第 32 卷 第 5 期
2005 年 10 月
成都理工大学学报(自然科学版)
JOURNAL OF CHENGDU UNIVERSITY OF TECHNOLOGY (Science & Technology Edition)
Vol. 32 No. 5
Oct. 2005

[文章编号] 1671-9727(2005)05-0479-07

四川绵竹酿春池温泉地质成因分析

王多义

(成都理工大学能源学院地热资源研究所,成都 610059)

[摘要] 利用遥感地质、构造地质、热水化学和稳定同位素和放射性同位素等手段,对四川绵竹酿春池温泉的水源、热源以及补给、径流和储集与构造的关系进行了分析。认为其水源为大气降水,热源为深循环加热,热储温度 96℃,环流深度 3 000～4 000 m。在山前地区,近源低温地下水与深部的热水混合。酿春池温泉的地质成因模式为:在正常区域地热场环境中,大气降水沿高渗透率的岩石渗入地下。深部地下水沿断层破碎带向山前运移,循环加热。深部地下水在山前区两条断层交会处上涌汇集,并与近源低温地下水混合。热水在盖层被人工凿穿时涌出。

[关键词] 龙门山;地热;成因模式;大气降水;深循环;断层

[分类号] P641.11 [文献标识码] A

四川绵竹酿春池温泉是人工钻凿的温泉井,位于龙门山山前,龙门山与成都平原的接合部位。温泉井深 1 888 m。主水层产于井深 1 568.5 m 的中生界侏罗系莲花口组第一段砾岩中。自涌水量 672.2～772.2 t/d,水压 1.4 MPa,pH 值 8.3～8.8,含氡、H_2SiO_3、H_3BO_3、F^- 等 10 多种有益元素,被命名为含氡、硅、硼的重碳酸钠型氟水。热水中含有大量深循环低温热液裂缝型坡缕石[1]。

酿春池温泉井底温度 48.3℃,出水口温度 46℃,井口水温 39℃。根据钾镁地热温标法计算,热储温度 96℃左右。该区地壳浅部无年轻岩浆岩体,为正常偏高的区域地热背景中的中低温热储。该区雨水丰沛,地下水补给充足,温泉流量仅占其附近山区下渗降水量的 12%。被人工凿穿其盖层后涌出地表。

1 区域地质概况

酿春池温泉区位于成都平原东北部,四川省绵竹市西 15 km 左右的龙门山山前。区域构造上,酿春池温泉区处于扬子板块西缘前陆盆地与龙门山推覆构造带前缘的过渡带上(图 1)。区域

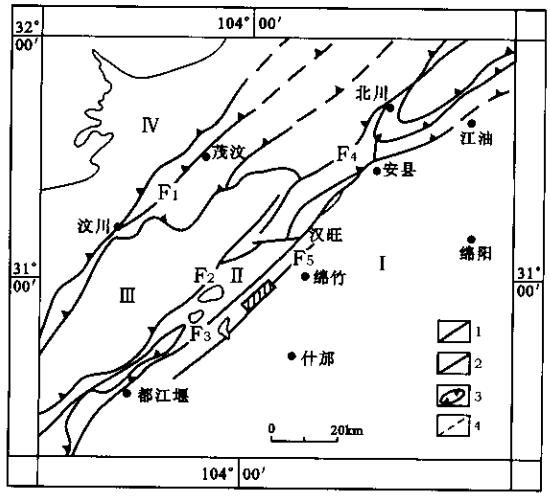


图 1 区域构造略图

Fig. 1 The sketch regional tectonic map

1. 逆冲断裂; 2. 滑脱带; 3. 推覆体; 4. 酿春池温泉区。F_1. 茂汶大断裂; F_2. 北川－映秀大断裂; F_3. 江油－灌县大断裂; F_4. 九顶山断裂; F_5. 关口隐伏断裂。Ⅰ. 前陆盆地; Ⅱ. 前山冲断－推覆构造带; Ⅲ. 中央冲断推覆体; Ⅳ. 后山褶皱推覆体

[收稿日期] 2005-04-19

[作者简介] 王多义(1949－),男,副教授,主要从事盆地分析和地热资源的勘查研究工作.

