

# 云南丽江观测井水温趋势上升原因分析\*

李利波<sup>1</sup>, 邓盛昌<sup>2</sup>, 杨永文<sup>2</sup>, 毛泽斌<sup>1</sup>

(1. 云南省地震局, 云南 昆明 650224; 2. 丽江市地震局, 云南 丽江 674100)

**摘要:** 针对云南丽江观测井水温自2012年来处于趋势上升状态这一现象, 分析了该井的水文变化过程, 利用Piper图、Schoeller图和氢氧同位素等方法, 对其地下水化学特征及与周围水体的水力联系进行定量分析, 讨论了该井水温上升变化原因。结果认为: 该井断流时受深部地下水径流补给, 地下水类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Na}$ 型, 自流时受大气降水直接补给, 地下水类型为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 型; 该井水-岩反应程度较弱, 与周围水体有明显的水力联系, 受地表水影响较大, 所携带的深部信息较少。该井2012年断流后, 水温受深部热水上升影响表现为持续上升状态; 受雨季降雨量影响, 水温随水位变化表现出一定程度的年变形态, 分析认为该时期的前兆特征不明显。

**关键词:** 水温; 趋势上升; 地下水化学特征; 丽江观测井

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2019)03-0358-08

## 0 引言

地下流体是影响地震孕育与发生的重要因素, 可灵敏反映重要前兆信息 (Raleigh, 1976; Simpson, 1986)。流体是地壳中最为活跃的组分, 可造成岩石软化、空隙压力增加、流体受热膨胀等影响, 从而诱发地震 (Byerlee, 1978; Shi, Wang, 1982; 车用太, 杨会年, 1989)。地下流体水温观测中微小的变化可能反映地震孕育、发展和发生过程或地壳构造活动引起热状态的改变, 在地震监测预报研究中发挥着重要的作用, 因此水温异常识别和提取是地震预测预报的一种有效手段。在地下流体水温变化与构造活动的关系研究中, 国内外许多学者认为地震确实能引起水温的变化, 并尝试从大量监测数据中分析其异常机理 (Mogi *et al.*, 1989; Sohn *et al.*, 1998; Baker *et al.*, 1999; 车用太, 鱼金子, 1996; 刘耀炜等, 2008)。

云南丽江观测井水温从2012年以来趋势上升, 年变幅度也变大, 在该井周围及邻区曾多次发生M5.0以上中强地震。杨竹转等 (2018) 从区域水文地质、井孔结构和水温梯度试验等方面, 分析了该井水温动态的基本特征。在地下水循环过程中, 水化学组分及环境同位素作为示踪剂, 在一定程度上记录着水分运移、转化的历史, 可有效

揭示流域内地表水和地下水之间的关系 (Scholler, 1962; 刘耀炜等, 2009; 张磊等, 2016)。2017年漾濞M5.1地震后, 该井水温又出现快速上升现象。本文从丽江观测井的地下水文变化过程, 定量分析其地下水化学特征及其与周围水体的水力联系, 探讨该井水温上升的原因。

## 1 观测井基本情况

丽江观测井位于云南省丽江市古城区北面的象山脚下, 丽江盆地东北缘。该井于1984年7月建成, 成井深度为347 m, 初为自流井, 1992年3月开始水位观测。2007年6月对该井进行数字化改造, 井深为310 m, 并增加水温观测, 探头位于井下300 m, 含水层为三叠系北衙组(T2b)灰岩、白云质灰岩 (图1a) (云南省地震局, 2005)。该井水温正常动态为年变型, 旱季缓慢上升, 雨季快速下降, 年变幅度约为0.02℃。2011年11月23日开始断流, 变为静水位观测。

该井地下水类型与其北侧的黑龙潭泉群一致, 均为碳酸盐裂隙岩溶水, 补给区为大气降雨和北部的九子海溶蚀区 (康晓波等, 2013)。在区域构造上, 该井位于川滇菱形块体中部西侧, 是红河断裂北段、龙蟠—乔后断裂、丽江—剑川断裂、鹤庆—洱源断裂等构造复合交汇部 (国家地震局

\* 收稿日期: 2018-11-19.

