

胡小静,付虹,张翔,等. 2023. 基于 4 种技术方法的地下流体资料预报效能探讨. 中国地震, 39(4):732~741.

基于 4 种技术方法的地下流体 资料预报效能探讨

胡小静 付虹 张翔 李琼 高文斐

云南省地震局,昆明 650224

摘要 分别采用阈值法、速率变化法、趋势转折法和破年变法 4 种方法,对昭通地区全部地下流体观测资料进行预报效能 R 值定量计算。针对预报效能较好的测项,依据异常特征和水化学特征,并结合已有研究成果,对这些异常产生的孕震机理进行讨论。结果表明,昭通地区大多数流体异常的最佳预测时段在 3 个月以内,尤其是速率类异常和趋势转折类异常在出现转折后,具有较好的短临预测意义;11 个测项的预报效能 $R > R_0$,可作为滇东北地区日常跟踪的重点测项;推断认为大多数异常属于大气降水产生的流体力作用诱发的浅层前兆异常。

关键词: 技术方法 预报效能 地下流体 昭通地区

[文章编号] 1001-4683(2023)04-0732-10 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

地下流体普遍存在于地壳介质中,被国内外学者认为是最重要的短临前兆观测手段之一(张炜等,1988;刘耀炜,2006;Wang et al,2009;),在长期的地震预报实践中,所记录到的各类流体异常在大震短临预测过程中发挥了重要的作用(刘耀炜等,2002;吴忠良等,2007;晏锐等,2018;田雷等,2022)。众多研究结果表明,地下流体资料对孕震区和外围区介质变化的响应非常灵敏,地震的孕育和发生过程始终伴随有地下物质运移、能量传输和条件改变,从而引起不同含水层之间的交互渗入等,进而导致地下水物理、化学参量和逸出气体浓度的异常变化(车用太等,1997;Montgomery et al,2003;Zhou et al,2021;李营等,2022;Chen et al,2022)。

研究结果显示,2014 年鲁甸 6.5 级地震发生前,昭通地区地下流体观测记录到了大量的地下流体异常,对滇东北地区乃至川滇交界东部地区的震情趋势判定发挥着重要的作用(刘耀炜等,2015)。因此,本文对昭通地区地下流体资料开展震情跟踪技术方法预报效能计算,尽可能从量化的角度来评估观测资料在震情预测方面发挥的作用,同时对这些异常产生的孕震机理进行讨论。

1 资料概况

昭通地区目前正在观测的全部地下流体资料包括 19 个观测点的 47 个观测项,其中模

[收稿日期] 2022-09-20 [修定日期] 2023-01-30

[项目类别] 中国地震局星火计划项目“滇南—滇西南地区地下流体异常深浅耦合关系研究”(XH21030Y)资助

[作者简介] 胡小静,女,1985 年生,高级工程师,主要从事地震地下流体资料分析工作。E-mail:360325439@qq.com

拟观测 17 项,包括水氡观测 5 项、二氧化碳观测 5 项、离子观测 4 项、电导率观测 2 项、pH 观测 1 项,数字化观测 30 项,均为水温水位观测。梳理全部观测资料后,巧家老店水温、盐津水温、永善莲峰水温及水位、鲁甸水温及水位由于观测时间较短,无法参与计算,其余 41 个测项全部参与了阈值法、速率变化法、趋势转折法和破年变法 4 种方法的预报效能计算。参与本次预报效能检验的震例为 2000 年以来昭通地区及周边 200km 范围内的 5 级以上历史地震,具体震例分布情况见图 1,测点基本信息见表 1。