构造线方向以北东—南西向为主,由北西向南东分布着茂汶大断裂、北川—映秀大断裂、江油—灌县大断裂等北东向深大断裂。这些断裂从印支运动以来长期活动,控制着其两侧的构造发展,将龙门山区隔为后山褶皱推覆构造带、中央断裂推覆构造带和前山断裂推覆构造带以及前陆盆地等狭长的构造单元。推覆构造形成的壮观的"飞来峰"群,是国家地质公园的主要亮点。

龙门山地区的地层从元古界到新生界都有发育,且因受深断裂影响,分带性较明显,元古界出露在北川—映秀大断裂北西盘的龙门山中央断裂推覆构造带;北川—映秀大断裂与彭—灌断裂之间的龙门山前山出露震旦系—三叠系。侏罗系—白垩系只出露于彭—灌断裂南东盘—龙门山前山的前缘地区。除中央断裂推覆构造带中段出露元古界浅变质岩和浅变质花岗岩外,其余地区地层岩性以沉积岩为主。元古界至早古生界以碎屑岩为主,泥盆系至中三叠统以灰岩为主,上三叠统至白垩系以碎屑岩为主。前山地区岩层倾向北西,产状倒转。酿春池温泉区地理上位于龙门山与四川盆地的盆—山接合部,构造上位于龙门山推覆构造带与前陆盆地的过渡区,也是地下水最活跃的地区。

2 热源分析

热源是温泉成因类型的重要标志之一。就时间范围而言,热源有瞬态热源和稳态热源之分;就成因而言,热源有地壳浅部岩浆侵入体成因热和放射性成因热以及相变、化学反应、摩擦生热等。在考虑地壳热状态的范围内,后三种热源的重要性极为有限[2]。

在岩浆侵入体中,酸性侵入岩体与地热热源关系密切。龙门山区的岩浆岩以元古代花岗岩为主,主要分布在中央褶皱推覆构造带。绵竹、什邡一带龙门山中段,未见燕山期及时代更新的花岗岩体。

汪集旸等(1993)[3]研究认为,100 Ma 以前的侵入体,即使体积为 10^6 km^3,其温度也已恢复到围岩的环境温度,不可能构成地热系统的热源。元古代花岗岩不仅距今已有 500 Ma 以上,而且已经出露地表并变质,显然不可能成为酿春池温泉的热源。该区尤其是酿春池温泉区地下浅部无年轻侵入岩体(尤其是花岗岩体)。在地壳最上部 10 km 范围内,放射性衰变热亦构不成特殊热源[2]。因此,酿春池温泉无附加热源,热量只能靠正常地温场中的围岩供给。

四川盆地地温梯度多在 1.6～2.6℃/100 m,平均 2.45℃/100 m 左右[4],低于全球 3℃/100 m 的平均值。绵竹地区多年平均气温 15.7℃。2 000 m 深度地温约 58℃,地温梯度小于2.0 ℃/100 m(图 2)。地温场偏低可能与山前地区地下水活跃有关。从酿春池温泉井深 1 008 m 以内井温变化与含水层的关系,就可以看出山前地区地下水活动对地温的明显影响(图 3)。井深 0～150 m 地温随深度增加迅速降低,150～1 008 m 则随深度增加而升高,但在含水层的温度较低。井深 1 008 m 以内的平均地温梯度 3.23℃/100 m,高于全球及四川盆地的平均值。这种现象可能与其作为热田盖层长期受热田影响有关。实测主水层出水口水温 46℃,而 1 888 m 井底温度仅48.3℃,明显受水温影响而偏低。全井平均地温梯度 1.8℃/100 m,基本上与区域地温场一致。综合各种因素考虑,酿春池温泉区应属于正常地温场区。

