

洱源温泉水氡预测效能检验及其水化学特征*

钟骏¹, 王博^{1,2♣}, 晏锐¹, 李庆³

(1. 中国地震台网中心, 北京 100045; 2. 中国地震局地质研究所 地震动力学国家重点实验室, 北京 100029;
3. 云南省地震局 洱源地震台, 云南 洱源 671200)

摘要: 利用 Molchan 图表法对洱源温泉水氡观测资料进行预测效能检验, 并开展了温泉水化学组分、氢氧同位素和水循环特征研究。结果表明: ①Molchan 图表法检验结果显示, 洱源水氡出现高值时, 对观测点附近中强以上地震反应较灵敏, 优势对应地震时间段为 90 d 以内; ②洱源温泉井的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$, 与周边地表水体及浅层地下水无直接水力联系; ③洱源温泉井水属于“部分平衡水”, 具有深部来源特征。

关键词: 洱源水氡; 预测效能; 水化学特征

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2021)04-0564-08

0 引言

氡作为地球内部放射性元素铀、钍衰变的产物, 是地震科学研究中观测历史最久、研究程度最深的地下流体前兆手段之一(刘伯礼等, 1975; 刘耀炜, 2006)。前人观测实践表明, 氡的浓度变化是地球深部信息的重要表现, 特别是地震孕育及发生阶段, 水中氡的浓度会出现不同程度的异常变化(付虹等, 1997; Ge *et al.*, 2014; 孙小龙等, 2020)。然而, 氡浓度的变化与地震活动的关系较为复杂, 变化形态往往也不一致。如龙陵邦腊掌温泉水氡在多次中强地震前出现低值波动异常(李加稳, 孙文波, 2004), 但在汶川 $M_s 8.0$ 地震前, 位于龙门山断裂带附近的多个水氡观测项目的自相关系数则出现了明显趋势性上升的异常现象(晏锐等, 2011)。地下水溶解氡浓度在地震前上升或者下降的异常变化, 在一定程度上反映了应力作用条件下所引起的水动力条件和局部水文地球化学环境的改变(Muir-Wood, King, 1993)。

针对氡的异常成因, 前人提出了诸如膨胀扩散、破裂混合、热液爆沸、氡团混入、超声振动、

岩浆冲熔及水动力作用等机理和模式(Birchard, Libby, 1978; 郭增建等, 1979; 冯玮等, 1981; 李宣璐, 1981; Thomas, 1988; 蒋凤亮等, 1989; 车用太等, 1997)。在此基础上, 张慧等(2005)提出了孕震体介质微破裂生长的观点, 进一步揭示了水氡前兆场的时空变化特征及其物理机制。温泉作为连接地球深部与浅部的重要通道, 与构造活动和地震活动都有较好的联系, 能反映较多的地球深部信息, 而温泉水氡观测是十分理想的前兆观测手段(苏鹤军等, 2020)。因此, 深入分析温泉水氡的水化学特征及其与地震活动的关系, 对使用温泉水氡进行地震预测实践具有重要意义。

日常震情跟踪发现, 洱源温泉水氡与周边地区一定范围内的中强地震存在一定的关联性, 而针对该泉点资料的归纳梳理和系统研究较少。因此, 本文以洱源温泉为研究对象, 使用 Molchan 图表法对洱源温泉水氡进行映震效能检验, 从水化学组成和氢氧同位素的角度分析洱源温泉水化学特征和氡的来源问题, 并对其前兆机理进行了讨论。

1 观测点概况

洱源温泉水氡(以下简称洱源水氡)观测点

* 收稿日期: 2021-03-03.

基金项目: 中国地震局地震科技星火计划项目(XH19055)、国家重点研发计划(2018YFE0109700)、2021年度震情跟踪定向工作任务(2021010311)及中国地震台网中心青年科技基金(QNJJ201809)联合资助。

第一作者简介: 钟骏(1988-), 助理研究员, 主要从事地下流体动力学研究工作. E-mail: zjadvance@126.com.

♣通讯作者简介: 王博(1984-), 高级工程师, 主要从事岩石物理实验和地下流体动力学研究.
E-mail: wangbo313@163.com.

位于洱源断陷盆地,构造上属于扬子准地台、松潘—甘孜褶皱带与三江褶皱带的交界部位(房艳国等,2015),主要出露地层岩性为二叠系、三叠系灰岩(李晓露,2017)。区内活动断裂发育,红河断裂北段、鹤庆—洱源断裂、龙蟠—乔后断裂和通甸—巍山断裂等多条断裂交汇于此(图1),构造活动较为强烈,是滇西地区中强地震的密集活动区域(林爱文,1997)。

