

李小林, 吴国禄, 雷玉德, 等. 青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议. 吉林大学学报(地球科学版), 2016, 46(1): 220-229. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201601206.

Li Xiaolin, Wu Guolu, Lei Yude, et al. Suggestions for Geothermal Genetic Mechanism and Exploitation of Zhacang Temple Geothermal Energy in Guide County, Qinghai Province. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2016, 46(1): 220-229. doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201601206.

## 青海省贵德扎仓寺地热成因机理及开发利用建议

李小林<sup>1</sup>, 吴国禄<sup>1</sup>, 雷玉德<sup>1</sup>, 李重阳<sup>2</sup>, 赵继昌<sup>3</sup>,  
白银国<sup>1</sup>, 曾昭发<sup>4</sup>, 赵 振<sup>1</sup>, 张珊珊<sup>5</sup>, 赵爱军<sup>1</sup>

1. 青海省环境地质重点实验室/青海省环境地质勘查局, 西宁 810007

2. 四川省地质矿产勘查开发局九一五水文地质工程地质队, 四川 眉山 620000

3. 中国地质环境监测院, 北京 100003

4. 吉林大学地球探测科学与技术学院, 长春 130026

5. 青海省地质调查局, 西宁 810001

**摘要:** 本文通过卫星热遥感影像及航磁、重力异常的宏观性解译热异常空间分布特征, 野外实地调查温泉的出露条件和水化学特征, 分析研究青海省贵德扎仓寺温泉的热源通道、入渗通道, 从而讨论其成因机理和开发利用前景。研究结果表明: 扎仓寺温泉泉口温度为 93.5℃, 与当地气压有关; 大气降水和热水沟上游沟谷水为补给源, 近东西向张裂为入渗通道, 中三叠统砂板岩与印支期花岗闪长岩( $\gamma\delta_2^{\text{S}}$ )接触变质带为径流通道(热储层), 中三叠统砂板岩为盖层, 北北西向热光断裂( $F_1$ )为热源通道, 属断裂-深循环地热类系统类型; 径流通道(热储层)温度可达 136.0℃, 具备蒸汽发电示范背景条件, 而  $F_1$  断裂带附近 2 000 m 深度温度可达 195.0℃, 具备干热岩开发利用前景。

**关键词:** 扎仓寺温泉; 地热成因机理; 开发利用; 干热岩

doi:10.13278/j.cnki.jjuese.201601206

中图分类号: P314

文献标志码: A

### Suggestions for Geothermal Genetic Mechanism and Exploitation of Zhacang Temple Geothermal Energy in Guide County, Qinghai Province

Li Xiaolin<sup>1</sup>, Wu Guolu<sup>1</sup>, Lei Yude<sup>1</sup>, Li Chongyang<sup>2</sup>, Zhao Jichang<sup>3</sup>,  
Bai Yinguo<sup>1</sup>, Zeng Zhaofa<sup>4</sup>, Zhao Zhen<sup>1</sup>, Zhang Shanshan<sup>5</sup>, Zhao Aijun<sup>1</sup>

收稿日期: 2015-04-08

作者简介: 李小林(1958—), 男, 教授级高级工程师, 主要从事水文地质、工程地质、灾害地质方面的研究, E-mail: lxl906@163.com

基金项目: 青海省科技支撑计划项目(2014-GX-207); 国家高技术研究发展计划(“863”计划)项目(2012AA052803); 中国地质调查局地质大调查项目(水环[2013]第 23 号)

Supported by Science and Technology Support Program of Qinghai Province (2014-GX-207), National High-Tech R&D Program of China (“863” Program) (2012AA052803) and Geological Survey Projects of China Geological Survey(WH [2013] No. 23)

1. Key Lab of Geo-Environment, Qinghai Province/ Environmental Geological Prospecting Bureau of Qinghai Province, Xi'ning 810007, China
2. Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development 915 Hydrogeology and Engineering Geology Team, Meishan 620000, Sichuan, China
3. China Institute of Geo-Environment Monitoring, Beijing 100003, China
4. College of GeoExploration Science and Technology, Jilin University, Changchun 130026, China
5. Qinghai Province Geological Bureau, Xi'ning 810001, China

**Abstract:** The regional distribution of the thermal anomaly is studied by the macroscopic interpretation of satellite remote sensing, aeromagnetic heat, and gravity anomalies. At the same time, the exposed conditions and hydrochemical characteristics of hot springs are discussed through field investigation and test. On this basis, the heat channel and infiltration channel of the hot spring are analyzed, as well as the geothermal genetic mechanism and exploitation. The temperature of Zhacang hot spring is 93.5 °C, which is related to the local pressure. The precipitation, hot ditch water, and upper gully water are the recharge source of the hot springs; the east-west tension cracks are the filtration channels; the metamorphic belt between the middle Triassic sandy slates and granodiorite is the runoff channel of the hot reservoir; covering by the sandy slate, Reguang fault of NNW( $F_1$ ) is the heat source channel. It belongs to a fracture-deep cycle geothermal system. The temperature of hot reservoir could be up to 136.0 °C, and could be used for generating electricity. The temperature at the depth of 2 000 meters near the  $F_1$  fault could reach 195.0 °C, and the hot dry rocks are valuable for future development and utilization.

**Key words:** hot spring of Zhacang Temple; genetic mechanism of geothermal; exploitation; hot dry rock

## 0 前言

距今 45 Ma 以来,伴随印度板块与欧亚板块碰撞挤压的发生发展,青藏高原在由南向北递进式隆升并于晚期向东滑移挤出的过程中,一方面塑造了高原极具地学价值的地质地理景观,另一方面又逐步形成并蕴藏了一系列地热资源热储空间或点。如西藏羊八井地区、青海唐古拉山地区、贵德—共和地区等热储区带<sup>[1]</sup>。其中,青海省已发现水温 15.0 °C 以上的热水或地热异常点带共 84 处,尤以贵德扎仓寺温泉最为典型,其泉口温度达 93.5 °C。据史料记载,扎仓寺温泉用于洗浴、治疗疾病已有 600 多年的历史,但对其进行基础性的研究工作仅始于 20 世纪 70 年代。其成果主要集中于区域地质和地球物理过程<sup>[2-4]</sup>,以及对扎仓寺地热成因、水温及水化学特征的研究和开发利用<sup>[5-7]</sup>,并未涉及热源机理和开发利用前景。本文通过卫星热遥感影像及航磁、重力异常<sup>[8]</sup>的宏观性解译热异常空间分布特征,野外实地调查温泉的出露条件和水化学特征,在分析研究温泉热源通道、入渗通道的基础上,讨论了其成因机

