

河北丰宁县洪汤寺温泉的水化学与同位素特征

张雪¹, 周训¹, 李再光², 王莹¹, 许庭武¹, 郭小娟¹

(1. 中国地质大学水资源与环境学院, 北京 100083; 2. 海南水文地质工程地质勘察院, 海口 571100)

摘要: 河北丰宁县的洪汤寺温泉出露于燕山期第四期的钾长花岗岩中, 是由地下水接受大气降水入渗补给后向深处循环获得热量上升到地表后形成的。其 TDS 小于 400 mg/L, 主要阳离子为 Na^+ , 主要阴离子为 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- , 水化学类型属于 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水, 特点为 F^- 、偏硅酸以及氧含量高, 分别为 17.5 mg/L、75.7 mg/L 和 131.1 Bq/L。热水的同位素资料表明, 洪汤寺温泉热水起源于大气降水, 用氡法估算出的年龄在 22a 以上。利用地热温标估算地下热储温度范围为 79 ~ 109℃。钻孔揭露后自流量增大, 达 11.6 L/s。

关键词: 温泉; 地下热水; 水化学; 同位素; 热储温度

中图分类号: P314.1; P641.5

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2010)05-0123-05

我国有着非常丰富的地热资源, 其中以中低温地热资源较多。河北省丰宁县的洪汤寺温泉, 富含偏硅酸、氟、氡、锂、锶等多种对人体健康有益的微量元素, 具有保健、祛病之功效, 长期被用于温泉洗浴、疗养、度假。前人对洪汤寺温泉的化学特征、综合指标特征、地质构造特征及热水的起源和成因进行过比较详细的分析^[1-5]。本文利用样品测试结果, 结合前人的研究成果, 总结了洪汤寺温泉的出露条件, 并对热水的水化学和同位素特征进行了分析, 探讨了温泉的起源、年龄、热储温度以及天然放热量等问题。

1 区域地质背景

1.1 地质概况

洪汤寺温泉位于河北省丰宁县汤河乡洪汤寺村, 在丰宁县城西南部约 18 km 处。地处山地丘陵区, 其中发育有 NW—SE 向的汤河, 周围有大小不一的山间沟谷地。温泉出露在中低山与山间谷地的接触部位上, 属于裂隙构造上升泉(图 1)。

研究区属侵蚀构造地貌, 主要为由缓慢上升的山坡和被剥蚀微弱切割所生成的低山山崖地形组成, 北部和西部一般是山高谷深, 切割强烈, 山脊陡峻, 南部和东部则为平缓的低山地形, 山顶平缓, 沟谷宽阔^[1]。

研究区出露的地层和岩体主要有燕山期的钾长花

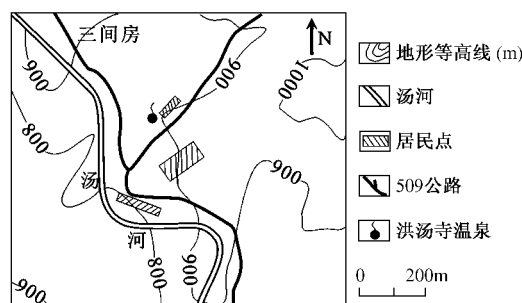


图1 洪汤寺温泉地理位置图

Fig. 1 Location map of the Hongtangsi hot spring

岗岩、石英正长斑岩和中粒、中细粒二长花岗岩, 印支期的中粒二长花岗岩, 中元古界的斑状二长花岗岩, 早元古界的变斑状花岗闪长岩, 以及中生界侏罗系张家口组 and 森吉图群花吉营组的角砾凝灰岩、砂砾岩、粗砂岩和安山岩等, 上覆有第四系黄土状亚砂土^[6](图 2)。

从构造上看, 研究区属东西向及新华夏两大构造体系中的丰宁—隆化断裂带, 其后期多次受到构造运动的影响, 岩石破碎, 形成了压性和压扭性的断裂破碎带, 并伴生有张性及张扭性断裂。温泉附近发育 NNE10° ~ 30° 压性断裂和 NW300° ~ 330° 张性断裂。