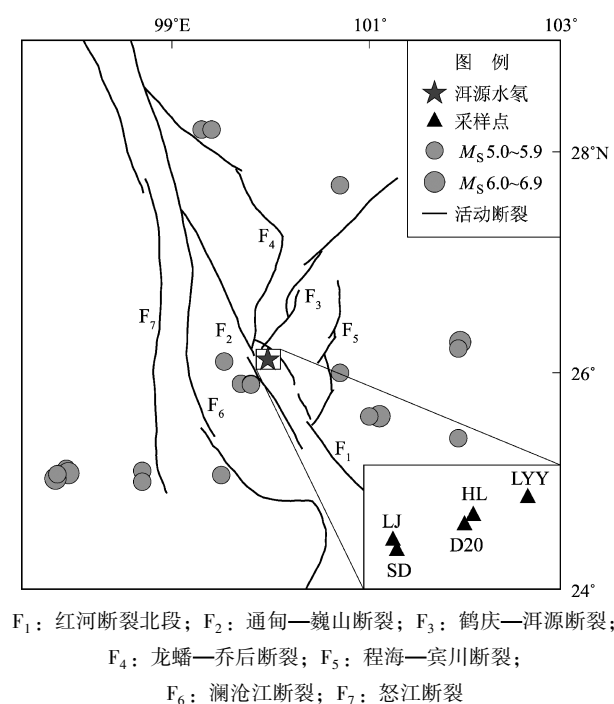


图1 洱源水氡观测点、采样点
及周边地震空间分布

Fig. 1 Distribution of water – radon observation point and sampling points in Eryuan and historical earthquakes in the vicinity

洱源水氡自2006年开始在兴兴温泉取样,水温为 $62.0\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,流量为 $(0.75 \pm 0.03)\text{ L/s}$ (段美芳等,2020),观测仪器为FD-105K型测氡仪,测量灵敏度为 $(0.37 \pm 0.15)\text{ Bq/(L} \cdot \text{格} \cdot \text{min)}$,采样率为日值,无明显年变规律,受气象因素影响较小,浓度变化范围为 $38.2 \sim 50.1\text{ Bq/L}$ 。2006—2007年洱源水氡因影响观测稳定因素的出现,观测数据出现大幅波动,之后趋于稳定并且连续可靠。在2008年8月21日盈江 M_s 6.0、2009年7月9日姚安 M_s 6.0、2012年6月24日宁蒗 M_s 5.7、2013年8月31日德钦 M_s 5.9、2015年10月31日昌宁 M_s 5.1等多次地震前,洱源水氡都出

现明显的异常变化,表现为水氡浓度值快速上升或波动幅度增大,显示出较强的映震能力,说明其异常可能与地震活动存在一定联系(图2)。

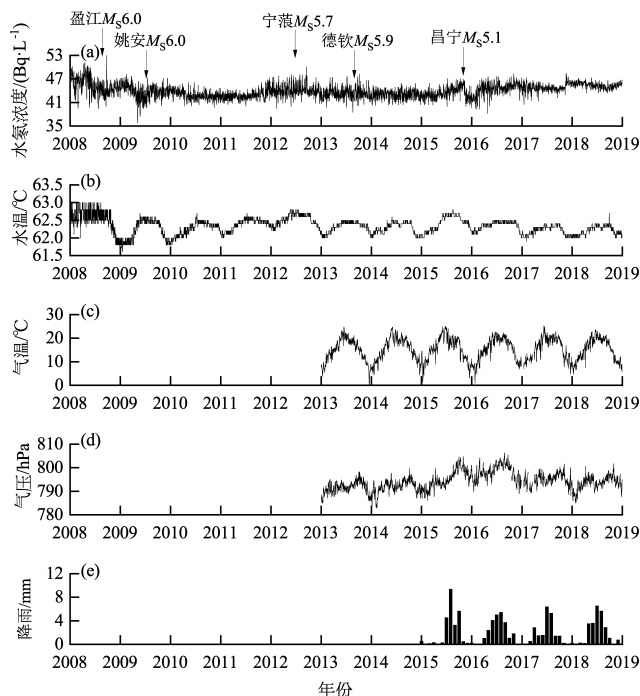


图2 洱源水氡、水温及气象三要素观测曲线

Fig. 2 Observational curves of water – radon concentration, water temperature of Eryuan hot spring, and air temperature, air pressure, precipitation in the locality

2 地震预测效能检验

虽然洱源水氡在一些地震前出现过明显异常变化,但异常与地震并非一一对应,很可能存在其他影响因素,导致地震前兆异常被掩盖或非地震前兆信息被放大。因此,需要使用有效的方法对观测资料进行预处理,从而提取有效异常指标,并依据预测效能评价方法——Molchan图表法(Molchan, 1990)来检验这种异常提取方法的映震水平,获取最优预测指标,为更好地利用观测资料进行地震监测预测提供方法依据。

根据模糊数学原理,引入从属函数方法中的斜率 K 和相关系数 R 的乘积 Y 来反映观测数据变化斜率随时间的变化程度(冯德益等,1984):

$$Y_i = |K_i| \cdot |R_i| \quad (i=1,2,\dots,m) \quad (1)$$

式中: K_i 为观测数据的斜率, 反映数据的变化速率; R_i 为观测数据的自相关系数, 反映数据内在质量的好坏。 K_i 与 R_i 可以利用指定窗长内连续观测数据及其相应的时间序列作一元线性回归分析求得, 即:

$$K_i = \frac{\sum T_j \sum Y_j - n \sum T_j Y_j}{(\sum T_j)^2 - n \sum T_j^2} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

$$R_i = \frac{\sum T_j Y_j - \frac{1}{n} (\sum T_j \sum Y_j)}{\sqrt{\left[\sum T_j^2 - \frac{1}{n} (\sum T_j)^2 \right] \left[\sum Y_j^2 - \frac{1}{n} (\sum Y_j)^2 \right]}} \quad (j = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