理和开发利用前景。

## 1 扎仓寺温泉概况

### 1.1 扎仓寺地热地质背景

扎仓寺地热区地处西秦岭地块与祁连地块缝合边界南侧,系共和古湖盆东部边界带,出露地层以中三叠统( $T_2$ )砂板岩和印支期花岗闪长岩( $\gamma\delta_5^{\circ}$ )为主,其顶部大部被新近系砂岩、泥岩所覆盖。花岗闪长岩裂隙及构造破碎带为含水层热储系统,中三叠统砂板岩和新近系泥岩构成隔温盖层,断裂破碎带构成热储及热源通道。

扎仓寺温泉受控于北北西向构造控制,出露部位在北北西向断裂与近东西向断裂交汇部共用上盘上。北北西向断裂称热光断裂( $F_1$ ),为压扭性隔水断层;近东西向断裂称扎仓断层,为张扭性导水断层。地下水沿扎仓断层径流遇热光断裂下盘泥岩受阻,形成上升泉出露地表(图 1)。

### 1.2 温泉露头

扎仓温泉沿热水沟呈线状分布,泉水出露,稍有喷溅,伴随气体和蒸汽溢出。在长约 100 m 的沟谷

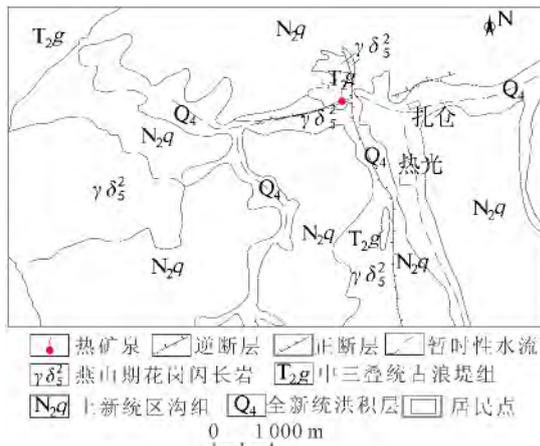


图 1 扎仓寺温泉平面示意图

Fig. 1 Schematic plan view of Zhacang Temple hot springs

中有泉眼近 30 处,水温 32.0~93.5 °C,单泉流量 0.10~0.29 L/s,总流量 8.0~15.0 L/s,受季节影响明显。泉水泄出带第四系砂砾层中有厚达 2.5 m 充填着热泉出露形成的钙华。

### 1.3 温泉水化学特征

扎仓寺温泉水无色、透明,微有 H<sub>2</sub>S 气味。矿化度 1.34 g/L,水化学类型 SO<sub>4</sub>·Cl-Na 型,呈弱碱性。含有多种对人体有益的微量元素,如偏硅酸(129.00 mg/L)、偏硼酸(29.05 mg/L)、氟(8.50 mg/L)、锶(1.31 mg/L)、锂(2.64 mg/L)、镭(0.162 mg/L)等。按国家相关标准<sup>[9]</sup>,温泉中仅氟离子超出饮用矿泉水标准限定值。由此可知,扎仓寺温泉水有明显的医疗功效,特别是对皮肤病、关节炎<sup>[6]</sup>、胃病等都有显著疗效。

### 1.4 泉水温度

扎仓寺温泉温度最高 93.5 °C,随气喷出,最低温度 32.0 °C,呈泉涌出。泉口标高 2 500 m 左右,气压值 78 kPa,与其相对应水的沸点为 93.0 °C。所以泉水最高温度不能代表地热流体温度,应存在更高的热源体,这也是本文关注的要点。

## 2 地热成因机理分析

### 2.1 区域地热地质条件

伴随青藏高原由南向北递进式隆升,在距今 3.0 Ma 年前后向东滑移挤出<sup>[10]</sup>的过程中,古共和拉分盆地形成,发育了一系列北北西向展布的断裂构造<sup>[11]</sup>(图 2)和青海最具地热开发利用潜力的共和、贵德热储系统。如:共和盆地 1 000~1 500 m 地热

温度达 60.0~70.0 °C,贵德盆地 1 500 m 以浅新近系浅部热储和古近系中部热储温度均在 40.0 °C 以上;北北西向多禾茂断裂带温泉出露温度 44.0~67.0 °C,瓦里贡山断裂带温泉出露温度 62.0~93.5 °C;瓦洪山断裂带温泉出露温度 30.0~62.0 °C。可见,共和、贵德热储系统区域热力中心在瓦里贡山构造带,这一点与瓦里贡山构造带岩浆岩分布最广是相一致的。说明北北西向断裂构造应为深达软流层的深大断裂,也是区域热源通道。

### 2.2 区域热异常与重力异常

热异常遥感解译结果(图 3)表明,扎仓寺温泉地区有一个呈北北西向展布的高热异常区带,面积达 200 km<sup>2</sup> 以上,尤以热光断裂上盘最为显著。说明北北西向存在一条巨大的热源通道。区域地形(图 4a)与重力异常(图 4b)具良好的对应性,明显显示山系与沉降带,并显示区域上以北北西向断裂为主,东西、南北向相对弱些;而扎仓寺温泉带(图 5)明显显示有一条北北西向区域深大断层存在,与重力异常显示对应关系显著。对比实际,该断裂即热光断裂,而且规模巨大,可以认为深达软流层,温泉出露带为北北西向与东西向异常交汇带,这一点可以从瓦里贡山断裂、多禾茂断裂右施切 γδ<sub>5</sub><sup>1</sup> 侵入岩体得到佐证(图 6)。

### 2.3 温泉的补给、径流和排泄

据野外调查,热水沟为一季节性沟谷,其上游的青楚河为常年有水的沟谷,年均流量约 20 L/s,与大气降水一同补给热水沟。而热水沟为“V”字峡谷,岸坡高差达 150~300 m,坡顶为新近系泥岩盖层,为隔水层位。而谷床基岩裸露,近热泉带由中三叠统砂板岩组成,热泉点西约 2 km 为燕山期花岗闪长岩。花岗闪长岩中近东西向张裂发育,线密度 1.5~2.0 条/m,地表可见张开宽度 1~2 cm。一方面,大气降水和青楚河水进入热水沟花岗闪长岩谷床约 2.0 km 即断流,说明近东西向张裂为良好的入渗通道;另一方面,据当地居民反映,扎仓寺温泉流量与热水沟上游青楚河汇水区大气降水有密切关系,降水以后约 20 d,扎仓寺温泉流量有所增加。据物探资料(图 7)可知:热光断裂(F<sub>1</sub>)以西 300 m 长度内表层有不含水的高阻地层,应为阻水隔热的中三叠统砂板岩;300 m 以西下部 1 000~1 500 m 带为低阻带,应为含水、导水带。因此,扎仓寺温泉补给区是热光断裂以西 1.5 km 以外区域,主要来源是大气降水和热水沟上游沟谷流水。入渗通道为

