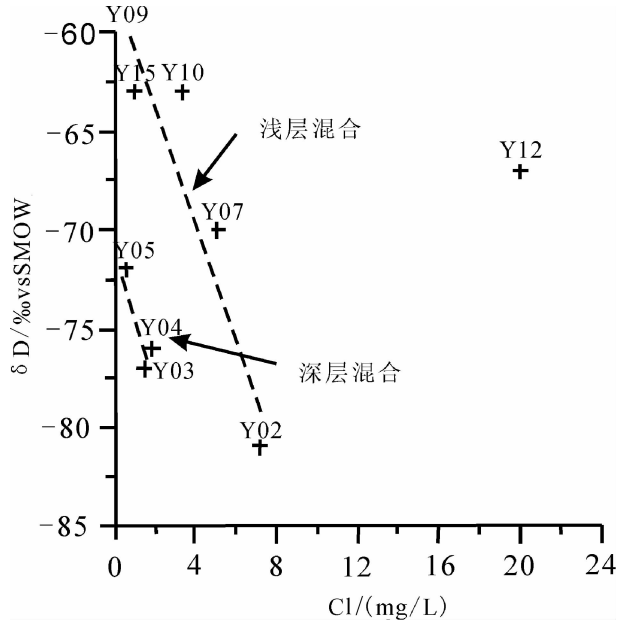


图 8 Cl<sup>-</sup>-δ D 分析图

Fig.8 Diagram of Cl<sup>-</sup>-δ D

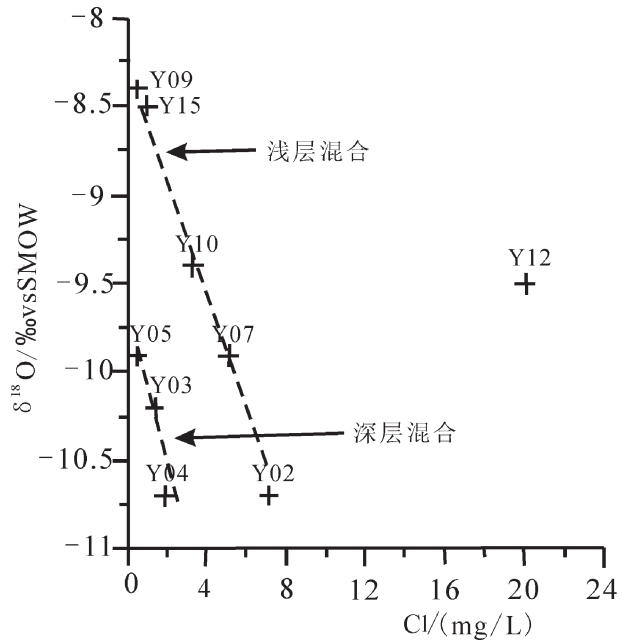


图 9 Cl<sup>-</sup>-δ<sup>18</sup>O 分析图

Fig.9 Diagram of Cl<sup>-</sup>-δ<sup>18</sup>O

算的离子成分。分别对浅层混合作用和深层混合作用进行计算分析。

针对浅层混合,选择 Y09 点(茄子山水库)作为浅层现代水;对于深层初生水,首先通过水化学温标计算,确定 Y02 热储温度,然后再根据 Cl<sup>-</sup>与温度的

变化关系,确定相应  $Cl^-$  离子浓度,以此作为深层初生水离子含量。计算公式:

$$Q_{浅}/Q_{深}=(C_{深}-C_{混})/(C_{混}-C_{浅})$$

$Q_{浅}/Q_{深}$ -混合比; $C_{混}$ -混合水离子浓度; $C_{深}$ -深层水离子浓度; $C_{浅}$ -浅层水离子浓度。

深层混合作用与其相似。

总的来看(表 3),现代水与初生水的配比关系,是符合一般中低温混合型地下热水形成规律的,热水水源主要是由现代水组成。具体而言,Y02(热水塘)和 Y07(苏帕河泉)现代水百分比低于 90%,表明得到初生水相对多一些,循环深度较大,循环速率较慢;而 Y10(三官泉)和 Y04(黄草坝)两泉点现代水百分比要高一些,表明与其他两个水点地下水补给路径较短,循环速率要快一些。