式中: n 为滑动窗长, 即一元线性回归分析时样本的个数, 通常取 $n = 5$; Y_j 为观测数据; T_j 为与观测数据相应的时间序列。

当 $|R_i|$ 不变时, Y_i 随 $|K_i|$ 的增大而增大, 表明观测值变化速率越大, 异常的可能性越高; 当 $|K_i|$ 不变时, $|R_i|$ 越大, 则数据的相关性越好, 说明 $|K_i|$ 作为判别异常的信度越大。

本文选取 2008—2018 年洱源水氡的观测数据进行分析, 并依据震级与震中距一般对应关系: $M_s 5.0 \sim 5.9$ 地震的震中距小于 250 km、 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震的震中距小于 300 km (孙小龙等, 2018), 筛选出该时间段内洱源水氡观测点 250 km 范围内发生的 $M_s \geq 5.5$ 地震共 21 次, 其中, $M_s 5.5 \sim 5.9$ 地震 17 次、 $M_s 6.0 \sim 6.9$ 地震 4 次 (图 1), 地震参数详见表 1。在实际计算过程中, 为减小数据中的系统误差和偶然误差, 本文采用 45 天滑动平均对洱源水氡的原始数据进行趋势提取, 如图 3 所示, 可以看出水氡浓度呈现明显的上升-下降变化, 预处理后曲线相对于原始曲线的震前异常特征更为突出、更易于识别。

Molchan 图表法通过对预测结果与观测目标地震的差异度进行检验, 直观反映观测数据的预报效能, 得到最佳阈值所对应的异常识别指标 (蒋长胜等, 2011; 孙小龙等, 2018)。每一个阈值对应一组漏报率 τ 和异常时空占有率 v , $\tau-v$ 值连线与横、纵坐标围成的面积代表检验的预测效果, 且与面积大小呈反比。此外, 报准率 h 所对应的显著性水平 α 越低、概率增益 $Gain$ 越大时, 预测效果越好。

表 1 洱源台周边地震参数

Tab. 1 Parameters of the historical earthquakes around the Eryuan hot spring

序号	发震日期	震中位置 / (°)		参考地点	M_s	井震距 / km
		φ_N	λ_E			
1	2008-08-20	25.12	97.93	云南盈江	5.0	233
2	2008-08-21	25.08	97.95	云南盈江	6.0	233
3	2008-08-30	26.28	101.92	四川攀枝花	6.2	195
4	2008-08-31	26.22	101.90	四川攀枝花	5.6	193
5	2009-07-09	25.60	101.10	云南姚安	6.0	127
6	2009-07-10	25.60	101.00	云南祥云	5.2	118
7	2009-11-02	26.00	100.70	云南宾川	5.0	74
8	2010-02-25	25.40	101.90	云南禄丰	5.1	209
9	2011-06-20	25.10	98.70	云南腾冲	5.2	171
10	2011-08-09	25.00	98.70	云南腾冲	5.2	178
11	2012-06-24	27.70	100.70	云南宁蒗	5.7	190
12	2013-03-03	25.90	99.70	云南洱源	5.5	36
13	2013-04-17	25.90	99.80	云南洱源	5.0	30
14	2013-08-28	28.20	99.30	云南德钦	5.1	241
15	2013-08-31	28.20	99.40	云南中甸	5.9	238
16	2014-05-24	25.01	97.82	云南盈江	5.6	248
17	2014-05-30	25.03	97.82	云南盈江	6.1	247
18	2014-05-30	25.07	97.84	云南盈江	5.1	243
19	2015-10-30	25.06	99.50	云南昌宁	5.1	127
20	2016-05-18	26.10	99.53	云南云龙	5.0	44
21	2017-03-27	25.89	99.80	云南洱源	5.1	31

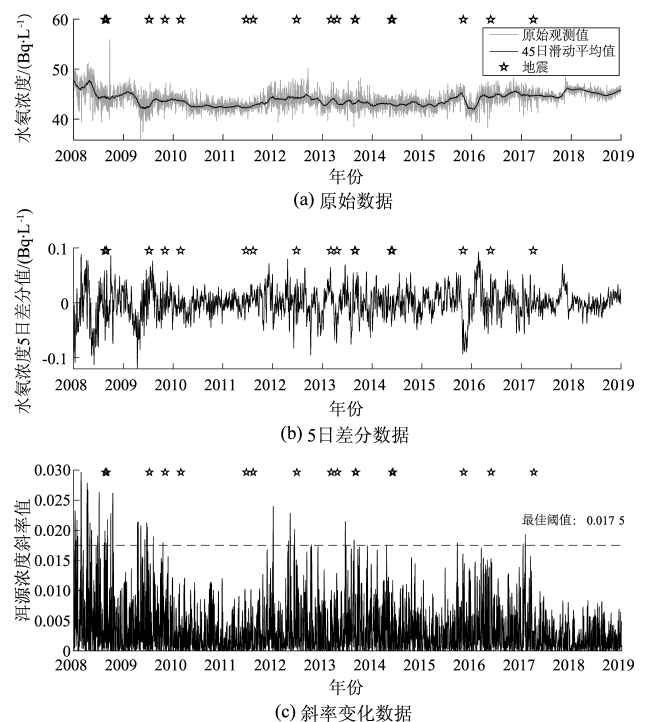


图 3 洱源水氡观测值预处理结果

Fig. 3 Preprocessing results of the observational values of the water radon in Eryuan hot spring