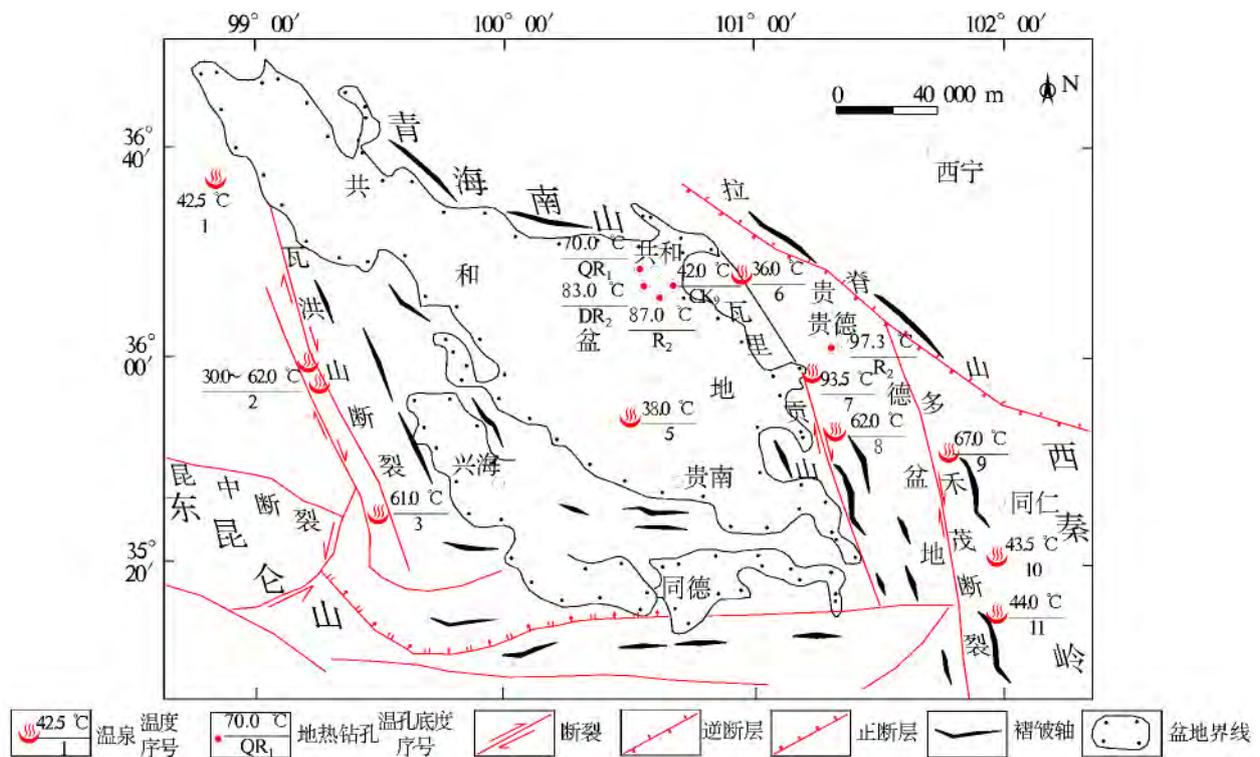


图 2 区域地热地质条件图

Fig. 2 Map of region geothermal geology conditions

$\gamma\delta_5^1$  花岗闪长岩中近东西向构造裂隙。

热光断裂以西 1.5 km 以外区域的近东西张裂为地表水的入渗通道。中三叠统砂板岩与花岗闪长岩接触变质带为径流储水含水带。热水沟上游地表水入渗后在接触变质带径流,经  $F_1$  热源加热后,受断层下盘新近系泥岩阻隔上涌,形成扎仓寺温泉。因此,近东西向的扎仓寺断裂是地表水入渗和地热导热构造,而北北西向热光断裂  $F_1$  则是扎仓寺温泉的热源通道。

#### 2.4 扎仓寺温泉成因机理

上述资料均显示扎仓寺温泉热系统存在一个很大的热源通道,即热光断裂,其热储概念模型可用图 8 表述。大气降水和青楚河水进入热水沟后成为扎仓寺温泉补给源,近东西向张裂带为地表水入渗通道,花岗闪长岩与中三叠统砂板岩接触变质带为热储层,中三叠统砂板岩为盖层,热光断层为热源通道。地表水入渗后,在深部 1 000~1 500 m 处与热光热源通道热混合加热,受下盘新近系泥岩的阻隔,在扎仓寺上涌出露地表。因此,扎仓寺温泉的形成主要依赖于热光断裂作为热源通道对地表渗入水进行加热受阻后出露地表。扎仓寺温泉群受板内规模

不一的活动断裂( $F_1$ )控制,地表出露温泉,水温高达 93.5 °C,热源是断裂导热<sup>[12]</sup>,为断裂-深循环型地热系统<sup>[13]</sup>。

### 3 地热资源特征和开发利用建议

#### 3.1 地热资源现状及特征

据多年观测资料显示,扎仓寺温泉总流量 8.0~15.0 L/s,水温 32.0~93.5 °C,温泉水中  $H_2SiO_3$ 、 $Li^+$ 、 $Sr^{+2}$  三项指标符合饮用矿泉水标准, $F^-$ 、 $Li^+$  指标满足医疗矿水标准<sup>[9]</sup>。据相关资料<sup>[2-3,6]</sup>,扎仓寺破碎带内勘探孔 ZK19 终孔孔深 100.18 m,热水温度 93.0 °C,孔口自流量为 5.4 L/s,且影响到扎仓沟内温泉流量。在温泉下游 300 m 处施工的勘探孔(RK852),主要揭露新近系砂岩、泥岩及砂砾岩,当降深为 5.16 m 时,涌水量仅为 0.068 L/s,水温 57.0 °C;说明扎仓寺温泉来自破碎带,受河谷浅层地下水混合作用影响,部分泉点温度较低<sup>[2-4,6]</sup>。