基金项目: 云南省地震局青年地震科学基金项目 (2017ZL13) 资助.



深部较高温度的水通过传导、对流与浅层水发生热交换,水温表现为随水位变化的年变形态,二者基本呈反相关特征(图 2b);水位上升至泄流时,较低温度的水加速向井孔溢出,水温快速下降(图 2c)。这与杨竹转等(2018)做的水温梯度实验结果一致,分析认为该过程受补给区的水源温度较低影响。

3 地下水化学特征

笔者曾 2 次现场采集地下水样品,第一次时间为 2018 年 7 月 28 日,丽江观测井处于断流状态(样品①);第二次时间为 2018 年 10 月 12 日,该井处于自流状态(样品②)。同时采集了观测井旁的玉河,上游黑龙潭泉群中的洗象池、珍珠泉和补给水(引自上游的清溪水库、白水河和拉市海等),以及目前仍在观测的金甲井水样(甘泽泉已干涸,未取样)进行对比。水质分析委托中国地震局地壳应力研究所(地壳动力学重点实验室)负责,结果见表 1。

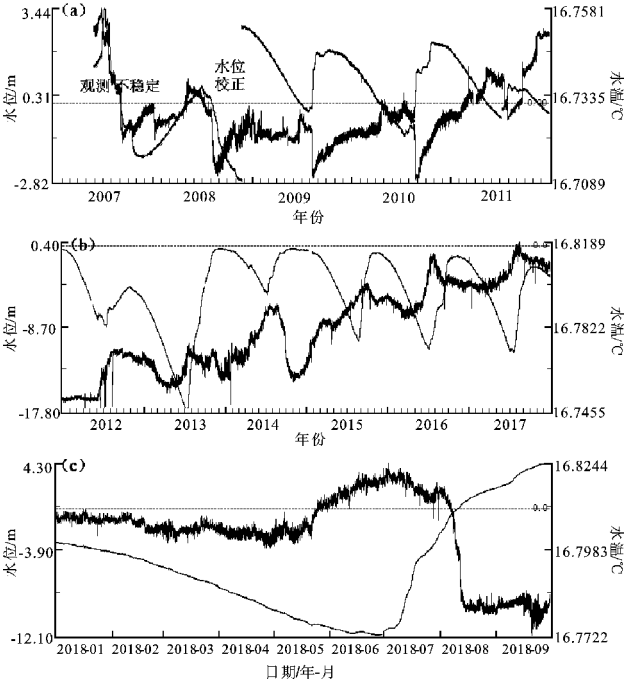


图 2 丽江观测井水温与水位的同轴动态曲线

Fig. 2 Coaxial dynamic curves of water level and water temperature of Lijiang observation well

表 1 水样化学组分分析结果

Tab. 1 Results of chemical composition analysis of water samples

单位: mg/L

测项		丽江井样品①	丽江井样品②	玉河	洗象池	珍珠泉	补给水	金甲井
阳离子	Na <sup>+</sup>	36.00	3.22	4.83	4.14	6.83	5.29	22.00
	K <sup>+</sup>	1.02	16.13	0.55	0.57	1.17	1.15	0.95
	Mg <sup>2+</sup>	10.17	19.11	13.47	14.47	14.79	12.95	15.48
	Ca <sup>2+</sup>	14.74	41.10	57.77	49.99	60.34	58.45	23.00
阴离子	F <sup>-</sup>	0.16	0.49	0.14	0.15	0.48	0.33	0.16
	Cl <sup>-</sup>	4.52	0.81	2.25	1.56	3.26	2.76	17.80
	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	17.24	8.35	9.70	9.31	10.87	9.78	5.94
	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.88	0.96	2.52	0.90	1.34	3.84	0.29
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	172.36	209.90	230.89	210.75	241.38	230.89	167.92
氢氧同位素	δ <sup>18</sup> O (‰)	-14.94	-15.34	-13.70	-14.10	-13.42	-13.51	-13.83
	δD (‰)	-109.44	-112.32	-101.93	-104.89	-100.78	-101.09	-100.82