本文利用 Molchan 图表法对洱源水氡预处理后的斜率数据 (图 3c) 与周边地震关系进行检验, 得到该测项的整体预测效能、最佳预测指标 (即异常的最佳判别指标) 及优势对应时间。图 3c 中空五角星为选取的 21 个地震, 其中红色代表有效预测期内报准的地震, 蓝色代表有效预测期外漏报的地震, 红色虚线为最佳阈值线 (0.017 5); 图 4a 为洱源水氡 Y 值整体预报效能与概率增益关系图; 图 4b 为洱

源水氡 Y 值漏报率 v 与时间占有率 τ 关系曲线及不同显著性水平 α 等值线。图中红色粗阶梯线为预测阈值从大到小滑动得到的 $\tau-v$ 曲线, 蓝色圆圈代表最接近原点 (0, 0) 的 $\tau-v$ 值, 其阈值可视为最佳阈值。图中右下角 (1, 0) 点表示地震全部报准, 但其时间占有率也最大, 覆盖数据整个时间段; 左上角 (0, 1) 点表示地震全部漏报, 其时间占有率最小, 相当于未做出预测。

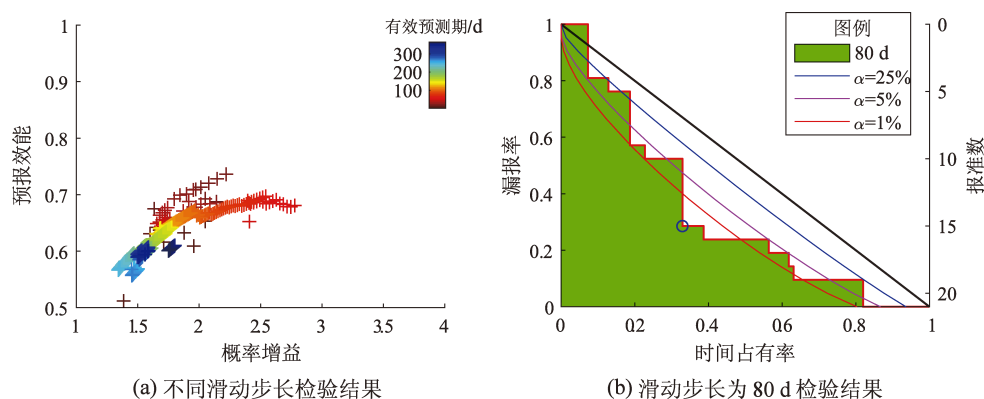


图 4 洱源水氡 Molchan 检验结果

Fig. 4 Testing results of the water radon in Eryuan hot spring by Molchan diagram

由图 4a 可见, 洱源水氡在不同预测时长的概率增益均大于 1, 预测效能基本在 0.6 以上, 具有显著的统计和检验意义。尤其是短期 (90 d 内), 概率增益均大于 2, 预测效能均在 0.7 以上, 表明洱源水氡短期预测效果更好。因此选取预测时长 80 d 进行计算, 如图 4b 所示, 在 80 d 所示位置 (蓝色圆圈), 21 个地震中, 报准 15 个、漏报 6 个, 报准率约 71%, 时间占有率约 0.33, 置信水平较高, 说明预测效果较好。因此, 洱源水氡的优势对应地震时间段为 90 d 以内, 在预测时长为 80 d 时, 最佳阈值为 0.017 5, 可作为相应时间段的“警报”阈值。

3 水化学特征及温泉来源分析

水化学特征分析能够探明地下流体的来源与补给过程, 是区别地下流体是否受构造活动影响的重要技术方法之一 (蒋凤亮等, 1989)。地壳深部构造活动或浅层地表水补给会影响地下流体的流量、温度和水化学组分的变化。为了判断氡的来源及其与深部构造活动的关系, 笔者于 2018 年 5 月 8 日对洱

源水氡 (SD)、洱源老街 (LJ) 和温泉疗养院 (LYY) 3 处温泉点, 以及滇 20 井 (D20) 和附近河流 (HL) 等浅表水, 共计 5 个水体进行了水样采集, 采样点空间分布如图 1 所示。样品检测由中国地震局地壳动力学实验室完成, 使用 Dionex ICS-2100 离子色谱仪进行离子组分检测, 包括 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^{+} 、 K^{+} 、 SO_4^{2-} 、 Cl^{-} 和 NO_3^{-} , 浓度检测限为 0.01 mg/L; HCO_3^{-} 采用酸碱中和滴定法求得; 氢氧同位素 $\delta^{18}\text{O}$ 与 δD 使用 LGR LWIA-24-EP 激光液态水稳定同位素分析仪测定, 精度分别高于 0.1‰ 和 0.4‰。水化学测试结果见表 2。

由表 2 及图 5 可以看出, 洱源水氡和洱源老街优势阳离子成分为 Na^{+} 、优势阴离子成分为 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} , 两处水体的 Na^{+} 、 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} 毫克当量百分比分别为 92.5%、67.7%、29.4% 以及 90.5%、67.2%、29.8%, 水化学类型均为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$; 温泉疗养院优势阳离子成分为 Ca^{2+} 和 Na^{+} 、优势阴离子成分为 HCO_3^{-} 和 SO_4^{2-} , 其各离子毫克当量百分比分别为 45.3%、40.8%、57.5% 和 41.3%, 水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$; 滇 20 井优势阳离子成分为 Na^{+} 、优势阴离子

