

# 云南水化学观测异常与地震关系\*

李琼, 付虹, 胡小静, 高文斐

(云南省地震局, 云南 昆明 650224)

**摘要:** 基于2000—2017年云南水化学观测资料, 利用原始观测曲线识别异常的传统分析方法, 提取单项及群体异常, 分析其与地震的关系。结果表明: ①研究时段内, 云南水化学资料的利用率低, 仅为56%, 反映了水化学观测站的映震能力不均一; ②震例研究显示水化学异常以短期异常为主, 占总异常的70%, 对地震的预测效能较好, 76%的测项没有出现虚报; ③单台群体及区域群体异常与地震的关系密切, 台站密集地区的异常数量较多且地震对应率较高。因此, 建设高密度、高质量观测点是提高水化学地震预测能力的重要基础。

**关键词:** 云南地区; 水化学观测; 映震能力; 异常与地震关系

**中图分类号:** P315.723

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1000-0666(2020)02-0375-07

## 0 引言

受到印度板块由西向东的强烈侧向挤压和对西藏地块正面推挤派生的川滇菱形块体由北向南的楔入作用, 云南地区地震活动频繁而强烈(秦嘉政等, 2005)。近26年的统计结果显示, 云南省内平均每年约发生2~3次5级地震, 每2年约发生1次6级地震, 甚至一年发生多次6级以上强震, 如2003年7月和10月大姚地区先后发生了6.2和6.1级地震(刘丽芳, 付虹, 2003; 周龙泉等, 2007), 2014年先后发生了盈江6.1级、鲁甸6.5级和景谷6.6级强震(李琼等, 2014, 2016; 付虹等, 2015; 刘月, 邵志刚, 2016)。因此, 云南地区一直是中国地震分析预报与探索实践的主体区域之一(王俊等, 2016)。

在地震孕育阶段, 区域构造活动增强致使应力场发生变化, 断层的封闭性改变, 流体活动作用增强, 从而引起水化学异常(Woith *et al.*, 2013; Claesson *et al.*, 2004; 官致君, 2003)。云南水化学观测始于20世纪80年代, 长期的地震预测实践积累了丰富的观测资料和预报经验(赵慈平等, 2003; 寸菊艳, 2005)。研究人员主要从两方面研究云南水化学异常与地震的关系: 一是从震例总结的角度, 对单个地震事件的现象进行分析, 如

杨杰英(1997)分析了1995年武定6.5级地震前水化学异常, 指出水化学项目的继承性异常和震后异常可以作为后继地震发生的判据; 刘耀炜等(2015)研究认为2014年鲁甸6.5级地震前水岩反应加剧和地下水混合作用增强, 使地下水离子组分浓度发生变化。二是从观测资料的角度, 提取前兆异常, 分析异常与地震的对应关系, 总结异常特征(张立, 付虹, 2000; 田雷等, 2018)。

云南水化学观测历经近30年, 这期间观测环境、观测仪器及观测方式等均发生了较大改变, 如有些测点已经停测, 有些测点增加了新的观测项目, 有些台站增加了新的观测点等。因此, 需要根据云南水化学资料的动态变化情况, 不断更新、完善指标, 总结异常特征, 才能提高其在震情跟踪分析中的可操作性。本文以2000—2017年云南水化学观测资料为研究样本, 采用在原始观测曲线上识别异常的传统分析方法, 逐项梳理云南水化学观测曲线, 提取异常变化, 并分析单项及群体异常与 $M_s \geq 5.0$ 地震的关系, 总结个性、共性和群体性异常特征。

## 1 资料选取及处理

云南省目前共有16个水化学观测台站, 其中包括3个断层带土壤气 $CO_2$ (林元武, 翟盛华,

\* 收稿日期: 2019-12-13.

基金项目: 中国地震局监测预报司震情跟踪重点项目(2020020501)和青年项目(2020010316)共同资助.

1993), 共有 61 个观测项目用于日常震情跟踪监视, 表 1 列出了 13 个观测井(泉)的基本情况。这些台站分布极不均匀, 主要分布在滇西北东带的保山和大理地区以及滇东北的昭通地区, 滇西南的耿马和普洱地区分别有 1 个观测台站, 而滇中、滇东及滇西北的丽江以北地区则为水化学的观测空白区(图 1)。滇东北地区有 5 个水化学观测点, 其中 3 个点为接触下降冷泉; 滇西北东带的水化学观测点包含 3 眼上升泉(2 眼温泉)和 6 口裂隙承压水井(表 1)。本文选取 2000—2017 年云南省内的全部水化学观测资料, 并排除环境、人为、仪器等干扰因素。

2000—2017 年, 云南省境内共发生了 51 次  $M_s \geq 5.0$  地震。将发生在同一个月内、同一个震源区的多次地震视为一组, 将 51 次地震划分为 43 组作为震例样本(图 1)。进一步挑选出以每一个台站为圆心, 分别发生在其半径 300 km 和 500 km 范围内的 5.0~5.9 级和 6.0 级以上地震, 作为研究单项异常与地震关系的震例样本。