温泉附近岩石节理裂隙是一组倾向 SW、倾角 70° ~ 80° 的裂隙构造, 热水主要来自北西方向。

1.2 温泉简述

洪汤寺温泉共有 3 个天然泉眼, 有资料记载的温泉流量为 0.42 L/s, 现在泉眼处打有一眼钻孔, 已不见天然泉眼。泉眼处钻孔自流热水, 流量约为 11.6 L/s, 实测水温为 50℃, pH 值为 8.47。

泉眼处钻孔自流的热储水储存于一个直径约 3m 高约 2m 的圆柱形水池中。孔口处自流出来的热水水质

收稿日期: 2010-03-15; 修订日期: 2010-04-12

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(40972163, 40572147)

作者简介: 张雪(1987-), 女, 硕士研究生, 主要从事水文地质方面的研究。

通讯作者: 周训, E-mail: zhouxun@cugb.edu.cn

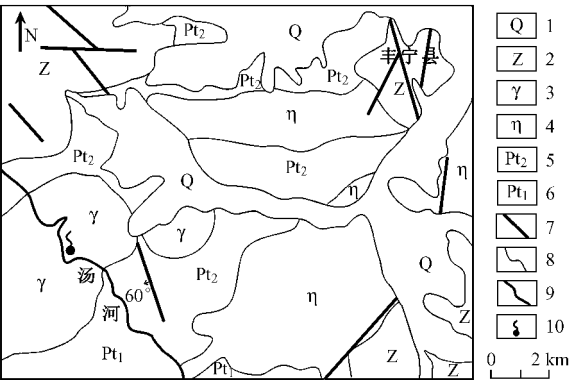


图 2 洪汤寺温泉地质略图

Fig. 2 Simplified geologic map of the Hongtangsi hot spring area

1—第四系上更新统;2—侏罗系张家口组;3—燕山期花岗岩;
4—印支期花岗岩;5—中元古界二长花岗岩;6—早元古界花
岗闪长岩;7—断层;8—地质界线;9—汤河;10—洪汤寺温泉

表 1 洪汤寺温泉水化学测试结果

Table 1 Hydrochemical analyses of the Hongtangsi hot spring

离子 (mg/L)	1959 年	2008 年	项目 (mg/L)	1959 年	2008 年	项目	1959 年	2008 年
K ⁺	—	2.17	SiO ₂	30	58.23	铅 (mg/L)	—	<0.000 8
Na ⁺	—	98.9	偏硅酸	39	75.7	锰 (mg/L)	—	0.005
K ⁺ + Na ⁺	88.94	101.07	偏硼酸	—	<0.002	铝 (mg/L)	—	<0.01
Ca ²⁺	3.691	5.0	偏磷酸	—	0.2	H ₂ S (mg/L)	—	<0.05
Mg ²⁺	1.2111	0.6	偏磷酸	—	<0.01	pH 值	8.3	8.88
NH ₄ ⁺	—	<0.02	游离 CO ₂	—	0.0	耗氧量 (O ₂ mg/L)	0.73	—
Fe ²⁺ + Fe ³⁺	0.08	<0.004	侵蚀 CO ₂	4.906	—	灼热残渣 (mg/L)	98	—
HCO ₃ ⁻	67.054	63.5	锂	—	0.181	总硬度 (CaCO ₃ mg/L)	12.423	15
CO ₃ ²⁻	—	18.0	锶	—	0.291	暂时硬度 (CaCO ₃ mg/L)	12.423	—
Cl ⁻	21.197	19.9	溴化物	—	<0.05	负硬度 (CaCO ₃ mg/L)	48.222	—
SO ₄ ²⁻	—	75.9	锌	—	0.094	总碱度 (CaCO ₃ mg/L)	—	82.1
F ⁻	—	17.5	硒	—	<0.000 1	总酸度 (CaCO ₃ mg/L)	—	0
I ⁻	—	<0.02	铜	—	<0.000 8	²²⁶ Ra (Bq/L)	—	0.117
NO ₂ ⁻	0.6979	<0.001	汞	—	<0.000 05	²²² Rn (Bq/L)	—	131.1
NO ₃ ⁻	1	0.19	镉	—	<0.000 04	D (‰)	—	-95
Cr ⁶⁺	—	<0.001	银	—	0.005 6	¹⁸ O (‰)	—	-12.6
TDS	384	302	钡	—	0.001	T (TU)	—	2.9 ± 1.3