表 2 采样点水化学测试结果
Tab. 2 Hydrochemical results of the sampling points

样品名称	水温/ (℃)	Ca ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg·L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg·L ⁻¹)	K ⁺ / (mg·L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg·L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg·L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg·L ⁻¹)	δD (‰)	δ ¹⁸ O (‰)	水化学类型
洱源水氢	62	37.39	6.19	675.39	36.53	1361.90	465.33	34.70	5.23	-111.11	-14.38	HCO ₃ ·SO ₄ -Na
洱源老街	63	46.14	7.86	648.44	42.69	1323.46	461.75	34.96	5.12	-111.99	-14.71	HCO ₃ ·SO ₄ -Na
温泉疗养院	78	113.41	20.99	117.39	9.49	472.27	267.06	5.66	0.00	-118.55	-15.59	HCO ₃ ·SO ₄ -Ca·Na
滇 20 井	31	19.08	3.37	173.68	14.60	565.63	27.33	1.39	3.28	-115.54	-15.27	HCO ₃ -Na
河流	20	26.57	8.02	4.51	1.78	137.29	9.22	2.23	3.56	-98.95	-13.27	HCO ₃ -Ca·Mg

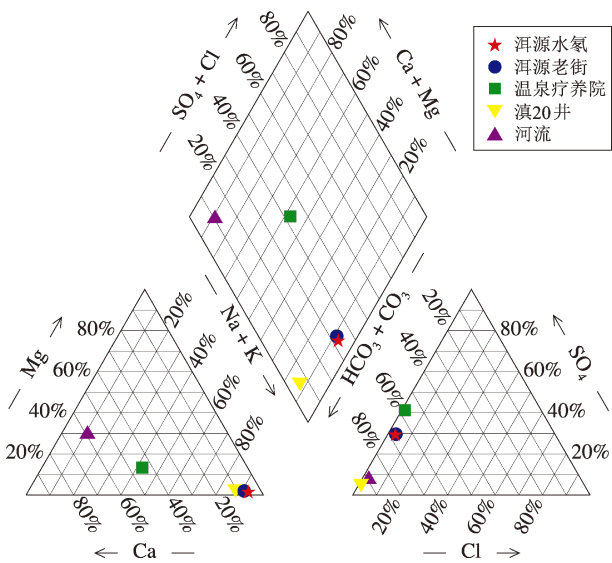


图 5 研究区水体 Piper 图
Fig. 5 Piper diagram of water samples
in the study area

成分为 HCO_3^- ，其离子毫克当量百分比分别为 85.9% 和 93.8%，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Na}$ ；河流优势阳离子成分为 Ca^{2+} 和 Mg^{2+} 、优势阴离子成分为 HCO_3^- ，其离子毫克当量百分比分别为 60.6%、30.5% 和 89.8%，水化学类型为 $\text{HCO}_3\text{-Ca} \cdot \text{Mg}$ 。由上可见，温泉水的大多数离子含量明显高于浅表水，表明其来源较深、离子反应更强烈，从而导致不同水体的水化学类型差别较大，呈现出明显分区特征。

从图 5 可见，洱源水氢与洱源老街在菱形区域中的投影点几乎重合，表明其来源较为一致；而温泉疗养院、滇 20 井和河流落在不同的位置，说明其来源和形成过程不同，与洱源水氢与洱源老街没有直接的水力联系。分析认为，洱源地区温泉水水化学组分的形成过程是地下热水与围岩发

生溶滤作用和离子交换作用的结果。由于该地区发育大量二叠系、三叠系灰岩，三叠系和白垩系的碎屑岩中含有石膏（张春山等，2003），当地下热水流经灰岩层及膏盐层时与围岩发生溶滤作用，使得 Ca^{2+} 、 HCO_3^- 和 SO_4^{2-} 大量进入水中。随着循环深度和循环时间的增加， CO_2 和 O_2 等气体耗尽，溶滤作用减弱，离子交换作用开始增强， Ca^{2+} 不断被 Na^+ 替换，逐渐形成 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Ca} \cdot \text{Na}$ 或 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$ 型水（王大纯，1986；吴桂武等，2015）。

Na-K-Mg 三角图通过水-岩平衡状态，可以判断地下水循环深度及混合程度。水-岩平衡程度越高，地下水循环越深或循环周期越长（Giggenbach，1988）。由图 6 可见，所有采样点均靠近右下角 Mg 端元，未达到饱和状态。其中，洱源水氢