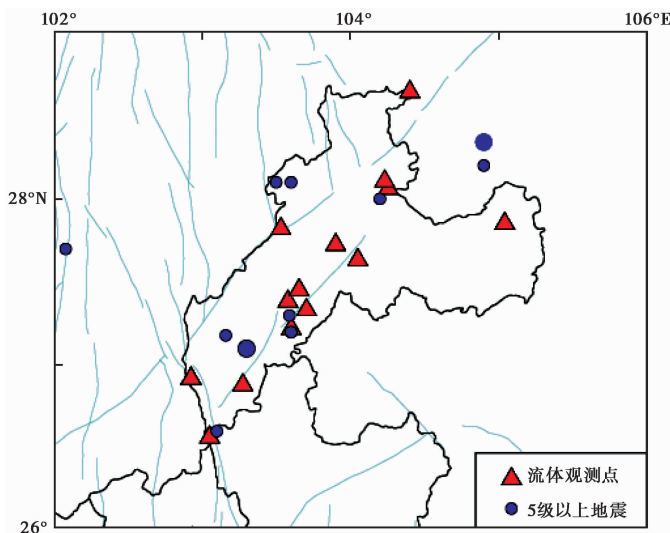


图 1 昭通地区地下流体观测点及震例分布

2 计算方法

分别采用阈值法、速率变化法、趋势转折法和破年变法 4 种计算方法对昭通地区地下流体观测资料进行异常提取,并计算其 R 值进行预报效能检验。

(1) 阈值法,该方法直接从原始观测时序数据中识别出异常信息,也称为原始曲线法。首先求取整个时序数据的标准差,计算最佳阈值(标准差倍数 n);然后查询超出该阈值的异常数据,得到观测数据中的高(低)值异常及其时间点。

(2) 速率变化法,又称差分法,是一种压抑长周期、突出短周期变化的线性滤波。针对原始观测数据的一阶差分序列,使用平稳序列的均方差作为异常控制线,或使用给定的阈值作为异常控制线来判别时间序列中的异常点,突出那些突跳性或离散度较大的异常。当有一组数据 (x_1, x_2, \dots, x_n) 时,可计算相邻 2 个数据之间的差值 (Δx_i) ,并依此按下式计算差分值(绝对值)的平均值

$$|\overline{\Delta x}| = \frac{\sum_{i=1}^{n-1} |\Delta x_i|}{n-1} \quad (1)$$

一般情况下,取 n 倍的 $|\overline{\Delta x}|$ 作为异常的阈值,超过该阈值的数据即可视为异常。

(3) 趋势转折法,该方法中的观测数据趋势项基于线性拟合方法提取,利用最小二乘法

表 1 昭通地区流体观测项基本情况及 4 种方法的预报效能定量计算结果

序号	基础信息				阈值法预报效能			速率变化法预报效能			趋势法预报效能			破年变法预报效能			
	测项名称	东经 / (°)	北纬 / (°)	采样率	数据起始时间 (年-月-日)	最佳预	R	R ₀	最佳预	R	R ₀	最佳预	R	R ₀	最佳预	R	R ₀
						测时间 /天	测时间 /天	测时间 /天	测时间 /天	测时间 /天	测时间 /天	测时间 /天					
1	老店水位	103.28	26.88	分钟值	2016-08-31	125	0.09	0.57	254	0.07	0.57	77	0.05	0.32	30	0.02	0.32
2	盐津水温	104.26	28.06	分钟值	2016-01-31	30	0	-0.16	30	0.09	0.24	30	-0.10	-0.16	30	-0.03	-0.16
3	水富水位	104.40	28.64	分钟值	2013-01-01	385	0.56	0.40	35	0.40	0.34	395	0.39	0.38	38	0.44	0.38
4	水富水温	104.40	28.64	分钟值	2016-08-22	337	0.53	0.60	35	0.83	0.60	310	0.50	0.56	30	0.65	0.56
5	彝良水位	104.05	27.63	分钟值	2016-01-31	310	-0.05	0.32	287	0.50	0.71	73	0.02	0.32	30	-0.03	-0.25
6	彝良水温	104.05	27.63	分钟值	2016-01-31	30	-0.05	-0.25	30	-0.06	-0.25	30	-0.07	-0.25	30	-0.06	-0.25
7	彝良水氢	104.05	27.63	日均值	2003-09-25	30	0.15	0.28	47	0.20	0.28	39	0.15	0.16	30	0.25	0.29
8	威信水位	105.04	27.85	分钟值	2017-07-24	249	0.19	0.57	249	0.09	0.57	219	0.31	0.71	39	0.21	0.32
9	威信水温	105.04	27.85	分钟值	2017-08-23	30	0	-0.25	48	0.12	0.32	30	-0.04	-0.25	168	0.51	0.71
10	威信水氢	105.04	27.85	日均值	2001-01-09	164	0.05	0.09	134	0.19	0.21	30	-0.01	-0.28	132	0.27	0.31
11	蒙姑水位	103.05	26.56	分钟值	2018-01-13	51	0.30	0.57	270	0.19	0.57	100	-0.05	0.32	58	0.30	0.71
12	蒙姑水温	103.05	26.56	分钟值	2018-01-13	30	0	-0.25	30	-0.06	-0.25	30	-0.09	-0.25	30	0	0
13	巧家F	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	30	-0.02	0.17	61	-0.01	0.16	380	0.02	0.21	333	0.04	0.14
14	巧家电导	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	391	0.32	0.22	60	0.23	0.22	53	0.02	0.18	300	0.16	0.22
15	巧家二氧化碳	102.93	26.92	日均值	2005-08-12	30	0.09	0.29	40	0.21	0.24	131	0.31	0.31	289	0.23	0.31
16	巧家钙离子	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	30	0.07	0.07	60	0.31	0.23	32	0.21	0.18	89	0.14	0.19
17	巧家镁离子	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	269	0.28	0.22	69	0.29	0.23	38	-0.10	0.07	381	0.26	0.22
18	巧家碳酸根	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	31	0.08	0.10	45	0.26	0.22	129	0.23	0.22	282	0.20	0.22
19	巧家水氢	102.93	26.92	日均值	2000-01-01	54	0.04	0.07	30	0.02	0.13	60	0	0.12	30	-0.03	0.07
20	盐津二氧化碳	104.23	28.11	日均值	2006-11-19	214	0.21	0.34	46	0.32	0.34	92	0.27	0.35	30	0.23	0.36
21	盐津水氢	104.23	28.11	日均值	2004-09-10	353	0.15	0.19	34	0.37	0.32	67	0.06	0.31	346	0.27	0.30
22	大关 pH	103.90	27.76	日均值	2007-08-08	40	0.13	0.25	41	-0.15	0.21	30	0.09	0.16	30	0.17	0.31
23	大关电导率	103.90	27.76	日均值	2008-01-01	30	0.14	0.29	30	-0.04	0.21	147	0.38	0.34	30	0.28	0.25
24	大关二氧化碳	103.90	27.76	日均值	2007-01-01	322	0.21	0.34	30	0.16	0.25	47	-0.03	0.16	322	0.12	0.29