整体上看,洪汤寺温泉近 50 年来大部分化学成分并没有很大变化。其中,变化较大的有 Fe²⁺ + Fe³⁺、NO₂⁻、NO₃⁻ 和偏硅酸成分,Fe²⁺ + Fe³⁺ 的含量由 1959 年的 0.08mg/L 降至现在的不足 0.004mg/L;NO₂⁻ 含量大幅下降,由 0.697 9mg/L 减至不足 0.001mg/L;NO₃⁻ 含量下降到原来的 1/5;偏硅酸的含量上升至原来的两倍。

单看 2008 年的测试结果,对洪汤寺温泉的主要离子进行分析(图 3)可知,温泉的阳离子主要为 Na⁺,其毫克当量百分数在 90% 以上,阴离子主要为 SO₄²⁻ 和 HCO₃⁻,其毫克当量百分数分别在 45% 和 30% 左右。

清澈,伴有气泡逸出,在孔口井管壁上沉积有轻微钙华。该温泉现供三家宾馆用于洗浴,仍有富余热水。

温泉出露于燕山期第四次侵入的钾长花岗岩中,其周围没有新的岩浆活动。温泉西北方基岩山区的地下水在接受降水和汤河上游地表水的补给后,沿风化裂隙、裂隙构造循环至花岗岩侵入体的深部受热,之后在循环径流中受到扭性断层的阻水作用,地下热水因比重变轻,在水动力作用下沿着张性断裂上升溢出,形成温泉^[3]。

2 水化学特征

2.1 水化学成分特征

于 2008 年 9 月采集洪汤寺温泉水样进行测试,本次水化学测试结果和 1959 年的测试资料^[1]列于表 1。

洪汤寺温泉为 SO₄·HCO₃—Na 型水。

次要离子中,洪汤寺温泉的 F⁻ 以及 NO₃⁻ 含量较高。其中 F⁻ 含量达 17.5mg/L,远高于饮用水标准中对氟化物不超过 1.0mg/L 的要求,为洪汤寺温泉的一个显著特点。

洪汤寺温泉的另一个显著特点是偏硅酸含量也较高,为 75.7mg/L。这是因为洪汤寺温泉的热水循环于含有大量硅酸盐岩的花岗岩中,且直接出露于基岩裂缝中,与含硅酸盐矿物接触面积较大所造成的。

洪汤寺温泉的第三个显著特点是它的氡含量。与附近几处温泉相比(表 2),洪汤寺温泉的氡含量高达

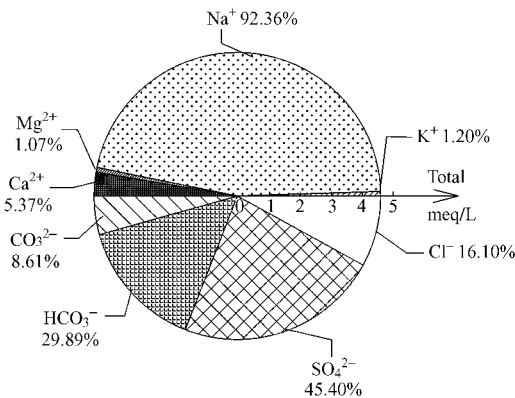


图 3 洪汤寺温泉主要离子饼图

Fig. 3 Circular diagram of major ions of the Hongtangsi hot spring

131.1 Bq/L,是其他几处温泉的 15 ~ 36 倍。

表 2 洪汤寺温泉附近几处温泉的镭氡测试结果

Table 2 Ra-Rn test results of several hot springs near Hongtangsi

温泉名称	白庙温泉	赤城温泉	塘子庙温泉	松山温泉	遵化汤泉
地点	河北张家口	河北赤城	河北赤城	北京延庆	河北遵化
²²⁶ Ra (Bq/L)	0.102	0.039	0.051	0.098	0.062
²²² Rn (Bq/L)	3.62	7.55	4.2	4.4	8.89

2.2 综合指标特征

由表 3 可知,洪汤寺温泉的出露温度 50 年来略有上升。TDS 一直偏小,较 1959 年有所下降,目前为

表 3 洪汤寺温泉不同年份综合指标对比

Table 3 Variation in the comprehensive index of the Hongtangsi hot spring with time