#### 3.2 热储温度及循环深度

采用地球化学温标可以估算热储温度,预测地热田潜力。地热流体与矿物在一定温度下达到化学

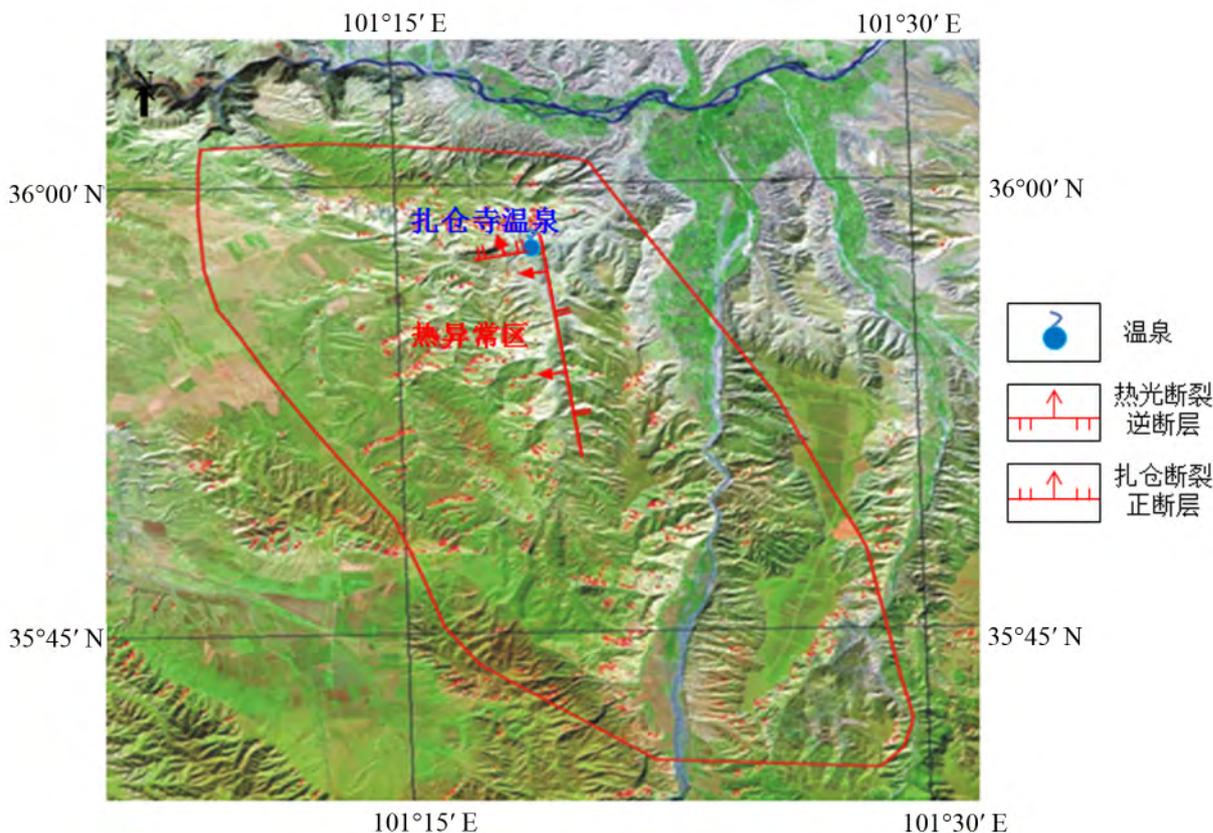


图 3 区域热异常遥感图像

Fig. 3 Remote sensing of regional thermal anomaly

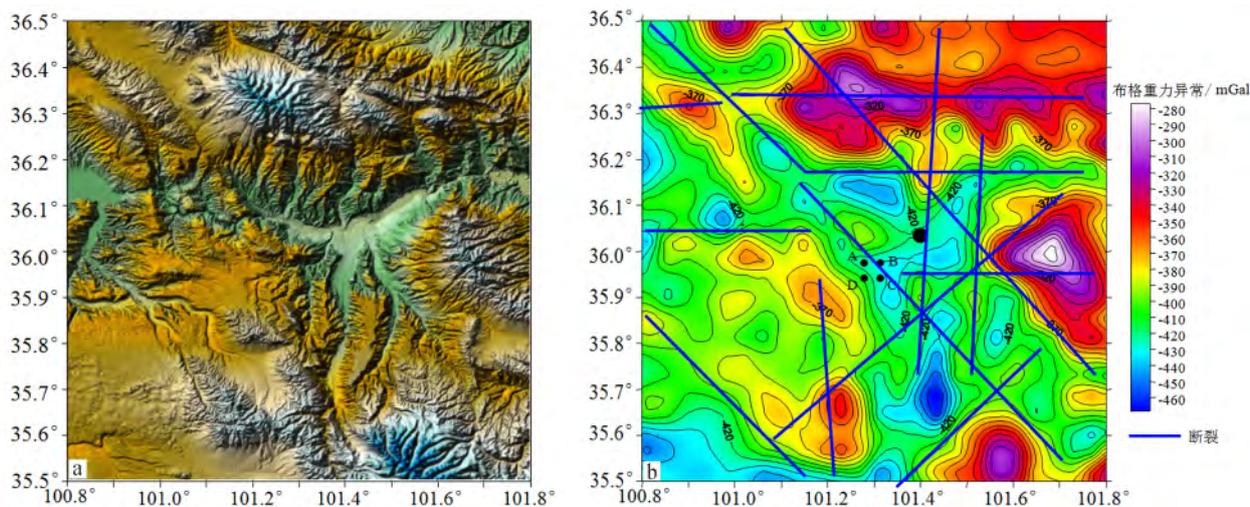


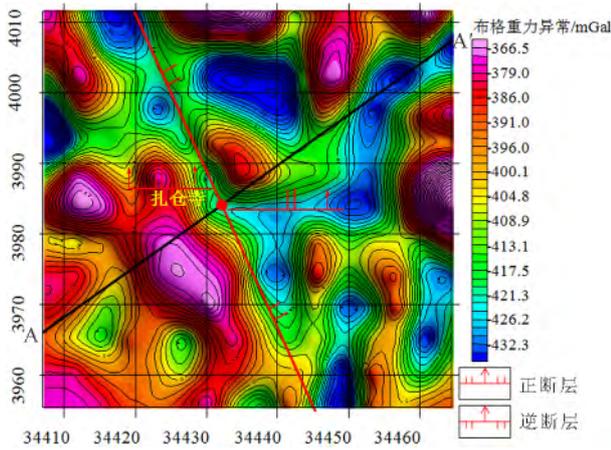
图 4 区域地形(a)和重力异常(b)对比图

Fig. 4 Comparison map of topography (a) and regional gravity anomaly (b)

平衡,在随后地热流体温度降低时,这一平衡仍予保持,这为建立地球化学温标提供基础<sup>[14]</sup>。在水与不同类型的 SiO<sub>2</sub> 达到溶解平衡且无蒸汽损失的情况