在上述围岩环境温度下,地下水运动是热量传递的主要媒介。只有地下水的深循环,才能将分散的热量"收集"集中起来,形成有开采价值的热田[5]。大量证据表明酿春池温泉的热量正是来源于其自身的循环运动。

a. 同位素示踪研究表明:龙门山中央"彭灌杂

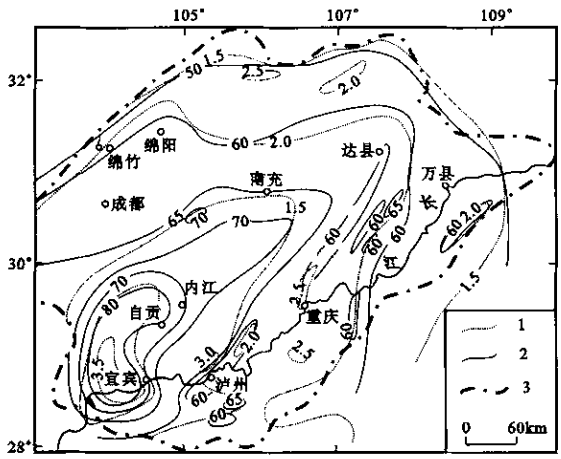


图 2 四川盆地地温梯度及 2 000 m 深地温分布图

Fig. 2 The geothermal gradient and geotherm distribution at the depth of 2 000 m

1. 地温梯度(℃/100 m); 2. 地温等值线(℃); 3. 盆地边界

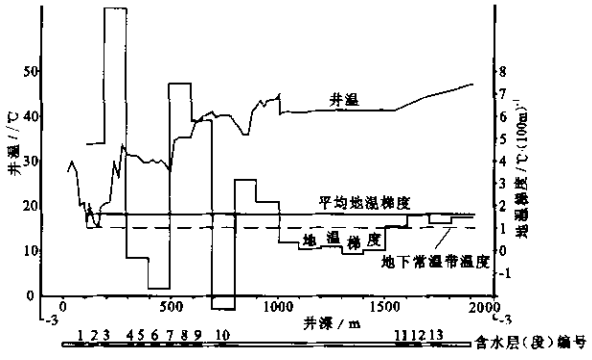


图 3　酿春池温泉井地温及地温梯度变化曲线图

Fig. 3　The curve of the geotherm and geothermal gradient in the Niangchunchi hot spring well

岩"一带的高山区是酿春池温泉的主要的补给区[6]。从中央补给区到达山前,显然要经历漫长的路程和巨厚的围岩,围岩的热量自然会温暖它。

b. 酿春池温泉水中含有较丰富的微量元素(表 1),其中 H_2SiO 和 H_2BO_3 达到矿水浓度,F^- 达到命名矿水浓度,矿化度也较高。随着水-岩作用(WRI)时间增加,水的 TDS 不断增加,并不断形成新的矿物组合。S,F,Si,Na 等的出现,是地下水在围岩中经历了较长时间的水-岩作用的结果[6]。

c. 温泉水中含 H_2S 达 77.93 mg/L(表 1),而该地区可能产生 H_2S 的最新地层是上三叠统须家河组第五段煤系(埋深 2 500～3 100 m),这表明其径流可能曾通过须五甚至更深的较封闭的围岩环境。

d. 根据钾镁地热温标法[7]计算热储的温度

$$t = \frac{4418}{13.98 - \lg(c_1^2/c_2^2)} - 237.15$$

式中:t 为热储温度(℃);c_1 为水中钾的浓度(mg/L);c_2 为水中镁的浓度(mg/L)。

计算出酿春池温泉热储温度为 96.07℃。考虑到可能存在近源地下水的混合作用,热储的温度将会更高,至少大于 100℃。按当地的地温梯度推算,其循环深度可能在 3 000～4 000 m。酿春池温泉的温度与热储的温度相差较大,除了其产出深度比热储浅得多,在上升途中可能消耗部分热量外,下面将要述及的近源地下水的越流混合作用可能是主要原因。