### 3.3 地下水补给高程计算

根据  $\delta D$  同位素高程效应原理<sup>[12-13]</sup>,开展地下水补给区高程计算。选取腾冲降雨同位素数据和苏帕河水库水同位素数据,作为计算依据。

计算公式如下:

$$H=\frac{\delta_{样}-\delta_{雨}}{k}\times 100+h$$

式中: $H$ -地下水的补给高度(m); $\delta_{样}$ -样品的  $\delta D$  值(‰); $\delta_{雨}$ -当地大气降水的  $\delta D$  值(‰); $k$ -同位素高度梯度( $\delta/100m$ ); $h$ -取样点的地面标高(m)。

表 3 地下水混合比计算统计

Table 3 Mixing proportion of groundwater

编号	地点	现代水百分比/%	深层热水百分比/%
Y02	镇安疗养院(热水塘)	79	21
Y07	苏帕河电站院内	86	14
Y10	三官泉	91	9
Y04	黄草坝	93	7

表 4 地下水补给高程计算统计

Table 4 Supply elevation of groundwater

编号	地点	补给高/m
Y02	镇安疗养院(热水塘)	1807
Y07	苏帕河电站院内	1792
Y10	三官泉	1783
Y04	黄草坝	1800
Y12	绑腊掌	1789
Y03	怒江左岸岩溶大泉	1802

从计算结果(表 4)看出,地下水补给区主要位于泉点附近高程 1800 m 的区域范围之内。由此可以得到各泉域的分布范围。

## 4 地温场特征

### 4.1 水化学温标

根据试验得知, $SiO_2$  矿物的溶解度是温度的函数。因此可以根据地热水的  $SiO_2$  含量估算热储温度。 $K-Na$  温标是基于钠长石和钾长石在一定温度下达到平衡而建立的,是用以计算深部温度的一种温标。鉴于这两种温标方法主要适用于深层地温计算,因此选用此两种方法计算热泉热储温度。

$SiO_2$  温标,经验公式如下:

$$t=\frac{1390}{5.19-\lg SiO_2}-273.15$$

$K-Na$  温标,经验公式如下:

$$t=\frac{1309}{1.75-\lg(K/Na)}-273.15$$

$t$  为热储温度,单位  $^{\circ}C$ 。

两种方法的计算结果(表 5),差异不大,选用方法适当。

### 4.2 热水循环深度

热泉循环深度计算公式为:

$$S=T \cdot G_0$$

式中: $S$ -热水循环深度(热储埋藏深度)(m); $T$ -热储温度( $^{\circ}C$ ); $G_0$ -地温陡度( $m/^{\circ}C$ )(根据已知

表 5 水化学温标计算统计

Table 5 Hydrochemical temperature of groundwater

编号	地点	$SiO_2$ 温标/ $^{\circ}C$	$K-Na$ 温/ $^{\circ}C$
Y02	镇安疗(热水塘)	130	149
Y07	苏帕河电站院内	127	204
Y10	三官泉	114	123
Y04	黄草坝	111	102
Y12	绑腊掌	173	188

表 6 热泉循环深度计算统计

Table 6 Cyclic depth of the hot spring

编号	地点	温标平均值/ $^{\circ}C$	循环深度/m
Y02	镇安(热水塘)	139	2780
Y07	苏帕河电站院内	165	3300
Y10	三官泉	118	2360
Y04	黄草坝	106	2120
Y12	邦腊掌	180	3600