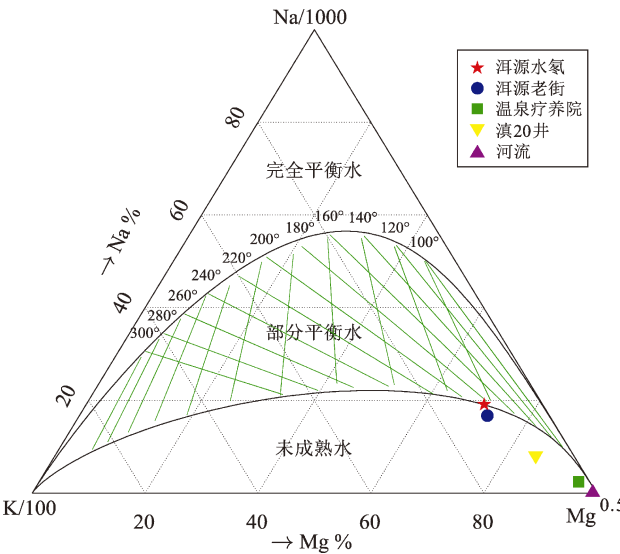


图 6 研究区水体 Na-K-Mg 三角图
Fig. 6 Na-K-Mg diagram of water samples
in the study area

属于“部分平衡水”，洱源老街接近“部分平衡水”，两者接近重合，说明其水-岩平衡状态相似，来源于深部的可能性更大。且相比于后者，洱源水氢的水-岩反应程度更高，其接受大气降水补给或浅部冷水混合更少。结合表2及水化学结果分析，可以清楚看到温泉疗养院具有深部来源特征（ SO_4^{2-} 含量较高），但温泉疗养院与浅表水体（滇20井、河流）同属“未成熟水”，均表现出大气降水补给的特征，说明在循环过程中明显受到了地表水或浅部冷水混入影响（ Ca^{2+} 含量较高）。研究区位于多条断裂交汇处，构造裂隙十分发育，特别是红河断裂北段和鹤庆—洱源断裂具有活动性强、切割深度大的特点，有利于地下水的深循环和深部热物质的对流（颜鹏等，1997；王云等，2019）。大气降水经洱源盆地周边山区入渗补给，沿构造裂隙向地下运移，经过深循环或深部热物质对流后，在水头压力差或阻水断裂的阻挡作用下，沿压力较小的断裂破碎带向地表运移并与浅层冷水发生不同程度的混合，进而表现出不同的水-岩平衡状态。

氢氧同位素特征是研究水体补给来源及演化规律的有效手段。不同水体在运移过程中水-岩相互作用程度存在一定的差异性，水-岩反应程度越高，氧同位素跟岩石交换程度越大， ^{18}O 向右漂移越明显（苏鹤军等，2020）。本文水样氢氧同

位素分布如图7所示。参考全球大气降水线（Craig, 1961）及西南地区大气降水线（刘进达等，1997）可知，河流水样更接近全球大气降水线，其它采样点也在降水线附近，且均向右偏离大气降水线，表明采样点水体成因为大气降水，并存在一定的 ^{18}O 漂移现象。分析认为洱源水氢、洱源老街、温泉疗养院以及滇20井的 ^{18}O 漂移现象主要是区域地下水经过长时间的运移，在高温条件下与含氧围岩（灰岩或硅酸盐岩石）充分进行氧同位素交换的结果（李学礼等，2010；倪高倩等，2016），而河流水体主要与其长期出露地表，蒸发作用强烈有关。

综上分析，洱源水氢成因是大气降水，其水化学组成及类型主要与深部地下水热循环过程中的高温水-岩反应有关。研究表明，地球内部热能直接参与岩石物理化学性质改变和地壳运动过程（赵慈平等，2014；Wang *et al*, 2015）。而温泉作为重要的运移通道，能够将地下深部变化信息运移到地表。洱源水氢来源于天然放射性元素铀、钍的衰变。自中生代以来，滇西地区火山及岩浆活动强烈，造成大量基性火山岩的喷发和花岗岩的入侵（吴乾蕃等，1988），其中富含的铀、钍放射性元素衰变产生的氢一部分溶解于高温热水，通过温泉向地表运移；另一部分则以自由氢、吸附氢及封闭氢的形式存在于岩石的孔（裂）隙或晶格内（程业勋等，2001；任宏微等，2010）。随着区域孕震条件的成熟，区域应力不断积累，岩石受力变形发生破裂，形成许多微小裂隙，赋存于岩石孔（裂）隙或晶格内的氢大量析出并进一步溶解于水中，因此，地震前观测到的水氢浓度升高或者波动幅度增大现象是孕震阶段岩石中氢释放加剧或水体中氢迁移加剧的结果（曹玲玲等，2005）。根据氢同位素和碳同位素组成显示，洱源地区 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值为0.12 ~ 0.71 Ra，洱源温泉溶解二氧化碳的 $\delta^{13}\text{C}$ 值为-4.995‰（沈立成等，2007；张翔等，2019），与温泉流体中幔源成因的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 值（ $1.1 \sim 1.4 \times 10^{-5}$ 和 $\delta^{13}\text{C}$ 值（-8‰ ~ -4‰）相符（Mamyrin *et al*, 1970；Sano, Marty, 1995；周晓成等，2020）。因此，认为洱源温泉水氢浓度的异常变化能真实反映地下深部构造活动程度。