续表 1

序号	基础信息				阈值法预报效能			速率变化法预报效能			趋势法预报效能			破年变法预报效能		
	测项名称	东经 / (°)	北纬 / (°)	采样率	数据起始时间 (年-月-日)	最佳预测		最佳预测		最佳预测		最佳预测		最佳预测		
						R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	R	R ₀	
25	大关水氡	103.90	27.76	日均值	2001-01-01	41	0.17	0.19	0.19	0.28	30	0.07	0.17	30	0.09	0.12
26	永善松溪水位	103.90	28.32	分钟值	2019-04-01	59	0.51	0.60	0.30	0.43	46	0.09	0.24	30	0.39	0.56
27	永善松溪水温	103.90	28.32	分钟值	2019-04-01	30	0.19	0.57	-0.17	-0.25	41	0.13	0.32	30	-0.17	0
28	鲁甸二氧化碳	103.55	27.20	日均值	2007-01-01	30	0.01	0.13	0.09	0.18	30	0.31	0.27	65	0.20	0.18
29	永善气氡	103.53	27.82	日均值	2018-11-10	76	0.16	0.32	0.34	0.57	48	0.47	0.57	76	0.24	0.49
30	永善二氧化碳	103.53	27.82	日均值	2007-01-01	395	0.14	0.25	-0.10	0.09	49	0.15	0.21	383	0.28	0.33
32	大关水位	103.90	27.72	分钟值	2012-02-24	255	0.26	0.26	0.28	0.37	40	0.04	0.19	355	0.22	0.40
33	大关水温	103.90	27.72	分钟值	2012-03-25	270	0.32	0.34	0.22	0.31	37	0.09	0.11	30	0.19	0.22
34	乐居水位	103.57	27.38	分钟值	2012-05-24	122	0.22	0.37	0.32	0.34	50	0	0.11	53	0.21	0.40
35	乐居水温	103.57	27.38	分钟值	2012-05-24	260	0.03	0.11	0.30	0.37	282	0.10	0.37	139	0.21	0.34
36	昭阳一中水位	103.70	27.33	分钟值	2012-01-01	79	0.36	0.38	0.47	0.38	101	0.28	0.31	30	-0.02	-0.36
37	昭阳一中水温	103.70	27.33	分钟值	2011-07-08	74	0.15	0.38	0.08	0.11	30	-0.10	-0.36	229	0.19	0.31
38	巡龙水位	103.65	27.45	分钟值	2017-01-01	30	0.38	0.56	0.33	0.60	61	0.18	0.24	168	0.48	0.60
39	巡龙水温	103.65	27.45	分钟值	2017-02-07	30	0.21	0.24	0.11	0.24	43	0.18	0.43	30	0.31	0.43
40	茨院水位	103.60	27.21	分钟值	2006-02-17	150	0.38	0.30	0.37	0.31	128	0.09	0.29	396	0.58	0.28
41	茨院水温	103.60	27.21	分钟值	2007-01-01	30	0.18	0.18	0.18	0.18	165	0.17	0.18	229	0.22	0.21
42	永善莲峰水位	103.53	27.82	分钟值	2020-01-01											
43	永善莲峰水温	103.53	27.82	分钟值	2020-01-01											
44	巧家老店水温	103.28	26.88	分钟值	2020-04-01											
45	盐津水温	104.26	28.06	分钟值	2020-12-01											
46	鲁甸水温	103.55	27.20	分钟值	2021-06-01											
47	鲁甸水位	103.55	27.20	分钟值	2021-06-01											