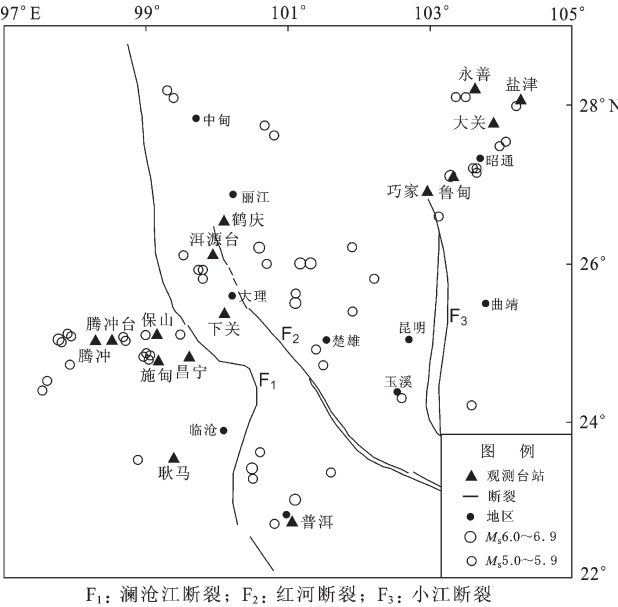


图 1 云南水化学观测台站与 2000—2017 年  $M_s \geq 5.0$  地震震中分布

Fig. 1 Distribution of stations of water isotope observation and  $M_s \geq 5.0$  earthquakes in Yunnan from 2000 to 2017

表 1 水化学观测井(泉)基本情况  
Tab. 1 Basic information of hydrochemical observation wells (springs)

观测点名称	位置	观测项目	观测层岩性	井(泉)水类型	构造位置
鲁甸大坪泉	县城西南大坪村	$\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$ , $\text{F}^-$ , 电导率	页岩与灰岩	接触下降冷泉	昭通—鲁甸断裂系
巧家大龙潭泉	县城	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{F}^-$	黏土	接触下降冷泉	小江—则木河断裂交汇处
大关林业局泉	大关县城南侧	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$ , $\text{F}^-$ , 电导率	砂土	接触下降冷泉	大关—马边断裂上
保山市滇 14 井	市地震局院内	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$ , 水汞, $\text{SO}_4^{2-}$	第三系粉砂岩	孔裂隙承压水	石菁断裂
隆阳区保山二井	市 64 医院内	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{SO}_4^{2-}$	第三系砂质黏土	孔裂隙承压水	石菁断裂
腾冲叠水河井	云南省空港集团开发基地中	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$	第四系鞍山玄武岩、橄榄玄武岩	火山岩孔、裂隙承压水	大盈江断裂与观音塘—腾冲断裂交汇处
腾冲袁家塘浅井(深 12 m)	腾冲地震台内	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$	黏土含安山岩碎块	裂隙水	马厂与后山断裂交汇处
施甸仁和井	施甸县城北李家村	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$	砂粘土、角砾岩、白云质灰岩	孔裂隙承压水	龙陵—瑞丽断裂南侧 13 km
昌宁 1 号泉	盆地农田中	$\text{Cl}^-$	奥陶纪绢云母片岩	断裂上升冷泉	昌宁断裂北侧隐伏断裂上
下关塘子铺泉	下关镇苍山角	$\text{PH}$ , $\text{CO}_2$ , 水汞, 电导率	苍山变质岩	裂隙上升温泉	西洱河断裂上
洱源滇 20 井	洱源水化地震台内	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$ , $\text{F}^-$ , 水汞	苍山变质岩	基岩裂隙承压水	鹤庆—洱源断裂上
洱源温泉	县老城区后山脚	水汞	变质岩	裂隙上升温泉	鹤庆—洱源断裂上
普洱大寨井	依象镇大寨村	$\text{Ca}^{2+}$ , $\text{Mg}^{2+}$ , $\text{HCO}_3^-$ , $\text{PH}$ , $\text{F}^-$ , 水汞	砂岩	基岩裂隙承压水	依象断裂上

## 2 异常与地震关系

在日常震情跟踪分析中, 针对水化学资料, 主要以原始观测曲线的背景作为参考, 按照曲线的上升或下降变化来识别异常。本文采用相同的

分析方法, 同时为了排除单点突跳或干扰引起的变化, 只提取具有一定持续时间且相对观测背景变化比较显著的异常。根据不同台站、不同测项的实际观测, 提取异常时所选择的数据类型为原始观测的日值、5 日均值或旬均值, 再根据异常与地震的最佳对应关系, 确定异常阈值。