下,采用 SiO<sub>2</sub> 温标法计算热储温度,公式<sup>[14-15]</sup>为

$$t = \frac{1\ 309}{5.19 - \lg \rho} - 273.15 \quad (1)$$



数字为 84 坐标系。

图 5 扎仓寺温泉带重力异常与构造关系示意图

Fig. 5 Schematic diagram of relationship between gravity anomaly and geological structure in Zhacang Temple hot springs

式中:  $t$  为热储温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $\rho$  为  $\text{SiO}_2$  质量浓度,  $\text{mg/L}$ 。扎仓寺温泉的  $\text{H}_2\text{SiO}_3$  质量浓度为  $129 \text{ mg/L}$ , 换算成  $\text{SiO}_2$  质量浓度为  $99.26 \text{ mg/L}$ <sup>[6,14]</sup>, 计算出  $t$  为  $136 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

估算温泉热水循环深度  $Z$  的公式<sup>[6,15]</sup>为

$$Z = G(t_z - t_0) + Z_0 \quad (2)$$

式中:  $G$  为地热增温等级, 本文取  $10.52 \text{ m/}^{\circ}\text{C}$ <sup>[16]</sup>;  $t_z$  为基底温度, 即热储温度  $136.0 \text{ }^{\circ}\text{C}$ ;  $t_0$  为补给区年平均气温, 为  $7.1 \text{ }^{\circ}\text{C}$ <sup>[3,6]</sup>;  $Z_0$  为多年常温带深度, 取  $20 \text{ m}$ 。由式(2)计算得出扎仓温泉的循环深度为  $1385 \text{ m}$ , 与物探结果较一致。

### 3.3 温泉的天然放热量

温泉的天然放热量计算公式<sup>[6,15]</sup>为

$$Q_w = 365Q_w c_w (t_w - t_0) \quad (3)$$

式中:  $Q_w$  为温泉的天然放热量,  $\text{J/a}$ ;  $Q$  为温泉总流量,  $\text{m}^3/\text{d}$ ;  $\rho_w$  为水的密度,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_w$  为水的比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^{\circ}\text{C})$ ;  $t_w$  为热水温度,  $^{\circ}\text{C}$ <sup>[6,15]</sup>。根据式(3)计算扎仓温泉的天然放热量, 结果见表 1。

### 3.4 地热资源量

利用热储法计算热储中储存的热量, 估计热田地热资源的潜力<sup>[14]</sup>, 公式为

$$Q_r = cAd(t_r - t_j) \quad (4)$$

式中:  $Q_r$  为地热资源量,  $\text{J}$ ;  $A$  为热储面积,  $\text{m}^2$ ;  $d$  为热储厚度,  $\text{m}$ ;  $t_r$  为热储温度,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $t_j$  为基准温度, 取当地多年平均气温,  $^{\circ}\text{C}$ ;  $c$  为热储岩石和水的热容量,  $\text{J}/(\text{m}^3 \cdot ^{\circ}\text{C})$ <sup>[6,14-15]</sup>, 用公式