采样日期	1945-02-09	1959-08-15	1975	2008-09-04
分析日期	—	1959-08-29	不详	2008-09-18
味	无	无	—	—
嗅	无	无	—	—
颜色	—	无	—	—
透明度	透明	透明	—	—
温度(℃)	48	49.5	49.5	50
TDS(mg/L)	—	384	248.3	302
总硬度 (CaCO ₃ mg/L)	—	12.423	14.24	15
pH	—	8.3	8.4	8.88
偏硼酸(mg/L)	—	—	17.5	0.2
SiO ₂ (mg/L)	—	30	30	58.23
F ⁻ (mg/L)	—	—	6.4	17.5
流量(L/s)	—	0.783	1.5	11.6

注:1945 年数据引自船越素一编著的《河北省丰宁县红汤寺温泉调查报
文》(1945)中泉源 I 数据;1959 年数据引自文献 [4];1975 年数据引自
文献 [5]。

302mg/L,属于弱矿化水。总硬度与之前相比呈上升状态,但上升幅度不大,属于极软水。pH 大于 7,变化幅度不大,属于弱碱性水。

洪汤寺温泉的流量在 1959 年仅为 0.783 L/s [4], 1975 年上升至 1.5 L/s [5],本次调查时自流量已达到 11.6 L/s,上升幅度非常大。分析认为,洪汤寺温泉流量的大幅度增加与近年来的开发利用有关,泉眼经过钻孔揭露,形成自流热水井,加速了地下热水的循环,致使流量有所增加 [5]。

3 同位素特征

地下水在演化过程中,除了能形成其一般的物理、化学踪迹外,还形成了大量微观的同位素踪迹,这些微观踪迹记录着地下水的起源及其演化的历史过程。同位素方法获取水文地质信息的主要依据是稳定同位素和放射性同位素能对水起着标记作用和计时作用 [7]。本文将利用同位素方法对洪汤寺温泉的起源及年龄进行简单的分析和计算。

3.1 温泉起源

1961 年,Craig 最先提出了全球大气降水线,通过总结全球各地区大气降水中的 δD、δ¹⁸O 数值变化范围及二者之间的关系,得出了用于判断地下水现代补给来源的 Craig 降水线。研究表明,绝大部分地热系统中的热水来自大气降水 [8]。

洪汤寺温泉的 δD 和 δ¹⁸O 值分别为 -95‰ 和 -12.6‰,通过与全球大气降水线比较,可以看出表示洪汤寺温泉的数据点落于全球大气降水线附近(图 4),因此判断温泉的起源为大气起源。

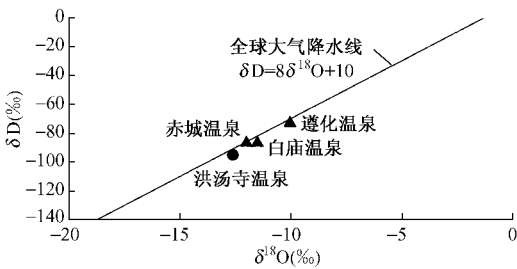


图 4 洪汤寺温泉的 δD 和 δ¹⁸O 关系

Fig. 4 δD - δ¹⁸O plot of the Hongtangsi hot spring

3.2 温泉年龄

温泉的年龄是利用氡法进行估算的,根据氡的放射性衰变原理 [9] 可知:

$$N = N_0 \times e^{-\lambda t} \tag{3}$$

式中:λ ——氡的衰变常数,λ = ln2 / t_{1/2},由于氡的半

衰期为 12.43 a,故 $\lambda = 0.056 \text{ a}^{-1}$;

N ——氙元素的当前值(TU);

N_0 ——氙元素的背景值(TU)。

由于自然界中的氙含量一般都大于 10 TU,故此处所用的氙背景值 N_0 假设为 10TU。氙的当前含量为 2.9TU,因此可计算出氙年龄为 22.20 年。由于通常氙的背景值都大于当前背景值取值,故可推断洪汤寺温泉的氙年龄大于 22 年。