3　水源分析

White(1986)将地下水划分为大气成因水、海洋水、演化同生水、变质同生水、岩浆水和初生水(原生水)六种成因类型[8]。酿春池温泉 pH 值 8.3～8.8,含氡和 H_2SiO_3、H_3BO_3,F^- 等 10 多种元素(表 1),矿化度高于天然冷水平均值(0.019～0.55 g/L),大大低于海水平均值(28.18 g/L),也低于热矿水的平均值(4.88～5.74 g/L)[3]。因此,酿春池温泉可以排除其它水源,而以大气降水为水源。

2002 年 1 月和 4 月两次酿春池温泉采样的氢、氧同位素分别为:$\delta D = -84.7‰$ 和 $-86.8‰$,$\delta^{18}O = -11.05‰$ 和 $-11.18‰$,与大气降水补给的地表水氢、氧同位素组成吻合,都相对富轻同位素[9]。酿春池温泉及其泉域区地下水和地表水的同位素示踪研究也表明其热水补给源是由大气降水渗入形成,补给高程 1 633 m 至 1 725 m 或更高,龙门山后山"彭灌杂岩"一带的高山区是主要的补给区[6]。两次采样的氢、氧同位素基本保持不变,说明其补给源相对稳定,水温和水量不会随开采时间的延长发生明显变化。

酿春池温泉的氚浓度为 7 TU,作为地质深井来说不算太低。究其原因有两种可能:一是径流速度快,流量大;二是存在浅层潜水的越流混合作用。笔者认为后者的可能性较大。一是因为 672 m^3/d 的流量并不算大;二是如前所述,产出温泉的岩层——侏罗系莲花口组底部砾岩就在附近山上出露,且有梅子沟断层切过(图 4)。近源(龙门山前缘)的地下水很可能通过梅子沟断层和砾岩层中的裂隙系统与热储中远源(龙门山中、后山)的深循环热矿水混合。

表 1　酿春池温泉水化学成分特征(c/mg·L^{-1})

Hydrochemical composition of the Niangchunchi hot spring

成分	K^+	Na^+	Ga^{2+}	Mg^{2+}	Cl^-	F^-	Br	Sr
含量	6.14	280.25	3.25	0.61	36.53	5.72	0.4	0.26
成分	Fe	Li	Ba	H_2BO_3	H_2SiO	Rn	H_2S	TDS
含量	0.19	0.056	0.17	3.75	25.82	77.93	77.93	1007.4