对比 2 次测试结果,丽江观测井自流状态下的阳离子 Na<sup>+</sup> 含量比断流状态下明显减少, K<sup>+</sup>、Ca<sup>2+</sup> 含量明显增加;阴离子 SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> 含量减少, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> 含量增加;氢氧同位素变化不大。从水样的 Piper 图看出,该井断流状态下的地下水类型为 HCO<sub>3</sub>-Na 型,自流时为 HCO<sub>3</sub>-Ca 型(图 3a),显示断流状态下的地下水有一定程度的离子交换

作用, Na<sup>+</sup> 交换吸附 Ca<sup>2+</sup>, 从重碳酸型水转为碱性水特征。周围水体中,玉河、洗象池、珍珠泉和补给水的地下水类型均为 HCO<sub>3</sub>-Ca 型,金甲井为 HCO<sub>3</sub>-Ca·Na 型。

从水样的 Na-K-Mg 三角图来看,丽江观测井的 2 次测试结果均落在“未成熟水区域”,且非常接近 Mg 端元(图 3b),表明该井目前的水-岩

反应程度较弱，水-岩之间尚未达到离子平衡状态，所携带的深部信息较少，受地表水影响较大。周围水体中，玉河、洗象池、珍珠泉、补给水和金甲井的地下水均属于“未成熟水”，受地表水影响较大。

从水样的氢氧同位素曲线来看，丽江观测井的2次测试结果均落在全球大气降水线（GMWL）上（图3c），表明其水体主要受大气降雨补给，水-岩反应程度较弱。玉河的地下水也落在GMWL上，主要受大气降雨补给；金甲井、珍珠泉和补给水的测试结果位于GMWL右上方，发生“ $^{18}\text{O}$  漂移”，受蒸

发作用影响；洗象池的测试结果位于 GMWL 右侧，表明该地下水有一定程度的水-岩反应。

从水样的 Schoeller 图来看，丽江观测井的2次测试结果除了  $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$  含量变化较大外，其它离子含量变化很小（图3d），表明断流状态下的地下水  $\text{Na}^{+}$ 、 $\text{K}^{+}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  发生了一定程度的离子交换作用。玉河、洗象池、珍珠泉、补给水的离子含量与丽江井②的大致相当，表明这些地下水之间有明显的水力联系；金甲井的  $\text{Cl}^{-}$ 、 $\text{Ca}^{2+}$  和  $\text{Na}^{+} + \text{K}^{+}$  含量与其他水体有明显差别，显示该井有一定程度的水-岩反应。