4 热储温度估算

在地热资源勘探过程中,深部热储温度是评价地热资源不可缺少的重要参数。通常在野外实地观测时得到的温度是热水出露地表后的温度,而非热储温度。利用地热温标方法可以估算地下热水的热储温度。

常用的地热温标有石英(SiO_2)温标、阳离子温标和同位素温标等。在对洪汤寺温泉的热储温度进行估算前,要先用 Giggenbach 提出的三角形图解法^[6]对地下热水的平衡状态和类型进行划分。由图 5 可知,洪汤寺温泉位于未成熟区,因此不适宜用阳离子估算热储温度,而应选择 SiO_2 温标进行计算。

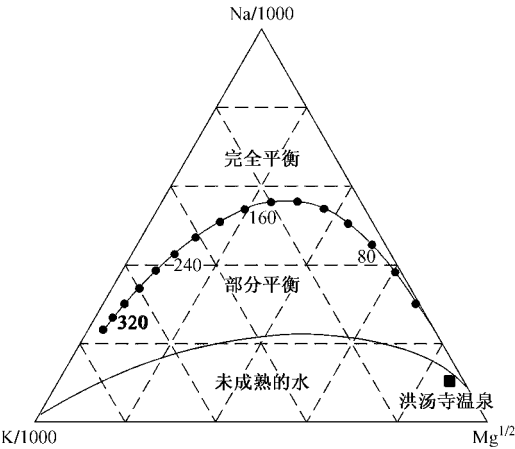


图 5 洪汤寺温泉 Na - K - Mg 三角图解

Fig. 5 Na-K-Mg diagram of the Hongtangsi hot spring

SiO_2 温标的理论基础是硅矿物在热液中的溶解-沉淀平衡理论。根据 SiO_2 的五个温标公式^[1]计算出的洪汤寺温泉热储温度结果列于表 4。由此可以估算出洪汤寺温泉的热储温度范围在 79 ~ 109℃。

表 4 洪汤寺温泉热储温度计算结果

Table 4 Temperatures of the geothermal reservoir of the Hongtangsi hot spring	
计算公式	热储温度 (℃)
石英 ¹ (无蒸汽分离或混合作用)	
$T = -42.198 + 0.288\,31 \times \text{SiO}_2 - 3.668\,6 \times 10^{-4} \times (\text{SiO}_2)^2 + 3.166\,5 \times 10^{-7} \times (\text{SiO}_2)^3 + 77.034 \times \lg \text{SiO}_2$	109.39
石英 ² (无蒸汽散失)	
$T = \frac{1\,309}{5.19 - \lg \text{SiO}_2} - 273.15$	109.06
石英 ³ (蒸汽足量散失)	
$T = \frac{1522}{5.75 - \lg \text{SiO}_2} - 273.15$	108.80
α -方石英	
$T = \frac{1\,000}{4.78 - \lg \text{SiO}_2} - 273.15$	58.54
玉髓(无蒸汽损失)	
$T = \frac{1\,032}{4.69 - \lg \text{SiO}_2} - 273.15$	79.69

5 温泉放热量估算

根据以下公式可以估算洪汤寺温泉的天然放热量^[2]:

$$Q = 365 \times q \times \rho \times c \times (t_1 - t_0) \tag{3}$$

式中: Q ——温泉的放热量(J/a);

q ——温泉的流量(m^3/d);

ρ ——温泉热水的密度(kg/m^3);

c ——温泉热水的比热容($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$);

t_1 ——温泉热水的温度($^\circ\text{C}$);

t_0 ——非热异常区恒温层温度($^\circ\text{C}$)。

将已知数据代入式(3),计算结果见表 5。

表 5 洪汤寺温泉天然放热量计算结果

Table 5 Heat discharges of the Hongtangsi hot spring

温泉 名称	流量		热水比热	热水密度	温度(℃)			温泉天然放热量	
	(L/s)	(m^3/d)	($\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$)	(kg/m^3)	热水温度	恒温层温度	温差	天然放热量 Q ($\times 10^{10} \text{ J/a}$)	折合标准煤(t/a) ($Q/(2.927 \times 10^{10})$)
洪汤寺温泉	11.6	1 002.24	4 186.8	988	50	12	38	5 750.26	1 964.56