注：这 6 项观测资料起始时间为 2020 年以后，时间较短，故未参与计算。R₀ 为研究时段内区域内自然发震概率。

对观测时序数据进行线性拟合,得到观测数据的最佳转折时间点,根据线性拟合速率值出现变化或变化量超出给定阈值来判定是否为趋势转折异常。具体如下:给定数据点 (x_i, y_i) ($i=0, 1, \dots, m$),假定在 $K_k(x_k, y_k)$ ($k=1, 2, \dots, m-1$) 点处出现趋势转折,利用最小二乘法求得 K_k 点前后数据线性变化的斜率 k_{k1} 和 k_{k2} ,相应的残差为 e_{k1} 和 e_{k2} ,残差和 $(e_{k1}+e_{k2})$ 最小值所对应的点即为最佳数据转折点。

(4)破年变法,年变形态或幅度异于多年平均变化的异常,称之为破年变异常,一般采用矩平分析法识别该类异常。具体为:用多年观测数据的均值序列(五日、旬、月)之间的相关程度来求观测点值的正常年动态曲线,再以原来不同年时间段的均值序列和正常年动态曲线的余差序列提取异常指标,用其剩余标准差的2倍或3倍作为阈值控制线。

(5) R 值评分,本次预报效能评估是同时进行时间和空间预测的方法,其 R 值评分计算公式为(许绍燮,1989)

$$R = \frac{\text{报对的地震次数}}{\text{地震总次数}} - \frac{\text{预报占用时间}}{\text{预报研究的总时间}} \times \frac{\text{预报空间网格数}}{\text{总的空间网格数}} \quad (2)$$

当 $R > 0$ 时,表示该方法预测效能高于随机预测,具有预测意义;当 $R \geq R_0$ 时,表明该方法预测效能通过置信度 97.5% 的显著性检验,具有显著预测意义。

根据历史震例的选取原则,空间网格数的确定以震中为圆心,5级地震半径为 200km 的范围,6级地震半径为 300km 的范围,7级地震半径为 300km 的范围。

3 预报效能计算结果

针对昭通地区现有的 43 项地下流体观测数据,分别采用 4 种震情跟踪技术方法提取异常,并计算其预报效能(具体结果见表 1),不同方法具体评估结果如下。

阈值法计算的预报效能 R 值结果(图 2(a))显示,水富水位、巧家电导率、巧家镁离子、乐居水位、茨院水位共计 5 个测项 $R \geq R_0$,通过预测效能置信度 97.5% 的显著性检验,在日常跟踪分析过程中具有较好的预测意义;82% 的测项具有一定的预测意义;19% 的测项预