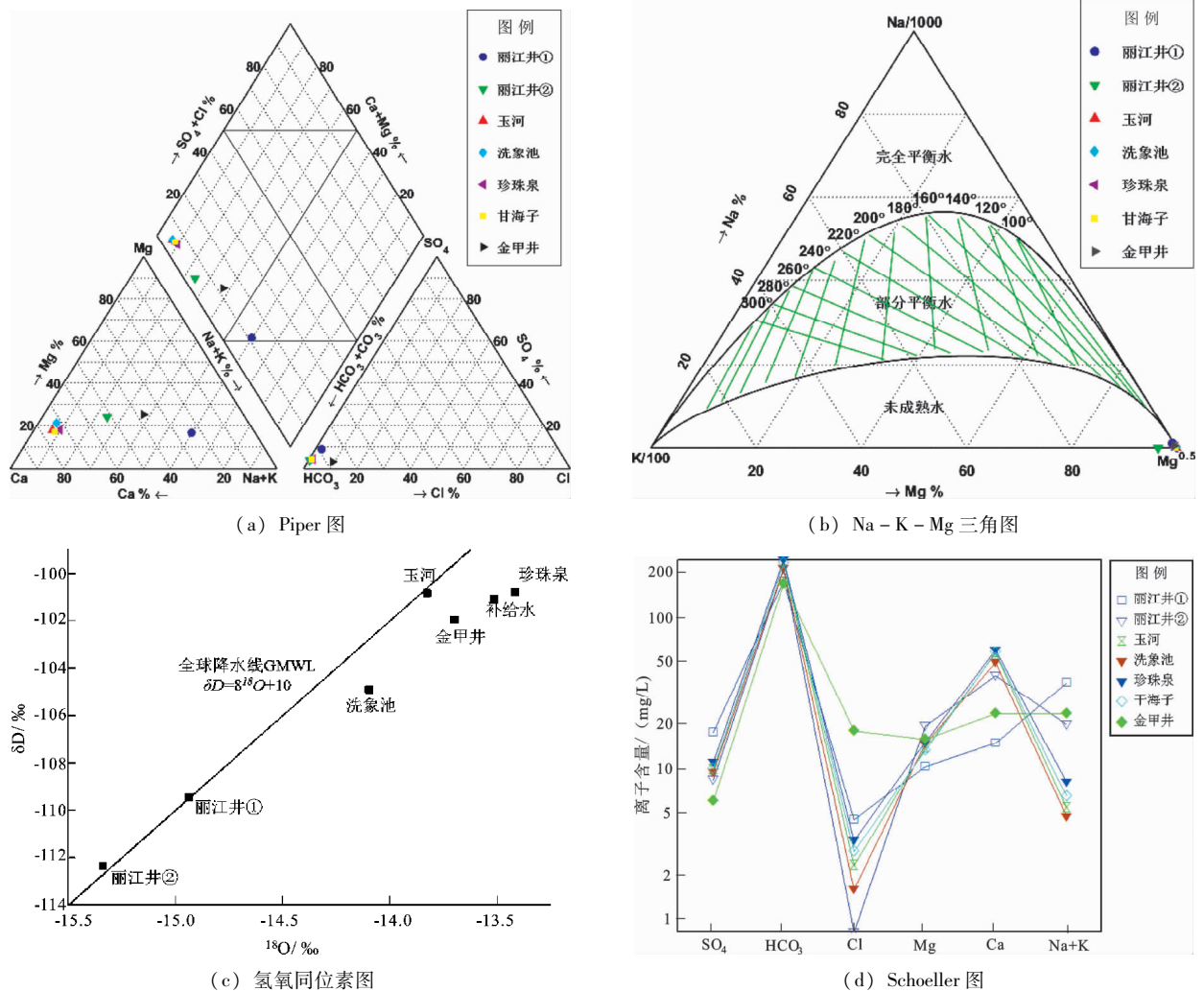


图3 丽江观测井的地下水化学特征图

Fig. 3 Hydrochemistry characteristics of groundwater in Lijiang observation well

4 水温上升变化分析

丽江观测井自2012年断流以来，其水位仍表现

为夏低冬高的年变形态，但年变幅度变大，幅度从之前的4 m左右变为5.02~17.40 m；每年年初缓慢下降，至7—8月达到最低值，之后变为快速上升，10—11月达到最高值；对比该地区的月降雨量，水

位变化受降雨量的影响较大,但有一定的滞后性(图4)。康晓波等(2013)研究认为,除降雨量减少外,地下水开采也是导致该地区水位下降的主要因素,因此分析水位与降雨量的关系,利用水位谷值变化量进行研究,计算结果可能会受地下水开采的影响。本文选取丽江地区主要雨季(5—10月)

的累积降雨量,与该井水位变化量、水位峰值变化量(胡小静等,2016)进行对比,对其数量关系进行数学回归分析,发现其水位变化量、水位峰值变化量与雨季降雨量的线性关系较好,相关性系数( $R^2$ )分别为0.606 9和0.647 3(图5),反映了该井水位变化受雨季降雨量的影响显著。