注:水化学成分含量为 2001 年 8 月、2002 年 1 月和 4 月三次采样四个样品的平均值

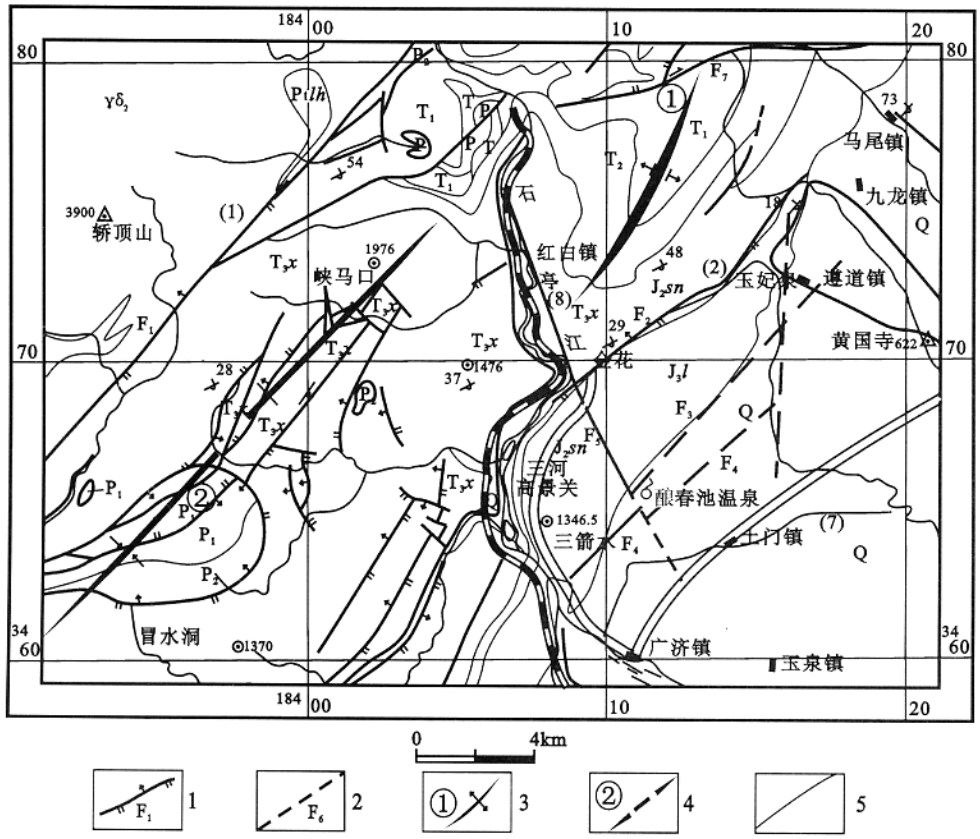


图 4 构造纲要图

Fig. 4 The schema of the structure

1. 断层及编号；2. 推测断层及编号；3. 背斜及编号；4. 向斜及编号；5. 地层界线。

①红春坪背斜；②小鱼洞复向斜。F_1. 映秀－白川断裂；F_2. 彭－灌断裂；F_3. 山前断裂；F_4. 射水河断裂；F_5. 梅子沟断裂；F_6. 龙莽河断裂；F_7. 马槽滩－汉旺断裂

绵竹地区降水充沛，多年平均降水量 1 040.8 mm/a，地下水补给来源充沛。酿春池温泉的热储层是裂隙发育的侏罗系莲花口组下段砾岩。按该段砾岩在温泉附近山区的出露面积计算，其天然入渗补给量达 5 722.4 m^3/d。酿春池温泉开采量为 672.2 m^3/d，仅占其 12%。如前所述，酿春池温泉的主要补给区是龙门山中央高山区，因此，前缘的低温地下水可能只有少量与深循环热水混合。可见，地下水的补给是很充沛的。

4 构造分析

酿春池温泉的水源是大气降水，深循环是其获取热量的唯一方式，因此，作为地下水渗入和径流通道的断裂和裂隙是关键因素。该区具有形成深部环流的良好的地质构造条件：

a. 酿春池温泉区位于龙门山推覆构造带前缘。区域性大断裂走向北东，倾向北西(山区)，叠瓦式排列。断裂地表产状较陡，向深部变缓，有利于汇集渗入的地下水。

在构造发展演化中，龙门山推覆构造以前展式由北西向南东发展，形成背驼式构造。北西部后缘的断裂以韧性为主，越往前缘，断裂的脆性越大；即裂隙发育，越有利于地下热水向龙门山前缘径流、聚集。

b. 在后期的构造发展中，龙门山区又经历南北向的区域挤压，形成了东西向压性断层(图 4 中 F_7)，以及南北向、北西向和北东向张性、扭性断层。遥感地质解译发现不同方向的线性构造相互交错、截割，形成错综复杂的构造景观(图 5)。南北向区域应力场的叠加，不仅使早期形成的压性断裂性质发生改变，而且使岩石裂隙发育，渗透性加强，地下水补给有保障；还可能使相互隔离的北东向深断裂之间发生水力联系。