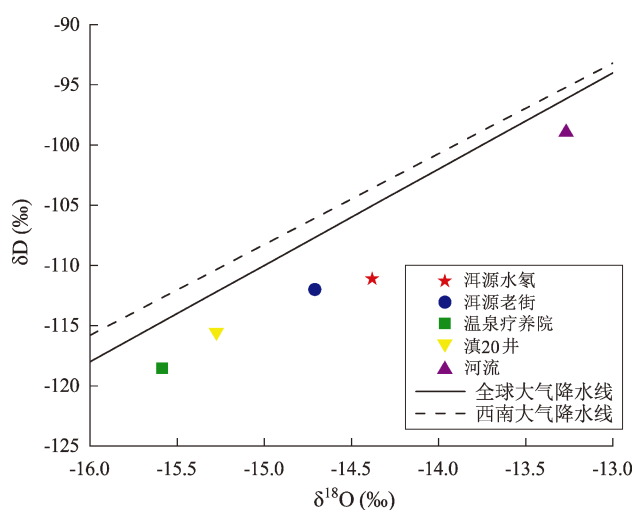


图7 研究区水体氢氧同位素组成

Fig. 7 Composition of hydrogen and oxygen isotopes of water samples in the study area

4 结论

利用 Molchan 图表法对洱源水氡的地震预测效能进行检验,并对洱源水氡及周边水体水化学和氢氧同位素组成进行分析,讨论了洱源温泉井的水化学特征及水氡异常成因,得到以下结论:

(1) Molchan 图表法检验结果显示,洱源水氡出现高值时,对观测点附近中强以上地震反应较灵敏,优势对应时间段为 90 d 以内,在预测时长为 80 d 时,最佳阈值为 0.017 5,映震效果较好。

(2) 洱源温泉井的水化学类型为 $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4 - \text{Na}$,观测井与周边地表水体及浅层地下水没有直接、快速的水力联系,受周边地表水体、浅层地下水及大气降雨直接补给的干扰较小。洱源温泉井水属于“部分平衡水”,与其它水体相比,水-岩反应程度更高、循环深度较深,具有深部流体输入特征。研究区水体成因均为大气降水,同时存在一定的 ^{18}O 漂移现象,表明地下水在深部循环过程中,高温水-岩作用造成了 ^{18}O 富集。

采样过程得到云南省地震局张翔的支持与帮助,在此表示感谢!

参考文献:

- 曹玲玲,王宗礼,刘耀炜. 2005. 氡迁移机理研究进展概述[J]. 地震研究,28(3):302-306.
- 车用太,鱼金子,刘五洲. 1997. 水氡异常的水动力学机制[J]. 地震地质,19(4):66-70.
- 程业勋,王南萍,侯胜利,等. 2001. 空气氡的大地来源理论研究[J]. 辐射防护通讯,21(3):15-18.
- 段美芳,李庆,陆丽娜,等. 2020. 洱源 FD-105K 与 FD-125 测氡仪对比观测分析[J]. 地震地磁观测与研究,41(2):123-129.
- 房艳国,李茂华,付调金,等. 2015. 云南大理州洱源盆地温泉分布特征及成因分析[J]. 资源环境与工程,29(5):701-705.
- 冯德益,楼世博,顾瑾平,等. 1984. 模糊数学方法在地震综合预报中的应用[J]. 地震学报,6(2):146-158.
- 冯玮,王永才,邓禹仁,等. 1981. 饱水岩石超声振氡实验研究[J]. 地震地质,3(2):1-7,84.
- 付虹,陈立德,罗平,等. 1997. 1995 年 7 月 12 日云南孟连中缅边界 7.3 级地震中短临预报及前兆异常特征(3)[J]. 地震研究,20(4):5-16.
- 郭增建,秦保燕,李海华,等. 1979. 临震前兆的一种可能机制——暴沸[J]. 西北地震学报,(1):89.
- 蒋长胜,张浪平,韩立波,等. 2011. 中长期地震危险性概率预测中的