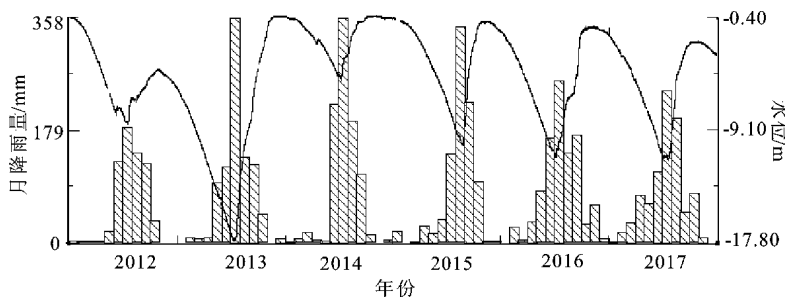


图4 丽江观测井水位与月降雨量的同轴动态曲线

Fig. 4 Coaxial dynamic curves of water level and monthly rainfall in Lijiang observation well

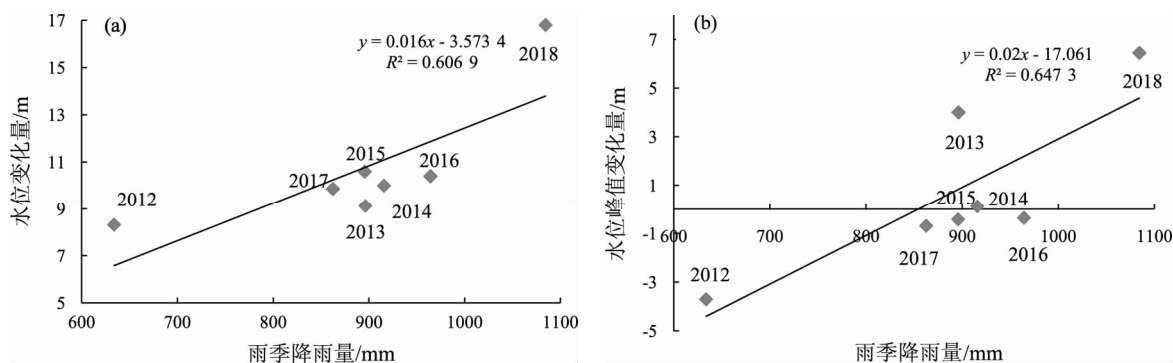


图5 丽江观测井水位变化量(a)及水位峰值变化量(b)与雨季降雨量的关系图

Fig. 5 Relationship between variations of water level (a), water level peak (b), and rainfall amount during the rainy season in Lijiang observation well

丽江观测井水温在趋势上升的背景下,有夏高冬低的年变形态,在每年7—8月达到最高值,与水位大体呈负相关(图2b)。杨竹转等(2018)对丽江观测井的前兆变化进行了研究,发现其有明显的震时效应:水位均表现为震荡型;水温在自流状态时表现为上升—下降—恢复型,断流状态时为下降—上升—恢复型;据此认为丽江井水温动态受水位泄流状态影响明显。2012年以来,在丽江观测井周边发生多次 $M \geq 5.0$ 中强地震,但水位水温均无明显的震时效应(图6),表明该时期水温的前兆特征不明显;受水位断流影响,含水层较低温度的水补给减少,导致探头附近水温逐渐上升;该井主要受雨季大气降水补给,水温随水位变化表现出年变形态。

丽江观测井地下水的补给主要来自大气降水和北部九子海溶蚀区,降水沿岩溶裂隙、洼地、落水洞等由北向南径流,在黑龙潭泉群处受地形切割和第四系相对隔水层阻隔,形成地下水富集带,向下游老城区排泄。高伟(2016)将该区域的地下水径流系统由上而下分为垂直入渗带、季节变动带和水平流动带。垂直入渗带受大气降水直接补给,形成浅层地下水,与岩石发生一定程度的水—岩作用,地下水类型为低矿化度的 $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$ 型酸性水。季节变动带受雨季降雨影响,沿较深部地下水径流补给,水—岩之间进一步作用, $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ 等离子之间发生交换作用,地下水类型变为 $\text{HCO}_3 - \text{Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3 - \text{Na} \cdot \text{Ca}$ 等。水平流动带受更深部的地下热水影响,侧向径流

过程中水-岩作用加剧，地下水类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$  型碱性水（图7）。

当降雨量偏少且处于断流状态时，该井为季节变动带和水平流动带的深部地下水径流补给，水与岩石之间存在离子交换作用，地下水类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$  型；深部热水上升，与浅层地下水混