c. 对酿春池温泉热储起主要控制作用的断层

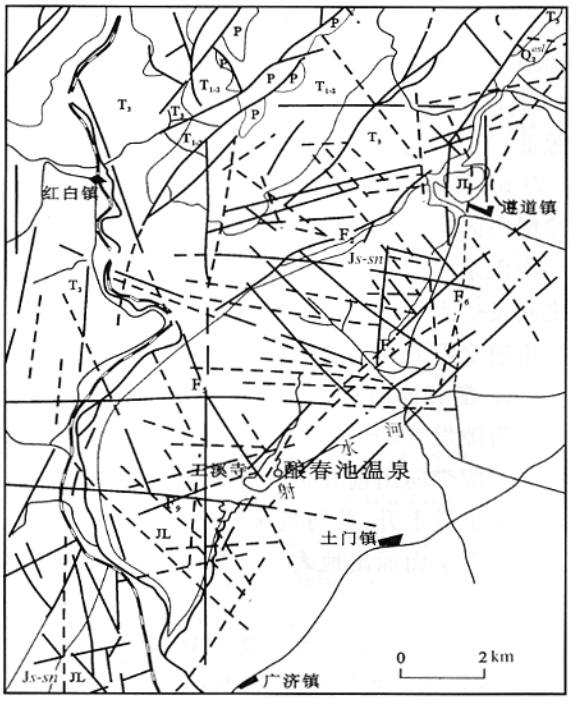


图 5　遥感地质线性构造解译图

Fig. 5　The diagram of the remote-sensing geological interpretation of the linear structure

是射水河断层和梅子沟断层。两条断层都是在地热勘查中利用遥感和地球化学勘查方法发现的隐伏断层。

射水河隐伏断层(图 4 中 F_4)走向北东—南西,倾向北西(山区)。区域上可能属于龙门山山前隐伏断层——关口断层的北段。

射水河断层地球化学异常(尤其是 Hg 和 Rn 异常)呈线性分布,表明其中有流体活动。1995 年,40 km 外的龙门山中的青平镇发生 5 级地震,地震发生前 2 h 左右,该断层带上的鱼池中的鱼忽然烦躁不安,纷纷跳出鱼塘。地震是断裂活动的结果。活动断裂的流体中可能增加一些异常成分进入鱼池水中,池鱼受刺激而烦躁不安。因此,射水河断层不仅是活动断层,而且可能是与发震深断裂相通的断层,自然成了深部环流的良好通道。

梅子沟断层(图 4 中 F_5)是张扭性右旋走滑断层,走向北北西—南南东,与龙门山区域构造线斜交,长逾 20 km,直达主要推覆构造带附近,切错了射水河断层和彭—灌断裂等北东向断裂。

梅子沟断层在酿春池温泉热储的形成中起着很重要的作用。首先,根据其与早期构造的斜截关系判断,是新构造断裂;第二,射水河断层、彭灌断层等北东向压性断层受其走滑错动的影响,可能局部改变性质,增加透水和导水能力;第三,它可能使相互隔离的区域断层(尤其是彭灌断层和射水河断层)之间发生水力联系;第四,它也可能沟通龙门山中不同地区、不同构造带、不同岩层的裂隙系统,汇集地下水;第五,也是最重要的一点,梅子沟断层与射水河断层相交于山前地区。山前区既是地下水的汇集区,又是其排泄区。两断层相交形成十分发育的裂隙系统,使其岩层的大地电场岩性测深曲线发生较大的变化,本应为连续宽缓的正高峰,变为不连续的有些散乱的中、低值甚至负值[11];而且酿春池温泉水中出现大量深循环低温热液裂缝型坡缕石,就是地下热矿水在这种裂隙系统中汇集和储存作用的结果。有的肥肉状坡缕石团块厚度竟达 10 mm 以上[1],岩石裂隙之发育,规模之大,可见一斑。毫无疑问,断层交会处发育的裂隙系统是深循环热水聚集和储存的最佳场所。