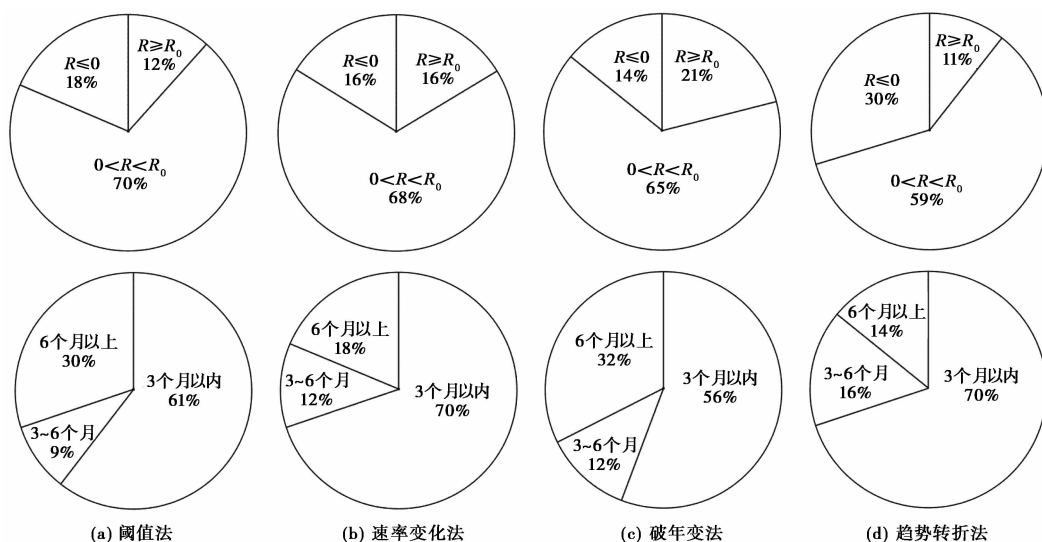


图 2 不同方法预报效能评估结果

报效能低于随机预测,在日常跟踪过程中无参考价值。从最佳预测时间来看,预测时段在 3 个月内的测项占比约 61%,3~6 个月的测项占比约 9%,半年以上的测项占 30%,表明利用阈值法提取的异常具有较好的短临预测意义,其次可作为半年以上的年尺度指标。

速率变化法计算的预报效能 R 值结果(图 2(b))显示,水富水位、水富水温、巧家电导率、巧家镁离子、巧家钙离子、盐津水氨、茨院水位共计 7 个测项 $R \geq R_0$,通过预测效能置信 97.5% 的显著性检验,在日常跟踪分析过程中具有较好的预测意义;68% 的测项具有一定的预测意义;16% 的测项预报效能低于随机预测,在日常跟踪过程中无参考价值。从最佳预测时间来看,预测时段在 3 个月以内的测项占比约 70%,3~6 个月和半年以上的测项分别占 12% 和 18%,表明利用速率变化法提取的异常其短临预测意义更为显著,可作为 3 个月以内显著的短临指标。

破年变法计算的预报效能 R 值结果(图 2(c))显示,水富水位、水富水温、巧家镁离子、巧家碳酸根、大关电导率、鲁甸二氧化碳、昭阳一中水位、茨院水位、茨院水温共计 9 个测项 $R \geq R_0$,通过预测效能置信度 97.5% 的显著性检验,在日常跟踪分析过程中具有较好的预测意义;65% 的测项具有一定的预测意义;14% 的测项预报效能低于随机预测,在日常跟踪过程中无参考价值。从最佳预测时间来看,预测时段在 3 个月以内的测项占比 56%,具有较好的短临预测意义,6 个月及以上的测项占比 32%,可作为半年或年度指标。

趋势转折法计算的预报效能 R 值结果(图 2(d))显示,水富水位、巧家钙离子、巧家碳酸根、大关电导率、鲁甸二氧化碳共计 5 个测项 $R \geq R_0$,通过预测效能置信度 97.5% 的显著性检验,在日常跟踪分析过程中具有较好的预测意义;59% 的测项具有一定的预测意义;约 30% 的测项预报效能低于随机预测,在日常跟踪过程中无参考价值。从最佳预测时间来看,预测时段在 3 个月以内的测项占比约 70%,表明趋势转折后将进入显著的短临阶段。

综合上述 4 种方法的结果分析,速率变化法和破年变法提取的异常预报效能更佳;水富水位、水富水温、巧家电导率、巧家钙离子、巧家镁离子、巧家碳酸氢根、大关电导率、鲁甸二氧化碳、茨院水位、茨院水温、昭阳一中水位等共计 11 个测项可以作为滇东部北地区年度或日常跟踪的重点测项;大多数流体异常的最佳预测时段在 3 个月以内,尤其是速率法提取的异常和趋势转折后会进入较为显著的短临预测阶段;除此之外,约有 22% 的测项通过震例评估的预报效能低于随机预测($R < 0$),对震情跟踪判定的预测意义不大。

4 讨论与结论

4.1 讨论

针对上述提取出的预报效能较好的测点测项,选择最佳的计算方法结果(表 2),依据不同手段的物理意义、异常特征以及流体补给来源,并结合已有的研究结果对这些异常产生的孕震机理进行讨论。