$$c = \rho_c c_c (1 - \varphi) + \rho_w c_w \varphi \quad (5)$$

计算。式中:  $\rho_c$  为岩石密度<sup>[6,14]</sup>,  $\text{kg/m}^3$ ;  $c_c$  为岩石

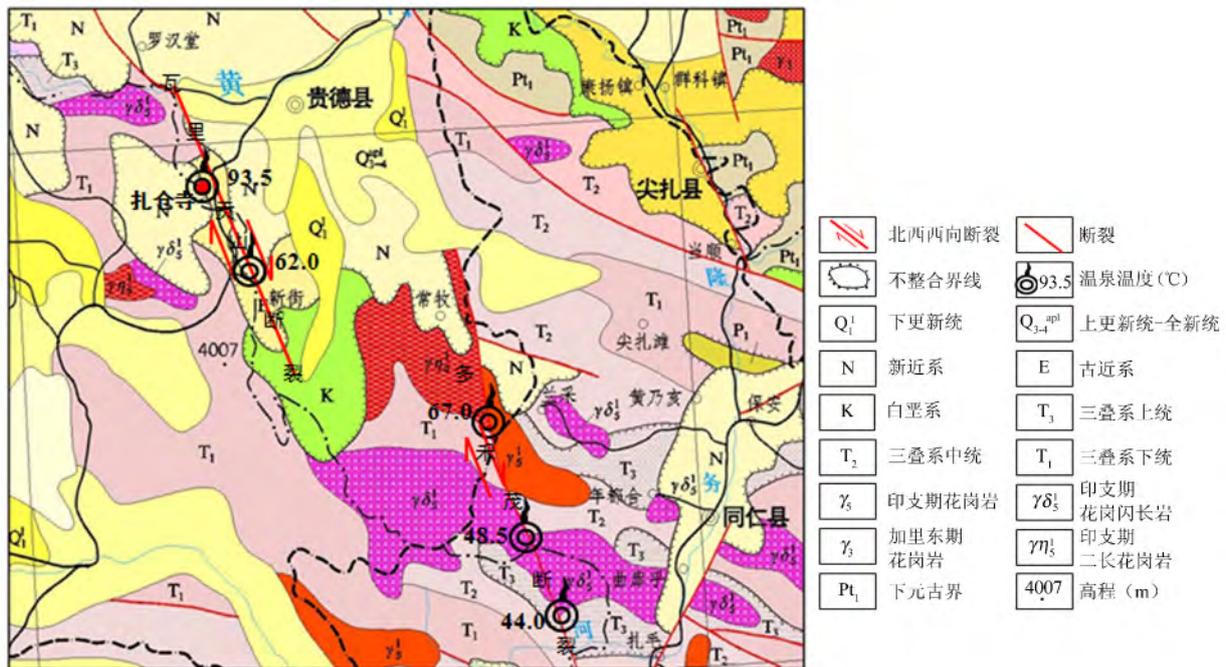


图 6 贵德地区地质构造略图

Fig. 6 Schematic view of regional geological structure

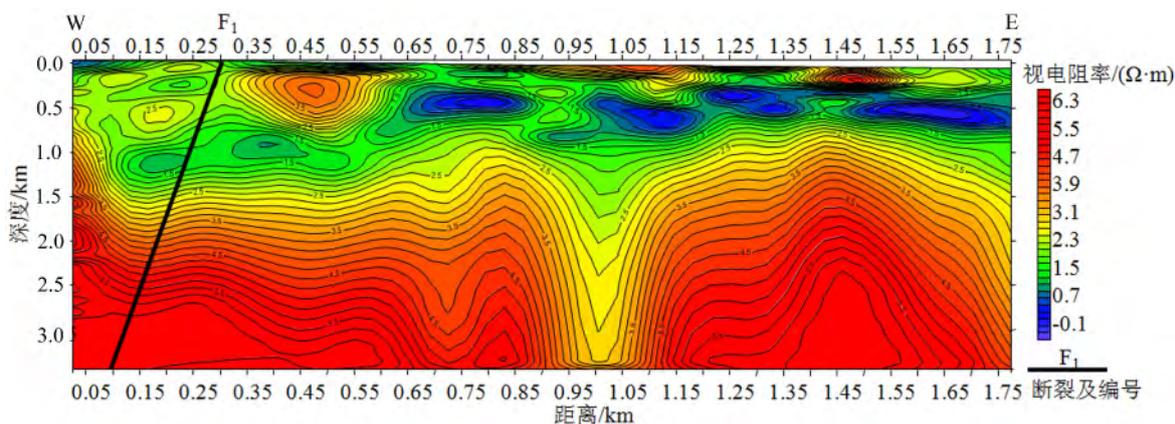


图 7 I 线可控源电磁测量反演结果图

Fig. 7 Results of line I controlled source electromagnetic measurement

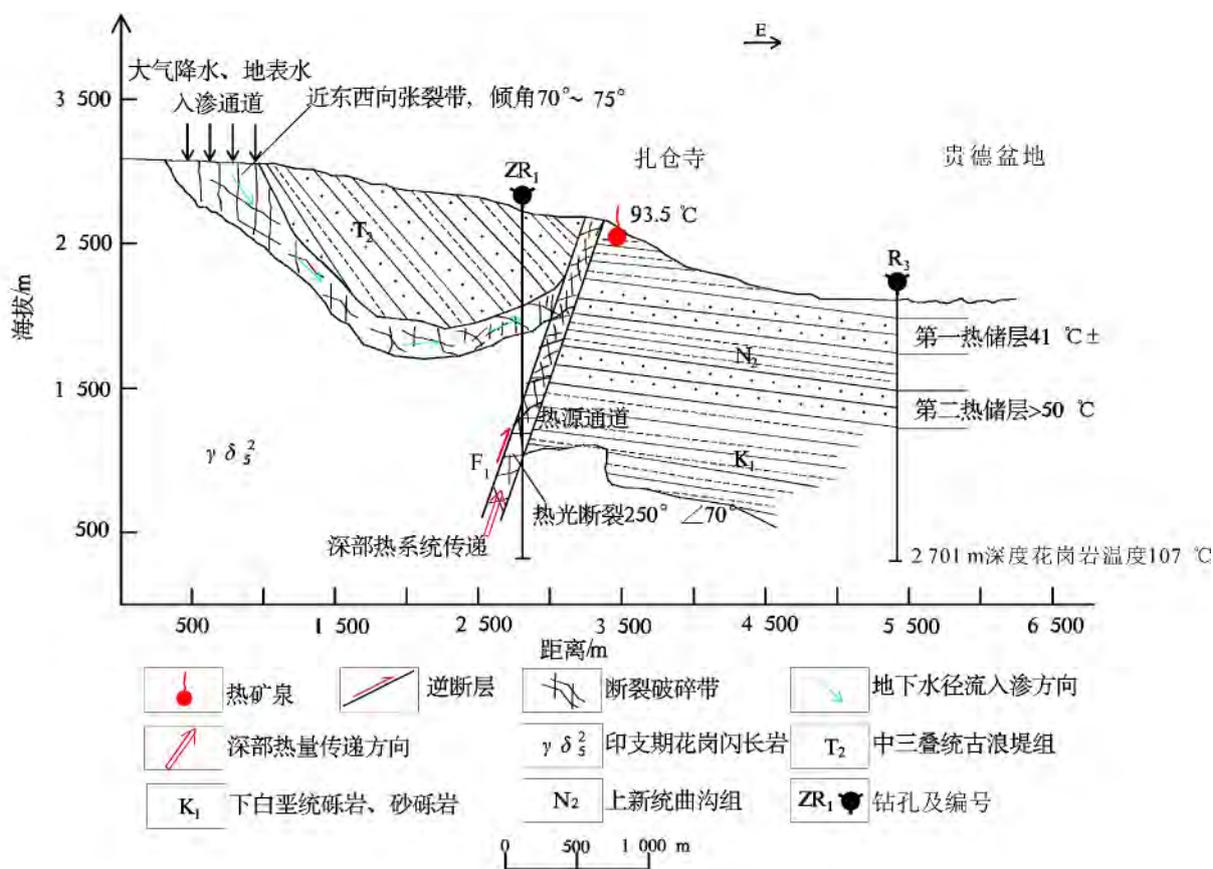


图 8 扎仓寺热储概念模型

Fig. 8 Geothermal reservoir conceptual model of Zhacang Temple

比热容,  $J/(kg \cdot ^\circ C)$ ;  $\varphi$  为岩石的孔隙度。

地热资源可开采量  $Q_{wh}$  是在当前开采经济技术条件下能够从热储中开采出来的那部分储量, 公式<sup>[14]</sup>为

$$Q_{wh} = Q_r R_e \quad (6)$$

式中,  $R_e$  为采收率, %。

扎仓温泉地热资源初步计算结果见表 2。

表 1 温泉的天然放热量计算结果

Table 1 Released heat of the natural hot springs

$Q/(m^3/d)$	$\rho_w/(kg/m^3)$	$c_w/(J/(kg \cdot ^\circ C))$	$t_w/^\circ C$	$t_0/^\circ C$	$Q_w/(10^{10} J/a)$	折合标准煤/( $10^4 t/a$ )
1 036.80	963.33	4 186.80	93.50	7.10	13 187.40	0.45

注:由于小于  $93.5^\circ C$  的温泉与河谷浅层地下水有一定的混合作用,故流量取近于均值,温度取  $93.5^\circ C$ 。

表 2 地热资源初步计算结果

Table 2 Preliminary calculation of Geothermal Resources

$A/(10^6 m^2)$	$d/m$	$t_r/^\circ C$	$t_f/^\circ C$	$c/(J/(m^3 \cdot ^\circ C))$	$Q_r/(10^{14} J)$	$R_c/\%$	$Q_{wh}/(10^{14} J/a)$	折合标准煤/( $10^4 t/a$ )
0.01	400	136.00	7.10	2 172 377.40	11.20	10.00	1.12	0.38

### 3.5 开发利用建议

扎仓寺温泉属于中高温地热资源,适合于地热资源的综合开发和梯级利用。由扎仓温泉的天然放热量和地热资源初步计算结果可以看出,扎仓寺地区地热资源较为丰富<sup>[6]</sup>。而且 1 300 m 以下温度可达  $130.0^\circ C$  以上,具备气化条件和存在干热岩热源。因此,开发利用前景可观。