d. 单斜透水岩层可能是近源地下水的通道。上侏罗统莲花口组厚度大于 1 700 m,钻遇厚度 1 761m,岩性可四分:下部钙质砾岩段,中部砂、泥岩段,上部钙质砾岩段和顶部砂、泥岩段。钙质砾岩的砾石以灰岩砾石为主,占总量的 40%～70%,钙质胶结,岩性与灰岩类似,具水溶性。该套岩层出露于温泉区西北山区,倾向南东(盆地),受山前断层影响倾角较陡(30°～85°),但断层下盘倾角迅速变缓(小于 20°)。

酿春池温泉即产于莲花口组下部钙质砾岩层中。由于断层断距不大,而岩层又厚度巨大,所以尽管有断层错动,相应层位之间可能仍有一定联系。梅子沟断层切错了整套岩层和山前断层,有可能加强断层上下盘岩层之间的水力联系。附近山区的大气降水沿向盆地倾斜的裂隙发育的单斜岩层渗入盆地,与深部上升的热水混合,使热水温度降低,氚浓度增高。

总之,强烈的构造变动,长期的构造发展,大断裂的叠瓦式排列,不同时期区域应力场的叠加,不同方向断裂的相互切错,使岩石破碎,裂隙发育,通道畅通,成为酿春池温泉补给、径流、加热和储集的关键因素。

5　酿春池温泉地质成因模式

如图 6 所示,酿春池温泉是在中生界沉积岩

层的裂隙介质中发育形成的。该温泉之下的地壳浅部不存在年轻岩浆岩体之类的特殊热源。它基本上是在正常的区域地热背景上,由地下水的深循环将龙门山地壳浅部 3 000～4 000 m 深度内的热量收集起来,并带到山前排泄区,形成有开采价值的热田。酿春池温泉热水的补给来源在龙门山区。大气降水沿裂隙通道进行深循环(图 6,单箭头),向山前及四川盆地内运移。在山前排泄区的断裂交汇处,部分热水上涌并与近源环流(图 6,双箭头)混合,被人工钻井揭开后涌出地表。

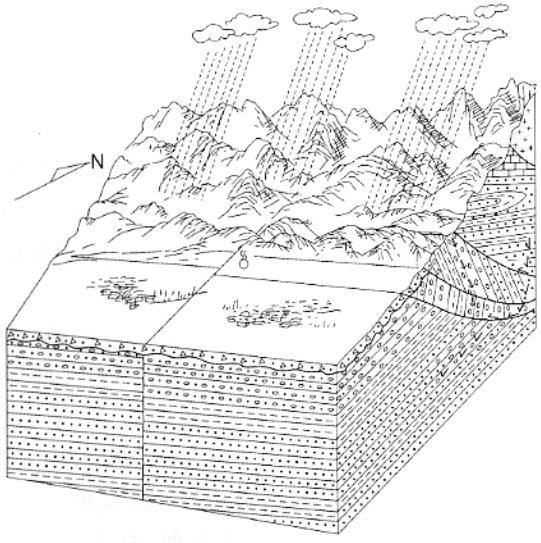


图 6 酿春池温泉地质成因模式图

Fig. 6 The geological genetic model of the Niangchunchi hot spring

综上所述,四川绵竹酿春池温泉的地质成因模式可概括如下:在正常偏高的区域地热背景之下,山区的部分大气降水沿裂隙发育的高渗透率岩石渗入地下,并在北东—南西向断层破碎带中汇集,被迫向山前及盆地内运移。在运移过程中,随着深度的增加,地下水从岩石中"收集"的热量也增加。在 3 000～4 000 m 深度,地下水温度可能达到 100℃以上。在因活动构造断裂的交汇而形成的高渗透率带可部分上涌,至地质条件相对有利的部位聚集,并与温度相对较低的近源地下水混合,形成承压水层。当人工钻穿其盖层后,从钻井涌出。