从不同观测测项异常的最佳预测时段来看,不同测项的异常具有一定的阶段性特征,其中水温和水化学离子异常大多数出现在震前 2 个月以内,表现出较为明显的短临特征;而水位、电导率异常大多数出现在震前半年或一年左右,表现出一定的中期到年度的前兆特征。从提取出的异常形态来看,水温和水化学离子主要表现为测值的速率变化,反映的是震前观测项在短周期范围的高频异常信息;水位、电导率主要表现为原始测值正常年变超出正常

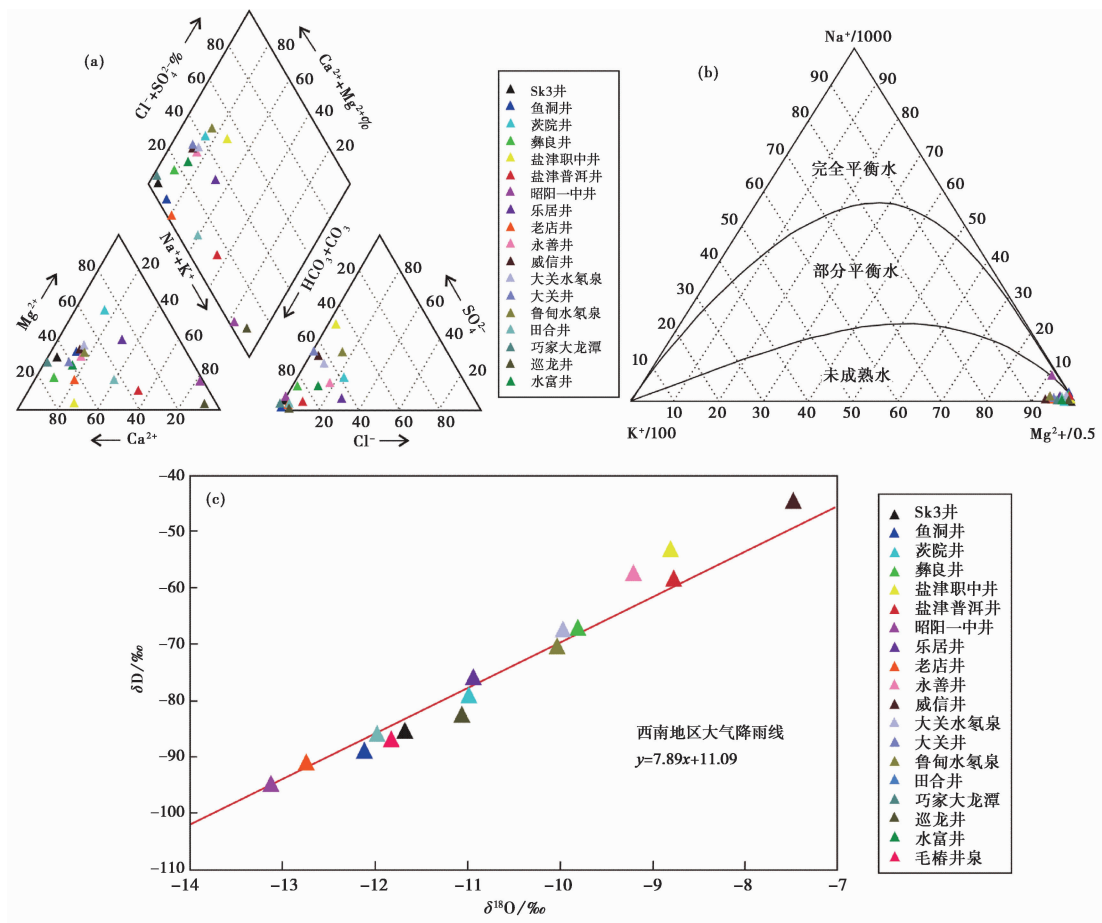
表 2 昭通地区重点跟踪测项的预报效能信息

序号	测项名称	方法	最佳预测时间 /天	R	R ₀	对应震例信息(年-月-日 震级)
1	水富水位	阈值法	385	0.56	0.4	2014-04-05 永善 5.3 级,2014-08-03 鲁甸 6.5 级
2	茨院水位	阈值法	150	0.38	0.3	2012-09-07 彝良 5.7 级,2014-08-03 鲁甸 6.5 级
3	昭阳一中水位	速率变化法	110	0.47	0.38	2014-08-03 鲁甸 6.5 级,2014-08-17 永善 5.0 级, 2018-10-31 西昌 5.1 级
4	水富水温	速率变化法	35	0.83	0.6	2018-12-16 兴文 5.7 级,2019-06-17 长宁 6.0 级, 2019-09-08 威远 5.4 级
5	茨院水温	阈值法	30	0.18	0.18	2014-04-05 永善 5.3 级,2014-08-03 鲁甸 6.5 级
6	巧家钙离子	速率变化法	60	0.31	0.23	2003-11-15 鲁甸 5.1 级,2006-07-22 盐津 5.1 级, 2012-09-07 彝良 5.7 级,2014-08-03 鲁甸 6.5 级
7	巧家镁离子	速率变化法	69	0.29	0.23	2003-11-15 鲁甸 5.1 级,2004-08-10 鲁甸 5.6 级, 2019-06-17 长宁 6.0 级
8	巧家碳酸氢根	速率变化法	45	0.26	0.23	2003-10-16 大姚 6.1 级,2005-08-05 会泽 5.3 级, 2008-08-30 攀枝花 6.1 级
9	巧家电导率	阈值法	391	0.32	0.22	2003-07-21 大姚 6.2 级,2004-08-10 鲁甸 5.6 级, 2005-08-05 会泽 5.3 级,2008-08-30 攀枝花 6.1 级, 2009-07-09 姚安 6.0 级
10	大关电导率	趋势法	147	0.38	0.34	2008-08-30 攀枝花 6.1 级,2012-09-07 彝良 5.7 级, 2014-08-03 鲁甸 6.5 级,2018-12-16 兴文 5.7 级