合，水温表现为持续上升状态；受季节性降水影响，补给水量变化，水温表现出一定程度的年变形态。当降雨量增大且处于泄流状态时，该井为垂直入渗带的大气降水补给，与岩石发生溶解交换作用，地下水循环周期相对较快，类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  型；地表水下渗，水温表现为快速下降状态。

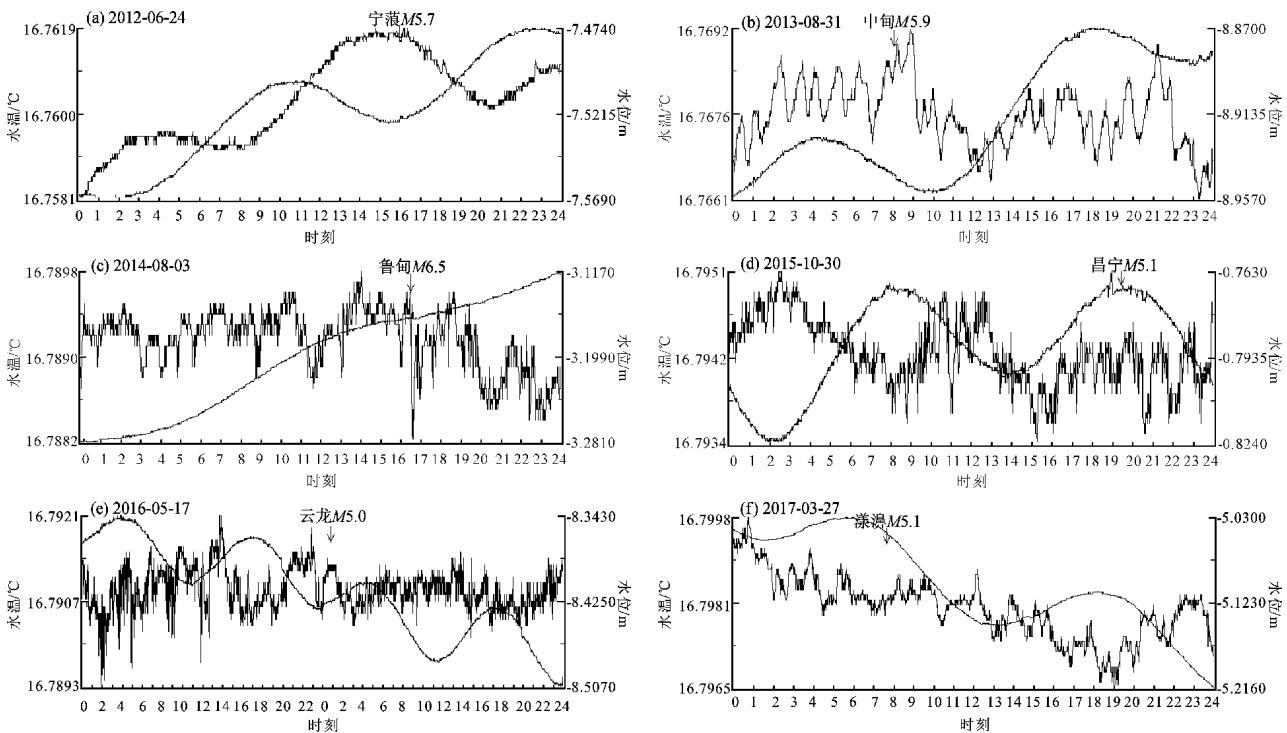


图6 2012—2018年丽江观测井的水温和水位震时动态曲线

Fig. 6 Coseismic curves of water temperature and water level in Lijiang observation well from 2012 to 2018