- 统计检验方法 I: Molchan 图表法[J]. 地震,31(2):106-113.
- 蒋凤亮,李桂如,王基华,等. 1989. 地震地球化学[M]. 北京:地震出版社,153.
- 李加稳,孙文波. 2004. 邦腊掌温泉水氡水温度异常特征研究[J]. 防灾技术高等专科学校学报,6(2):25-29.
- 李晓露. 2017. 云南洱源县牛街温泉的水化学特征与成因[D]. 北京:中国地质大学(北京),12.
- 李宣瑚. 1981. 水氡异常的扩散收缩现象[J]. 地震,(5):41-43.
- 李学礼,孙占学,刘金辉. 2010. 水文地球化学(第三版)[M]. 北京:原子能出版社,116.
- 林爱文. 1997. 滇西洱源地区断裂构造及其新活动特征研究[J]. 测绘信息与工程,(2):14-18.
- 刘伯礼,万迪堃,汪成民. 1975. 利用地下水氡浓度异常变化预报地震的探讨[J]. 地球物理学报,18(4):279-283.
- 刘进达,赵迎昌,刘恩凯,等. 1997. 中国大气降水稳定同位素时空分布规律探讨[J]. 勘察科学技术,(3):34-39.
- 刘耀炜. 2006. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾[J]. 中国地震,22(3):222-235.
- 倪高倩,张恒,韦玉婷,等. 2016. 四川地热流体水文地球化学及同位素特征简析[J]. 新能源进展,4(3):184-194.
- 任宏微,刘耀炜,马玉川. 2010. 汶川 8.0 级地震氡震后效应机理讨论[J]. 中国地震,26(1):73-83.
- 沈立成,袁道先,丁梯平,等. 2007. 中国西南地区 CO_2 释放点的 He 同位素分布不均一性及大地构造成因[J]. 地质学报,81(4):475-487,581-582.
- 苏鹤军,曹玲玲,张慧,等. 2020. 判识水氡地震前兆的方法——以甘肃清水温泉水氡异常为例[J]. 地震,40(4):198-213.
- 孙小龙,刘耀炜,付虹,等. 2020. 我国地震地下流体学科分析预报研究进展回顾[J]. 地震研究,43(2):216-231.
- 孙小龙,向阳,杨朋涛. 2018. 云南会泽井水位地震预测效能检验及其机理分析[J]. 地震学报,40(2):185-194.
- 王大纯. 1986. 水文地质学基础[M]. 北京:地质出版社,60.
- 王云,冉华,李其林,等. 2019. 滇西北裂陷区地热及构造活动特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报,38(5):923-930.
- 吴桂武,王鹏,王晓峰,等. 2015. 铜仁市地热水水化学类型及主要组分成因分析[J]. 地下水,37(4):4-7.
- 吴乾蕃,祖金华,谢毅真,等. 1988. 云南地区地热基本特征[J]. 地震地质,10(4):177-183.
- 颜鹏,李如陶,李四海. 1997. 滇西地震预报实验场区温泉地球化学与断裂活动的关系[J]. 大地构造与成矿学,21(2):129-136.
- 晏锐,蒋长胜,张浪平. 2011. 汶川 8.0 级地震前水氡浓度的临界慢化现象研究[J]. 地球物理学报,54(7):1817-1826.
- 张春山,张业成,吴满路. 2003. 南北地震带南段水文地球化学特征及其与地震的关系[J]. 地质力学学报,9(1):21-30.
- 张慧,张新基,苏鹤军. 2005. 强震水氡前兆异常特征及其物理解释[J]. 西北地震学报,27(3):228-232.
- 张翔,付虹,罗睿洁. 2019. 滇西大理地区温泉溶解二氧化碳及碳同位素特征[J]. 国际地震动态,(8):159-160.
- 赵慈平,陈有丽,王云,等. 2014. 云南宁洱-通关火山区最上地壳地

- 热场:构造和岩浆活动意义[J]. 岩石学报, 30(12): 3645–3656.
- 周晓成, 王万丽, 李立武, 等. 2020. 金沙江–红河断裂带温泉气体地球化学特征[J]. 岩石学报, 36(7): 2197–2214.
- Birchard G F, Libby W F. 1978. Earthquake associated radon anomalies: possible mechanisms[J]. Eos Transactions American Geophysical Union, 59(4): 329.
- Craig H. 1961. Isotopic variations in meteoric waters[J]. Science, 133(3465): 1702–1703.
- Ge L Q, Zhao J K, Luo Y Y. 2014. The research on earthquake radon anomalies[J]. Journal of Geoscience and Environment Protection, 2(5): 38–40.
- Giggenbach W F. 1988. Geothermal solute equilibria. Derivation of Na–K–Mg–Ca geoindicators[J]. Geochimica et Cosmochimica Acta, 52(12): 2749–2765.
- Mamyrin B A, Anufrier G S, Kamensky I L, et al. 1970. Determination of the isotopic composition of helium in the atmosphere[J]. Geochemistry International, 7: 498–505.
- Molchan G M. 1990. Strategies in strong earthquake prediction[J]. Physics of The Earth and Planetary Interiors, 61(1–2): 84–98.
- Muir–Wood R, King G. 1993. Hydrological signatures of earthquake strain[J]. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 98(B12): 22035–22068.
- Sano Y, Marty B. 1995. Origin of carbon in fumarolic gas from island arcs[J]. Chemical Geology, 119(1–4): 265–274.
- Thomas D. 1988. Geochemical precursors to seismic activity[J]. Pure and Applied Geophysics, 126(2): 241–266.
- Wang K L, He J H, Schulzeck F, et al. 2015. Thermal condition of the 27 October 2012 M_w 7.8 Haida Gwaii subduction earthquake at the Obliquely Convergent Queen Charlotte Margin[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 105(2B): 1290–1300.

Prediction Efficiency of the Water Radon in Eryuan Hot Spring and Its Hydrochemical Characteristics

ZHONG Jun¹, WANG Bo^{1,2}, YAN Rui¹, LI Qing³

(1. China Earthquake Networks Center, Beijing 100045, China)

(2. State Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Institute of Geology, China Earthquake Administration, Beijing 100029, China)

(3. Eryuan Seismic Station, Yunnan Earthquake Agency, Eryuan 671200, Yunnan, China)

Abstract

The prediction efficiency of the water radon in Eryuan hot spring was tested by using Molchan diagram method, and the chemical composition, hydrogen and oxygen isotopes and water cycle characteristics of the spring water were studied. The results show that: ① High value of water radon in Eryuan hot spring is more sensitive to the medium–strong earthquakes in the vicinity, and the most probable predictive period is less than 90 days before the earthquake event; ② The hydrochemical type of Eryuan hot spring is $\text{HCO}_3 \cdot \text{SO}_4\text{-Na}$, which has no direct hydraulic relations with the surrounding surface water and shallow groundwater; ③ The water in Eryuan hot spring belongs to “partially–balanced water” and gets supply from deep source.

Keywords: water radon in Eryuan hot spring; prediction efficiency; hydrochemical characteristics