11	鲁甸二氧化碳	趋势法	30	0.31	0.27	2008-08-30 攀枝花 6.1 级,2018-10-31 西昌 5.1 级, 2018-12-16 兴文 5.7 级

阈值范围或者趋势形态发生改变,主要反映的是观测项在长周期范围的变化过程。整体来看,不同的观测手段呈现出较为显著的时间层次性和形态差异性。

水化学测试数据的 Piper 图(图 3(a))显示,昭通地区地下流体井水样的水化学类型有一定差别,其中巧家龙潭、昭阳 SK3 井、昭通鱼洞井、巧家老店井等表现为典型的 HCO₃-Ca 型,鲁甸水氡点、鲁甸茨院、盐津职中、大关水氡、大关谢家沟等部分井孔含有一定量的 SO₄²⁻,表现为 HCO₃-SO₄-Ca 型,昭阳一中、巡龙井的阳离子以 Na⁺ 为主,呈现出典型的 HCO₃-Na 型;三角图结果(图 3(b))显示,研究区全部观测井均处在未平衡水状态,且大多数井位于镁端元,水岩作用程度较弱;氢氧同位素组成(图 3(c))也显示,除个别井孔存在一定的氢化物交换,大多数观测井孔的氢氧同位素处在大气降水线附近,属于地表水补给,未发生强烈的水岩作用。上述水化学特征结果显示,昭通地区地下流体观测井主要为大气降水补给,在水化学类型上存在一定的差别,但并无明显的区域特征。

研究表明,降水等因素造成的地下水动态变化可产生一种作用于地壳岩石的附加流体力,地震前多种流体力的作用过程是环境因子对浅层前兆异常作用的主要力学机制之一,孔隙压力、动水压力以及化学腐蚀等原理,是该异常机理的理论基础。这种浅层诱发前兆异常非常显著的一个特征是异常变化的层次性,即在这种作用力的影响下,会产生不同时间尺度



注：(a)水化学 Piper 图；(b)Na-K-Mg 三角图；(c)氢氧同位素组成图。

图 3 水化学分析图

的异常变化(王吉易等,2002)。此外也有研究表明,2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震前,昭通地区的流体异常产生的原因可能是断裂带空隙的开启与闭合,导致观测井含水层承压性发生改变,引起地下水混合作用增强(刘耀炜等,2015),该研究结果与上述机制的理论基础相符。因此,结合昭通地区不同异常所呈现出的较为显著的时间层次性和形态差异性,以及大气降水补给的水化学特征,认为昭通地区的地下流体异常大多可能属于这种地下水诱发的浅层前兆异常。

4.2 结论

通过对昭通地区地下流体观测资料开展异常提取和预报效能评估,针对预报效能较好的测项,依据不同测项的异常特征和观测井的水化学特征,并结合已有研究成果,对这些异常产生的孕震机理进行讨论,得到以下主要认识:

(1) 昭通地区大多数流体异常的最佳预测时段在 3 个月以内,尤其是速率法提取的异常和趋势转折后会进入较为显著的短临阶段。

(2) 水富水位、水富水温、巧家电导率、巧家钙离子、巧家镁离子、巧家碳酸氢根、大关电

导率、鲁甸二氧化碳、茨院水位、茨院水温、昭阳一中水位等共计 11 个测项的预报效能 $R > R_0$ ，具有显著的预测意义，可以作为滇东北地区日常跟踪的重点测项。

(3) 大气降水是昭通地区地下水动态变化的主要因素，其可以产生一种作用于地壳岩石的附加流体力，结合不同测项的异常呈现出较为显著的时间层次性和形态差异性，推测认为大多数异常属于这种流体力作用诱发的浅层前兆异常。

参考文献

- 车用太, 鱼金子. 1997. 地下流体的源兆、场兆、远兆及其在地震预报中的意义. 地震, **17**(3): 283~289.
- 李营, 陈志, 胡乐, 等. 2022. 流体地球化学进展及其在地震预测研究中的应用. 科学通报, **67**(13): 1404~1420.
- 刘耀炜. 2006. 我国地震地下流体科学 40 年探索历程回顾. 中国地震, **22**(3): 222~235.
- 刘耀炜, 任宏微, 张磊, 等. 2015. 鲁甸 6.5 级地震地下流体典型异常与前兆机理分析. 地震地质, **37**(1): 307~318.
- 刘耀炜, 施锦, 潘树新, 等. 2002. 川滇地区地下流体中短期前兆识别和区域性特征. 地震, **22**(1): 17~24.
- 田雷, 王博, 晏锐, 等. 2022. 四川理塘水温强震前异常变化特征及效能检验. 中国地震, **38**(2): 213~225.
- 王吉易, 宋贯一, 曹志成, 等. 2002. 地下水诱发的浅层前兆异常及其机理与有关的地震预报问题(1). 华北地震科学, **20**(2): 28~41.
- 吴忠良, 蒋长胜. 2007. 统计预测、经验预测、物理预测——近期国际地震预测预报研究的启示. 中国地震, **23**(3): 211~224.
- 许绍燮. 1989. 地震预报能力评分. 见: 国家地震局科技监测司. 地震预报方法实用化研究文集地震学专辑. 北京: 地震出版社, 586~589.
- 晏锐, 田雷, 王广才, 等. 2018. 2008 年汶川 8.0 级地震前地下流体异常回顾与统计特征分析. 地球物理学报, **61**(5): 1907~1921.
- 张炜, 王吉易, 鄂秀满, 等. 1988. 水文地球化学预报地震的原理与方法. 北京: 教育科学出版社, 18~20.
- Chen Z, Li Y, Liu Z F, et al. 2022. Geochemical and geophysical effects of tectonic activity in faulted areas of the North China Craton. Chem Geol, **609**: 121048.
- Montgomery D R, Manga M. 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. Science, **300**(5628): 2047~2049.
- Wang C Y, Manga M. 2009. Earthquakes and Water. Berlin, Heidelberg: Springer.
- Zhou Z H, Zhong J, Zhao J, et al. 2021. Two mechanisms of earthquake-induced hydrochemical variations in an observation well. Water, **13**(17): 2385.

Discussion the Forecasting Efficiency of Underground Fluid Data through Different Technical Methods

Hu Xiaojing, Fu Hong, Zhang Xiang, Li Qiong, Gao Wenfei

Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

Abstract Four methods, including threshold method, rate change method, trend transition method and annual change method, were used to quantitatively calculate R value of forecasting efficiency of all same underground fluid data in Zhaotong area. Based on the characteristics of anomalies and water chemistry, the seismogenic mechanism of these anomalies was discussed. The results showed that the best forecasting period of most fluid anomalies in Zhaotong area was within 3 months, especially after the anomalies extracted by the rate method and the trend turn, which is relatively significant for forecasting in short to imminent stage. The forecasting efficiency $R > R_0$ of 11 test items can be used as key test items for daily tracking anomaly in northeast Yunnan. It was concluded that most such the shallow precursor anomalies were caused by fluid force induced by atmospheric precipitation.

Keywords: Technical methods; Forecasting effectiveness; Underground fluids; Zhaotong area