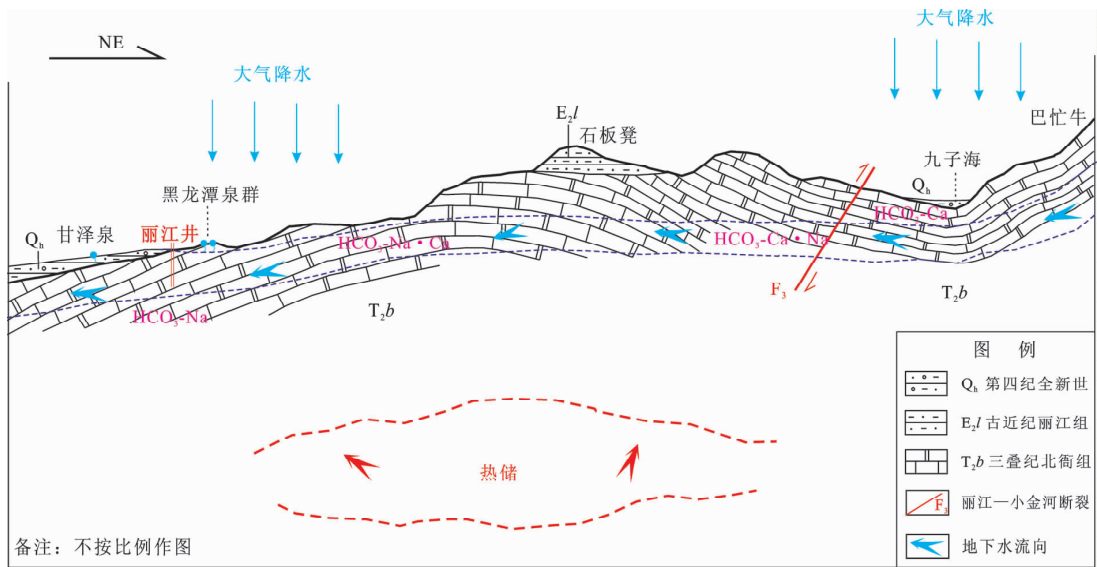


图7 丽江观测井水温上升成因模式图

Fig. 7 Genetic model of tendency rising of water temperature in Lijiang observation well

## 5 结论

本文基于 2012—2018 年丽江观测井的水文变化过程,对其地下水化学特征及与周围水体的水力联系进行定量分析,探讨该井水温上升的原因,得到以下认识:

(1) 水温探头放置在井孔含水层主要部位,补给水源的水温较低,水温动态特征受水位泄流状态影响明显。

(2) 水化学特征表明该井主要受大气降雨补给,水-岩反应程度较弱,且与周围地表水有明显的水力联系。

(3) 断流时,该井为深部地下水径流补给,水与岩石之间存在交换作用,地下水类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$  型;自流时为大气降水直接补给,与岩石发生溶解交换作用,地下水类型为  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  型。

(4) 断流状态下受深部热水上升影响,水温表现为持续上升状态;受雨季降雨量影响,水温随水位变化表现出一定程度的年变形态,认为该时期的前兆变化特征不明显。

2018 年 8 月 11 日泄流后,浅层地表水下渗,水温快速下降,受含水层的低温水源补给影响,之后水温波动平稳。该井地下水体活动强烈,水温波动幅度较大,难以反映与地震孕育有关的信息,建议其探头位置的放置应避免与含水层连通的主要部位。

中国地震局地壳应力研究所任宏微和郭丽爽提供了水质离子测试,审稿专家给予了有益建议,在此一并表示衷心的感谢!

## 参考文献:

- 车用太,杨会年. 1989. 不同温压条件下饱水砂岩的变形破坏与孔隙压力问题的试验研究[J]. 中国地震, (1): 9-15.
- 车用太,鱼金子. 1996. 我国地震地下水温度动态观测与研究[J]. 水