6 结论

洪汤寺温泉的实测水温为 50℃,属于中低温热水;TDS 为 302mg/L,属于低矿化水;总硬度为 15mg/L (CaCO_3),属于极软水;pH 值为 8.88,属于弱碱性水;经钻孔揭露后,温泉热水的循环加快,流量增大,约 11.6 L/s。主要阳离子为 Na^+ ,主要阴离子为 SO_4^{2-} 和 HCO_3^- ,为 $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型水。温泉共有三个显著特点: F^- 含量高,偏硅酸含量高以及氨含量高。

同位素分析表明,洪汤寺温泉为大气起源,根据氡法的年龄估算认为,洪汤寺温泉的年龄在 22 年以上。在使用 Na-K-Mg 三角图解分析后,使用 SiO_2 温标估算出的热储温度 79 ~ 109℃。天然放热量为 5.75×10^{13} J/a。

洪汤寺温泉的补给来源丰富,热源温度高,循环时间短,在钻孔揭露后流量大幅提升,水温不但没有降低,还略有上升,具有开发潜力。

参考文献:

- [1] 谢超凡,安可士,唐炽昌.河北东部的矿水[C]//地质部水文地质工程地质研究所.水文地质工程地质论文集 3.北京:地质出版社,1959:133-171.
- [2] 张振利.丰宁幅 K-50-27 1/20 万区域地质图说

明书[S].河北:河北省地矿局区域地质调查大队,1993.

- [3] 李保国.电法勘探在地热勘查中的应用[J].水文地质工程地质,2002,29(4):55-57.
- [4] 彭汉兴.丰宁幅 K-50-27 1/20 万综合地质-水文地质测绘图幅说明书[S].河北:地质部宣化地校,水文地质普查大队,1959.
- [5] 河北省地质局.河北省水文地质图说明书(1/50 万)[S].石家庄:河北省地质局,1975.
- [6] 周训,周海燕,方斌,等.浅析开采条件下地下热水资源的演变[J].地质通报,2006,25(4):482-486.
- [7] 王恒纯.同位素水文地质概论[M].北京:地质出版社,1991.
- [8] Zhou Xun, Fang Bin, Zhou Haiyan, et al. Isotopes of deuterium and oxygen-18 in thermal groundwater in China [J]. Environmental Geology, 2009, 57(8): 1807-1814.
- [9] 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.
- [10] Giggenbach W F. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na-K-Mg-Ca geoindicators [J]. Geochim Cosmochim Acta, 1988(52): 2749-2765.
- [11] 王莹,周训,于潋.应用地热温标估算地下热储温度[J].现代地质,2007,21(4):605-612.
- [12] DZ40-85 地热资源评价方法[S].

Hydrochemical and isotopic characteristics of the Hongtangsi hot spring in Fengning County of Hebei Province

ZHANG Xue¹, ZHOU Xun¹, LI Zai-guang², WANG Ying¹, XU Ting-wu¹, GUO Xiao-juan¹

(1. School of Water Resources and Environment, China University of Geosciences, Beijing 100083, China;

2. Hainan Institute of Hydrogeology and Engineering Geology, Haikou 571100, China)

Abstract: The Hongtangsi hot spring in Fengning County of Hebei Province occurs in feldspar granite of the Fourth Epoch of the Yanshan Period. It is the discharge vent of thermal groundwater which receives recharge from precipitation and is heated when undergoing deep circulation. The hot water has TDS of less than 400mg/L with major cations of Na^+ , and anions of SO_4^{2-} and HCO_3^- . The hot spring is of $\text{SO}_4 \cdot \text{HCO}_3 - \text{Na}$ type and has high concentrations of F^- , H_2SiO_3 and Rn of 17.5mg/L, 75.7mg/L and 131.1 Bq/L, respectively. Isotopic compositions of the hot water indicate that the Hongtangsi hot spring is of meteoric origin and the residence time estimated with ^3H method is greater than 22 years. The temperature of the geothermal reservoir estimated with geothermometers ranges from 79℃ to 109℃. The discharge of the flowing well tapping the hot water increases to 11.6 L/s.

Key words: hot spring; thermal groundwater; hydrochemistry; isotope; temperature of geothermal reservoir

责任编辑:汪美华