6 结 论

a. 酿春池温泉的水源是龙门山区海拔高度 1 600 m 以上的大气降水。热量是在正常地温场围岩环境中,由地下水从围岩中"收集"而来,水温随地下水循环深度增加而升高,并在 3 000～4 000 m 达到 100℃以上。在山前较浅处,因有近源低温水的混合而使水温有所降低。

b. 倾向北西的北东向断层重新活动,并成为龙门山区地下水向山前径流的主要通道。北北西—南南东向断层切错北东向断层,使北东向断层之间发生水力联系,并增加其渗透率。两组断层在山前交汇处是地下热水汇集的最佳场所。

c. 酿春池温泉的成因是:龙门山区的大气降水沿裂隙发育的高渗透率岩石渗入地下,经深部断裂裂隙带向山前径流并不断获得热量,在山前断裂交汇处上升,并与近源低温水混合聚集,被人工钻通盖层而涌出地表。

[参 考 文 献]

[1] 王多义. 绵竹酿春池温泉坡璐石的特征及成因探讨[J]. 矿物岩石,2004,24(2):14－18.

[2] Rybach L. Geothermal system, conductive heat flow and geothermal anomalies [A]. Geothermal Systems, Principals and Casse Histories [C]. John & Sons Ltd, 1981. 28－32.

[3] 汪集旸,熊亮平,庞忠和. 中低温对流型地热系统[M]. 北京:科学出版社,1993.

[4] 王均,黄尚瑶,黄歌山,等. 中国地温分布的基本特征[M]. 北京:地震出版社,1990..

[5] Hochestien M P. Assessment and modelling of geothermal resources (small utilization schemes)[J]. Geothermies, 1988, 17(1):15－49.

[6] 徐进勇,王多义,尹观. 绵竹三箭水 S1 井温泉补给源的同位素示踪研究[J]. 矿物岩石,2003,23(2):75－78.

[7] GB11615-89,地热资源地质勘查规范.

[8] 沈照理,王焰新. 水岩相互作用研究的回顾与展望[J]. 地球科学——中国地质大学学报,2002,27(2):127－132.

[9] White D E. Subsurface waters of different origins [A]. Extended Abstracts of Fifth International Symposium on Water-Rock Interaction [C]. National Energy Authority of Iceland, Reykjavik, 1986. 629－632.

[10] 尹观. 同位素地球化学[M]. 成都:成都科技大学出版社,1988.

[11] 王多义,杨庆锦. 大地电场岩性测深技术在绵竹地区地热资源勘查中的应用[J]. 地质与勘探,2004,40(增刊):53－56.

Geological genesis analysis of the Niangchunchi hot spring in Mianzhu, Sichuan, China

WANG Duo-yi

College of Energy Resources, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059, *China*

Abstract: This peper analyses the water source, heat source and the relationship between the groundwater circulating system and the geological structures using the research for remote sensing geology, structural geology, hydrothermal-chemical processes, stable isotopes and radioactive isotopes, and so on. The water source is regarded as atmospheric precipitation, and the heat source is regarded as that the groundwater is heated by itself deep circulation. The reservoir temperature is 96℃, and the groundwater circulating depth is 3 000～4 000 m. The proximal and low temperature groundwater and the deep and hot groundwater mix in the mountain front area. The geological genetic model of the Niangchunchi hot spring is that under the normal regional geotemperature pattern conditions, the atmospheric precipitation in the Longmen Mountain area seeps into underground along the rocks with high infiltration ratio. And the deep groundwater moves to the mountain front along the crack belt of the major fault and is heated in the course of deep circulation. In the mountain front, the thermal water upwells and gather at the place where two faults intersect, and mixes with the proximal and low temperature groundwater here. The hot water gushes when the cover strata of the geothermal reservoir are drilled through by the manual method.

Key words: Longmen Mountains; geotherm; geological genetic model; atmospheric precipitation; deep circulation; faults