钻孔资料,取 100 m/5°C)。

应该说,采用地温梯度所反映的主要是表层的情况,所以计算的循环深度偏大。

从循环深度计算来看(表 6),黄草坝泉、三官泉循环深度在 2000 m 左右,而邦腊掌泉循环深度达 3600 m。

## 5 结 论

(1)调查区地表水和岩溶地下水水化学类型为 Ca-HCO<sub>3</sub> 型。而深层热泉水为碱性 Na-HCO<sub>3</sub> 型水。邦腊掌大滚锅泉水为 Na-CO<sub>3</sub> 型水。地表水矿度在几十毫克升左右,而地下水也大多在 1 g/L 之下,都属低矿化水。

(2)高黎贡山南段热泉水主要为大气降水起源,循环速率较快,水岩作用不充分,径流环境多处于相对开放的氧化环境之中。以黄草坝泉、三官泉特征比较明显。

(3)地下水补给区主要位于泉点附近高程在 1800 m 的区域范围之内,为附近区域大气降水补给形成,其微量元素成分与附近区域岩性相符。热泉水平均形成年龄在 50 a 左右,由此可以得到各泉域的分布范围。

(4)存在两种混合作用形式,一是三官泉水、苏帕河热泉水、热水塘泉水表现为与地表水、浅层孔隙水发生混合的浅层混合作用形式;二是岩溶泉、黄草坝泉反映了发生在深部地下水之间的混合交换作用。

(5)通过两种温标计算,热泉热储温度在 100~200°C,其中黄草坝泉、三官泉热储温度较低,在 100~110°C;黄草坝泉、三官泉循环深度在 2000 m 左右,而邦腊掌泉循环深度达 3600 m。

## 参考文献(References):

[1] 廖志杰,沈敏子,过帼颖. 云南腾冲热海热田的热储特性[J]. 地质学报, 1991, 65(1):73-85.  
Liao Zhijie, Shen Minzi, Guo Guoying. Characteristics of the geothermal reservoir in the Rehal (hot sea) field in Tengchong County, Yunnan Province [J]. Acta Geologica Sinica, 1991, 65(1): 73-85(in Chinese with English abstract).

[2] 赵平,多吉,谢鄂军,等. 中国典型高温热田热水的锶同位素研究[J]. 岩石学报, 2003, 19(3):569-576.  
Zhao Ping, Dor Ji, Xie Ejun et al. Strontium isotope data for thermal waters in selected high-temperature geothermal fields [J]. Acta Petrologica Sinica, 2003, 19 (3):569-576 (in Chinese with English abstract).

[3] 上官志冠,孙明良,李恒忠. 云南腾冲地区现代地热流体活动类型[J]. 地震地质, 1999, 21(4):436-442.  
Shangguan Zhiguan, Sun Mingliang, Li Hengzhong. Active types of modern geothermal fluids at the Tengchong region, Yunnan Province [J]. Seismology and Geology, 1999, 21 (4):436-442(in Chinese with English abstract).

[4] 任纪舜,王作勋,陈炳蔚,等. 中国及邻区大地构造图 [M]. 北京:地质出版社, 1999: 21-23.  
Ren Jishun, Wang Zuoxun, Chen Bingwei. Tectonic Map of China and Adjacent Regions [M]. Beijing: Geological Publishing House, 1999:21-23(in Chinese).

[5] 陈墨香,汪集旸,邓孝. 中国地热资源 [M]. 北京:科学出版社, 1994:31-32.  
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Geothermal Resources in China[M]. Beijing: Science Press, 1994:31-32(in Chinese).

[6] 王刚,万景林,王二七. 高黎贡山脉南部的晚新生代构造——重力垮塌及其成因[J]. 地质学报, 2006, 80(9):1263-1265  
Wang Gang, Wan Jinglin, Wang Erqi. Extensional collapse of the southern part of the Gaoligong Range in the Western Yunnan, China and its tectonic origin[J]. Acta Geologica Sinica, 2006, 80(9): 1263-1265(in Chinese with English abstract).

[7] 赵继昌,耿冬青,彭建华,等. 长江河源区的河水主要元素与 Sr 同位素来源[J]. 水文地质工程地质, 2003, 2:89-93.  
Zhao Jichang, Geng Dongqing, Peng Jianhua, et al. Origin of major elements and Sr isotope for river water in Yangtze River source area [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2003, 2:89-93 (in Chinese with English abstract).