- 文地质工程地质, 23(4): 34-37.
- 高伟. 2016. 云南省丽江市黑龙潭泉域地下水系统分析[D]. 成都: 成都理工大学, 59-60.
- 国家地震局地质研究所, 云南省地震局. 1990. 滇西北地区活动断裂[M]. 北京: 地震出版社: 106-113.
- 胡小静, 付虹, 毕青. 2016. 基于年降水干扰排除的云南地区地下水群体异常研究[J]. 地震研究, 39(4): 545-552.
- 康晓波, 王宇, 张华, 等. 2013. 丽江黑龙潭泉群水文地质特征及断流的影响因素分析[J]. 中国岩溶, 32(4): 398-403.
- 刘耀炜, 任宏微, 王博. 2009. 环境同位素及其示踪技术在地震预测中的应用前景[J]. 地学前缘, 16(2): 369-377.
- 刘耀炜, 孙小龙, 王世芹, 等. 2008. 井孔水温异常与 2007 年宁洱 6.4 级地震关系分析[J]. 地震研究, 31(4): 347-353.
- 杨竹转, 邓志辉, 邓胜昌, 等. 2018. 井水温度动态变化分析——以云南丽江党校井为例[J]. 地震学报, 40(2): 172-184.
- 云南省地震局. 2005. 云南省地震监测志[M]. 北京: 地震出版社: 440-446.
- 张磊, 刘耀炜, 任宏微, 等. 2016. 氢氧同位素在地下水异常核实中的应用[J]. 地震地质, 38(3): 721-731.
- Baker E T, Fox C G, Cowen J P. 1999. In situ observations of the onset of hydrothermal discharge during the 1998 Submarine Eruption of Axial Volcano, Juan de Fuca Ridge[J]. Geophysical Research Letters, 26(23): 3445-3448.
- Byerlee J. 1978. Friction of rock Pure appl[J]. Geophys, 116(4-5): 615-626.
- Mogi K, Mochizuki H, Kurokawa Y. 1989. Temperature changes in an artesian spring at Usami in the Izu Peninsula (Japan) and their relation to earthquakes[J]. Tectonophysics, 159(1): 95-108.
- Raleigh C B. 1976. An Experiment in Earthquake Control at Rangely, Colorado[J]. Science, 191(4233): 1230-1237.
- Schoeller H. 1962. Geochimie des eaux souterraines application aux eaux de gisements de petrole, Revue Inst[J]. Pet Et Ann Des Combust Liq, 10(181-213): 219-246.
- Shi Y, Wang C. 1986. Pore pressure generation in sedimentary basins: Overloading versus aqua thermal[J]. Journal of Geophysical Research Atmospheres, 91(B2): 2153-2162.
- Simpson D W. 1986. Triggered Earthquakes[J]. Annual Review of Earth & Planetary Sciences, 14(1): 21-42.
- Sohn R A, Fornari D J, Von Damm K L, et al. 1998. Seismic and hydrothermal evidence for a cracking event on the East Pacific Rise crest at 9° degrees 50' N[J]. Nature, 396(6707): 159-161.

## Analysis on Cause of Tendency Rising of Water Temperature in Yunnan Lijiang Observation Well

LI Libo<sup>1</sup>, DENG Shengchang<sup>2</sup>, YANG Yongwen<sup>2</sup>, MAO Zebin<sup>1</sup>

(1. *Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China*)

(2. *Lijiang City Earthquake Agency, Lijiang 674100, Yunnan, China*)

### Abstract

Based on the tendency rising of water temperature in the Lijiang observation well since 2012, we analyzed its hydrological change process, and analyzed the chemical characteristics of groundwater and its hydraulic connection with surrounding water bodies by using the Piper diagrams, Schoeller diagrams, and hydrogen and oxygen isotopes etc. Then, we discussed the rising reasons of water temperature in the well. The results show that the groundwater type was  $\text{HCO}_3 - \text{Na}$  type under the cutoff state, when the well affected by the deeper groundwater runoff. Its type was  $\text{HCO}_3 - \text{Ca}$  under the drainage state, when it was direct recharge of atmospheric precipitation. The water-rock reaction degree of the well is weak, and it has obvious hydraulic connection with the surrounding water body. It is greatly affected by surface water, and carries less deep information. After the well was dried up in 2012, the water temperature was continuously rising due to the rise of deep hot water. Influenced by rainfall in rainy season, the water temperature showed a certain degree of annual deformation with the change of water level. The analysis result shows that the precursory characteristics of this period are not obvious.

**Keywords:** water temperature; tendency rising; hydrochemistry characteristics of groundwater; Lijiang observation well