#### 3.5.1 温泉疗养、洗浴

扎仓温泉水含有丰富的矿物质及微量元素,达到了医疗矿泉水标准,属多微量元素弱碱性硫磺矿泉水,经深入研究表明对多种疾病有奇特的疗效<sup>[6,15,17-19]</sup>。数百年来,省内外各族人民慕名而来治病、保健<sup>[2-4,6]</sup>。通过研究不同疾病的种类、疗程,提供科学的指导,可以促生前景广阔的扎仓温泉医疗保健疗养产业。

#### 3.5.2 冬季供暖

与传统燃烧煤炭等采暖方式相比,地热供暖更经济、更环保。现有较为成熟的热泵(水源热泵和地源热泵<sup>[20]</sup>)供暖技术,可以反复抽取热源中的热量,进行梯级利用,能大幅度提高地热资源的利用率<sup>[6]</sup>。

#### 3.5.3 温泉种植和养殖

贵德深居内陆,属高原大陆性气候,光照时间长,但冬长夏短,且冬季气候干燥,年平均气温仅  $7.2^\circ C$ ,极端最低气温  $-23.8^\circ C$ ,作物生长期 223 d<sup>[2-3,6]</sup>。每年冬季,贵德县生鲜蔬菜完全依赖外部供给<sup>[6]</sup>。利用特有的热水资源,结合较长的光照条件,可以进行温室种植和特色养殖,一方面可以提供新鲜的蔬菜及农副产品,另一方面可以建立以垂钓、采摘、观光为主的特色旅游项目<sup>[6,17]</sup>,对促进当地生态旅游建设有重要促进作用。

#### 3.5.4 干热岩应用前景

地热资源是一种清洁、可再生的能源,主要分为

水热型和干热岩型<sup>[16]</sup>,高温水热型地热资源赋存于高渗透性的孔隙/裂隙介质中,与年轻火山活动或高热流背景相伴生<sup>[21]</sup>;干热岩是普遍埋藏于距地表 3~10 km 的深处、内部不存在流体或仅有少量地下流体的高温岩体<sup>[22-24]</sup>,其温度范围很广,通常为  $150.0\sim 650.0^\circ C$ <sup>[25]</sup>。扎仓温泉温度已达到当地沸点,地热异常区地温梯度可达  $10.52^\circ C/hm$ 。经过计算,地表以下 2 000、4 000、6 000 m 的热储温度分别为  $195.0、385.0、575.0^\circ C$ <sup>[6]</sup>,从物探资料显示,虽然 2 000 m 以深没有较好的热储层,但热光断裂作为热源通道,赋存断裂带型热水机干热岩资源,可以利用“干热岩过程法”发电,并进行深部热能提取,以缓解当地能源匮乏的局面。温泉的补给资源和存储资源是有限的,通常其天然补给量等于温泉流量<sup>[6,26]</sup>。利用干热岩、高温地热水及热泵等多项提取技术,可以人为控制提取量,进行可持续开发利用。

#### 3.5.5 2 000 m 以浅热气田应用前景

据物探资料及图 7 显示,拟施工钻孔设计深度 1 300 m,将揭穿扎仓寺温泉区 1 300 m 以浅的热储层,据推测,其温度将达到  $130.0^\circ C$  以上,将是水汽共成孔,可直接用来示范地热蒸汽发电<sup>[8]</sup>,其研究示范应用前景广阔。

## 4 结论

1) 扎仓寺温泉有泉眼近 30 处,总流量平均值为  $12.0 L/s$ ,最高水温  $93.5^\circ C$ ,其汽化特征,是中、高温地下水,矿化度  $1.31 g/L$ ,属  $SO_4 \cdot Cl-Na$ 。温泉水达到了医疗矿泉水标准,属多微量元素弱碱性硫磺矿泉水,对多种疾病有显著疗效。

2) 通过区域热遥感影像、航磁、重力等资料分析,认为瓦力贡山构造带为区域热力中心。结合实

地调查,认为大气降水和热水沟上游沟谷水为补给源,近东西向张裂为入渗通道,中三叠统砂板岩与 $\gamma\delta_5^{\circ}$ 花岗闪长岩接触变质带为径流通道(热储层),中三叠统砂板岩为盖层,北北西向热光断裂( $F_1$ )为热源通道, $F_1$ 断裂为干热岩目标位置。

3)据计算,径流通道(热储层)温度可达136.0℃,具备蒸汽发电示范背景条件,而 $F_1$ 断裂带附近2000m深度温度可达195.0℃,具备干热岩开发利用前景。