[8] 李向全,候新伟,张宏达,等. 太原盆地地下水系统水化学-同位素特征研究[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 5:111-112.  
Li Xiangquan, Hou Xinwei, Zhang Hongda, et al. Study on geochemistry-isotope characteristics of the groundwater systems in Taiyuan Basin[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2006, 5:111-112(in Chinese with English abstract).

[9] 顾尉祖,林曾平,费光灿,等. 环境同位素硫在大同南寒武-奥陶系地下水资源研究中的应用[J]. 水科学进展, 2000,11(1):16-17.  
Gu Weizu, Lin Zengping, Fei Guangcan, et al. The use of environmental sulphur isotopes in the study of the Cambrian - Ordovician aquifer system in the south of Datong [J]. Advances in Water Science, 2000, 11(1):16-17(in Chinese with English abstract).

[10] Zsolt A, Berner, Doris Stuben, Markus A, et al. S- and O- isotopic character of dissolved sulphate in the cover rock aquifers of a Zechstein salt dome [J]. Applied Geochemistry, 2002, 17:1515-1528.

[11] John Gunn, Simon H Bottrell, David J Lowe, et al. Deep groundwater flow and geochemical processes in limestone aquifers: evidence from thermal waters in Derbyshire, England, UK [J]. Hydrogeology Journal, 2006, 14(6):868-881.

[12] 王恒纯. 同位素水文地质概论 [M]. 北京:地质出版社, 1991: 168-171.  
Wang Hengchun. An Introduction to Isotopic Hydrogeology [M].

Beijing: Geological Publishing House, 1991:168-171(in Chinese).

[13] 王东升, 徐乃安. 中国同位素水文地质学之进展[M]. 天津:天津大学出版社, 1993:262-271.

Wang Dongsheng, Xu Nai'an. Advance of the Isotopic Hydrogeology in China [M]. Tianjing:Tianjing University Publishing House, 1993:262-271(in Chinese).

## Isotopic characteristics of the main hot springs in southern Gaoligong Mountain

LI Xiang-quan<sup>1</sup>, HOU Xin-wei<sup>1</sup>, ZHOU Zhi-chao<sup>1</sup>, LIU Ling-xia<sup>1</sup>, WANG Zhen-xing<sup>1</sup>,  
JIANG Liang-wen<sup>2</sup>, DU Yu-ben<sup>2</sup>, DENG Hong-ke<sup>2</sup>

(1. Institute of Hydrogeology and Environmental Geology, CAGS, Shijiazhuang 050061, Hebei, China; 2. China Railway Eryuan Engineering Group Co., Ltd., Chengdu 610031, Sichuan, China)

**Abstract:** The origins of the main hot springs in southern Gaoligong Mountain and the cyclic characteristics were analyzed by using water chemistry isotope techniques, and some important results were achieved. The hot springs in the area was low-mineralized, alkaline, Na-HCO<sub>3</sub> type water, which originated in the rainfall, with characteristics of fast cyclic rate, incomplete water-rock interaction, and flowing in a relatively open oxidation environment. These characteristics are especially outstanding in the Huangcaoba spring and the Sanguan spring. Groundwater recharge areas are mainly located at the elevation of 1800 m and near the spring that is recharged by atmospheric precipitation in the vicinities. There exist two kinds of mixing processes, i.e., shallow and deep mixing processes. Mixing ratio of modern water is above 90% in the Huangcaoba spring and the Sanguan spring. Hot spring thermal reservoir temperature is between 100 and 200°C, and the circular depth is 2000-4000 m.

**Key words:** Gaoligong Mountain; hot spring; water chemistry; isotope

---

**About the first author:** LI Xiang-quan, male, born in 1966, doctor, professor, engages in the study of hydrogeology and environmental geology; E-mail: lxqlm2003@yahoo.com.cn.