区域热力中心与北北西向断裂右旋走滑并切割花岗岩体的成矿模式,以及热源通道中导热介质除水之外是否与硫有关还需进一步研究。

#### 参考文献(References):

- [1] 吴国禄,李小林. 青海省干热岩显示及其勘查工作部署[J]. 青海国土经略,2014(1):52-54.  
Wu Guolu, Li Xiaolin. The Study of Hot Dry Rock Manifestations and Deployment of Qinghai [J]. Management and Strategy of Qinghai Land and Resources, 2014(1):52-54.
- [2] 王鸿杰. 青海省贵德盆地地下热水初步勘察报告[R]. 西宁:青海省第二水文地质大队,1977-1979.  
Wang Hongjie. Underground Hot Water Preliminary Investigation Report in Guide Basin, Qinghai Province [R]. Xining: Qinghai Second Hydrogeological Brigade, 1977-1979.
- [3] 洪文元,王华书. 新街幅1:20万水文地质普查报告[R]. 西宁:中国人民解放军00929部队,1983.  
Hong Wenyuan, Wang Huashu. Hydrogeological Survey Report with a Scale of 1:200000 in New Street[R]. Xining: PLA 00929 Troops, 1983.
- [4] 郭万成,时兴梅. 青海省(贵德县)盆地地热资源开发利用[J]. 水文地质工程地质,2008(3):79-92.  
Guo Wancheng, Shi Xingmei. The Development and Utilization of Guide Basin's Geothermal Resources of Qinghai Province[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2008(3):79-92.
- [5] 姜春发,王宗起,李锦轶,等. 中央造山带开合构造[M]. 北京:地质出版社,2000:107-110.  
Jiang Chunfa, Wang Zongqi, Li Jinyi, et al. Opening-Closing Tectonics in the Central Orogenic Belt[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2000:107-110.
- [6] 方斌,周训,梁四海,等. 青海省贵德县扎仓寺温泉特征及其开发利用[J]. 现代地质,2009,23(1):57-63.  
Fang Bin, Zhou Xun, Liang Sihai, et al. Characteristics and Utilization of the Zhacang Hot Springs in Guide County, Qinghai[J]. Modern Geology, 2009, 23(1):57-63.
- [7] 陈惠娟,赵振,罗银飞,等. 青海省贵德盆地地热资源评价与开发利用[J]. 青海环境,2010,20(4):196-199.  
Chen Huijuan, Zhao Zhen, Luo Yinfei, et al. The Assessment and Development Utilization of Guide Basin's Geothermal Resources of Qinghai Province [J]. Journal of Qinghai Environment, 2010, 20(4):196-199.
- [8] 刘时彬. 地热资源及其开发利用和保护[M]. 北京:化学工业出版社,2005:171-195.  
Liu Shibin. Exploitation and Protection of Geothermal Resources [M]. Beijing: Chemical Industry Press, 2005:171-195.
- [9] GB 8537-2008 饮用天然矿泉水[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
GB 8537-2008 Drinking Natural Mineral Water [S]. Beijing: China Standard Press, 2009.
- [10] 李小林,龙作元,高忠咏,等. 青海地质环境[M]. 北京:地质出版社,2010:47-56.  
Li Xiaolin, Long Zuoyuan, Gao Zhongyong, et al. Geological Environment in Qinghai [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:47-56.
- [11] 薛建球,甘斌,李百祥,等. 青海共和-贵德盆地增强型地热系统(干热岩)地质-地球物理特征[J]. 物探与化探,2013,37(1):35-41.  
Xue Jianqiu, Gan Bin, Li Baixiang, et al. The Geophysical Characteristics of Enhanced Geothermal Systems(Hot Dry Rock) in Gonghe-Guide Basin of Qinghai Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2013, 37(1):35-41.
- [12] 周训,金晓媚,梁四海,等. 地下水科学专论[M]. 北京:地质出版社,2010:57-60.  
Zhou Xun, Jin Xiaomei, Liang Sihai, et al. Groundwater Science Monographs [M]. Beijing: Geological Publishing House, 2010:57-60.
- [13] 陈墨香,汪集旸,邓孝. 中国地热资源:形成特点和潜力评估[M]. 北京:科学出版社,1994:1-39.  
Chen Moxiang, Wang Jiyang, Deng Xiao. Chinese Geothermal Resources, Formation Characteristics and Potential Assessment [M]. Beijing: Science Press, 1994:1-39.
- [14] GB/T 11615-2010 地热资源地质勘查规范[S]. 北京:中国标准出版社,2011.  
GB/T 11615-2010 Geologic Exploration Standard of Geothermal Resources [S]. Beijing: China Standard Press, 2011.

- [15] 李娟,周训,方斌,等.河北秦皇岛市温泉堡温泉的形成与开发利用建议[J].地质通报,2007,26(3):344-349.  
Li Juan,Zhou Xun,Fang Bin,et al. Formation of Hot Springs at Wenquanpu, Qinhuangdao City, Hebei, China, and Suggestions of Their Exploitation and Utilization[J]. Geological Bulletin of China,2007,26(3):344-349.
- [16] 康玲,王时龙,李川.增强地热系统 EGS 的人工热储技术[J].机械设计与制造,2008(9):141-143.  
Kang Ling, Wang Shilong, Li Chuan. The Artificial Geothermal Reservoir Technology of Enhanced Geothermal Systems EGS[J]. Machinery Design & Manufacture,2008(9):141-143.
- [17] 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.  
Liu Yongtao. A Study of Hydrochemistry and Geyser of Thermal Groundwater in the Banglazhang Geothermal Field in Longling, Yunnan[D]. Beijing: China University of Geosciences,2009.
- [18] 王通国,冯在敏,常允新,等.汤头温泉开发引起的环境地质问题及防治对策[J].中国地质灾害与防治学报,2002,13(1):83-88.  
Wang Tongguo, Feng Zaimin, Chang Yunxin, et al. Environmental Geological Problems Caused by Hot Spring Development in Tangtou and the Prevention Countermeasure [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control,2002,13(1):83-88.
- [19] 方斌,杨运军,王根厚,等.藏北羌塘中部吉瓦地热田的特征及其资源评价[J].地质通报,2009,28(9):1335-1341.  
Fang Bin, Yang Yunjun, Wang Genhou, et al. Characteristics and Resource Evaluation of the Jiwa Geothermal Field in Central Qiangtang, Northern Tibet,China[J]. Geological Bulletin of China,2009,28(9):1335-1341.
- [20] 刘春雷,王贵玲,王婉丽,等.基于现场热响应测试方法的地下岩土热物性分析[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1602-1608.  
Liu Chunlei, Wang Guiling, Wang Wanli, et al. Analysis of Soil Thermal Properties with In-Situ Thermal Response Test Method[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition), 2014, 44(5): 1602-1608.
- [21] 汪集旸,熊亮萍,庞忠和.中低温对流型地热系统[M].北京:科学出版社,1993.  
Wang Jiyang, Xiong Liangping, Pang Zhonghe. Low-Medium Temperature Geothermal System of Convective Type[M]. Beijing: Science Press, 1993.
- [22] 许天福,张延军,曾昭发,等.增强型地热系统(干热岩)开发技术进展[J].科技导报,2012,30(32):42-45.  
Xu Tianfu, Zhang Yanjun, Zeng Zhaofa, et al. Technology Progress in an Enhanced Geothermal System(Hot Dry Rock)[J]. Science & Technology Review,2012,30(32):42-45.
- [23] Grant M A, Bixley P F. Geothermal Reservoir Engineering[M]. New York: Academic Press Inc,2011.
- [24] 雷宏武,金光荣,李佳琦,等.松辽盆地增强型地热系统(EGS)地热能开发热-水动力耦合过程[J].吉林大学学报(地球科学版),2014,44(5):1633-1646.  
Lei Hongwu, Jin Guangrong, Li Jiaqi, et al. Coupled Thermal-Hydrodynamic Processes for Geothermal Energy Exploitation in Enhanced Geothermal System at Songliao Basin,China[J]. Journal of Jilin University(Earth Science Edition),2014,44(5):1633-1646.
- [25] Brown D. The US Hot Dry Rock Program-20 Years of Experience in Reservoir Testing[C]//Proceeding of World Geothermal Congress,1995:2607-2611.
- [26] 李怡,张启.热干岩发电系统[J].国外科技动态,1995(5):56-56.  
Li Yi, Zhang Qi. Hot Dry Rock Power Generation System[J]. Recent Developments in Science & Technology Abroad,1995(5):56-56.