按照水化学资料在日常会商中的应用约定,异常结束后3个月内发生的地震为对应,否则视为虚报。提取单项观测曲线的异常变化,标注其异常形态、异常幅度、异常起始至结束时间和异常持续时间等。通过标注每次异常开始至地震发生的间隔时间和对应地震到台站的距离,得到单项异常与地震的对应情况。在此基础上,进一步研究群体异常与区域地震的关系,分析其异常特征。

## 2.1 单项异常与地震关系

### 2.1.1 单项异常预测效能

通过逐项提取水化学观测曲线的异常变化,发现有6个台站(大关、施甸、昌宁、盐津、永善、洱源温泉)共27个测项未能提取到有效的异常变化,其它10个观测台站共34个测项提取到了清晰的异常变化。这些异常变化具有多种形态,如全部为高值、低值异常(图2a)、或破年变异常(图2b),或同时出现加速上升、加速下降、高值和低值等多种形态的异常(图2c)。

对单项水化学观测曲线的异常识别结果,用对应地震的异常次数除以异常总次数表示地震对应率,得到单项异常的地震预测效能,34个测项的单项异常的地震预测效能见表2。由表2可见,有30个测项的地震对应率高于75%,其中26项的地震对应率为100%,没有出现虚报。对应率低于50%的测项有2个,分别为普洱台水汞和洱源台水汞。

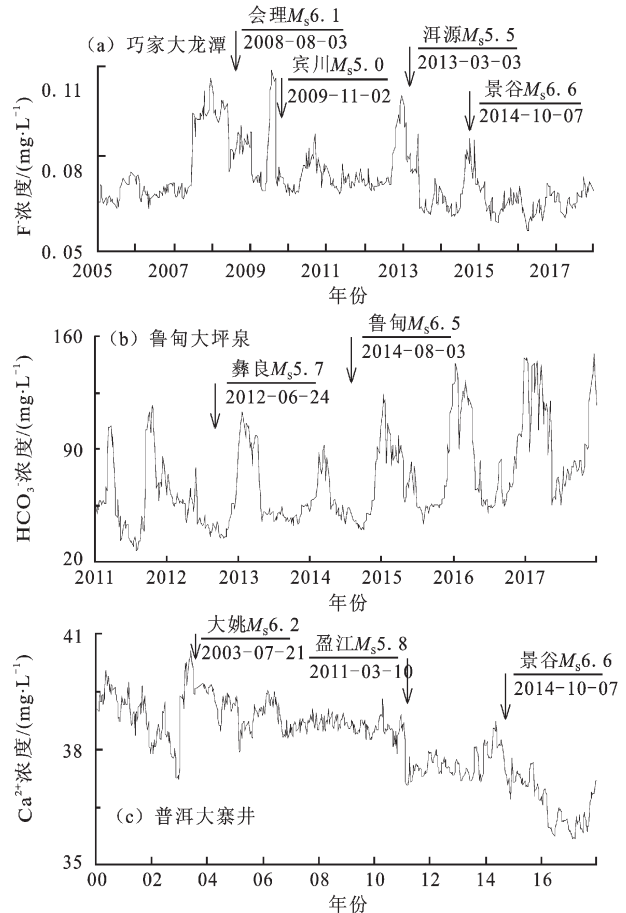


图2 水化学观测曲线的异常形态

Fig. 2 Abnormal pattern of hydrochemistry observation curve

表2 单项异常的地震预测效能

Tab. 2 Earthquake prediction efficiency of a single anomaly

测项	年份	异常 次数	对应率 (%)	测项	年份	异常 次数	对应率 (%)	测项	年份	异常 次数	对应率 (%)
洱源20井Ca <sup>2+</sup>	2012	2	100	隆阳二井Ca <sup>2+</sup>	2003	2	100	鲁甸大坪HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2011	2	100
洱源20井HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2011	4	75	隆阳二井Mg <sup>2+</sup>	2003	2	100	鲁甸大坪F <sup>-</sup>	2014	1	100
洱源20井水汞	2000	9	44	隆阳二井HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2003	2	100	鲁甸大坪泉电导率	2014	2	50
鹤庆局CO <sub>2</sub>	2000	9	78	隆阳二井SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2003	2	100	巧家大龙潭HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2005	2	100
下关泉电导率	2001	2	100	腾冲叠水河Ca <sup>2+</sup>	2001	1	100	巧家大龙潭F <sup>-</sup>	2005	4	100
下关泉水汞	2006	2	100	腾冲叠水河Mg <sup>2+</sup>	2001	1	100	普洱大寨Ca <sup>2+</sup>	2000	3	67
保山14井Ca <sup>2+</sup>	2000	3	100	腾冲叠水河HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2001	4	100	普洱大寨HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2001	6	83
保山14井Mg <sup>2+</sup>	2000	3	100	腾冲袁家塘Ca <sup>2+</sup>	2001	5	100	普洱大寨F <sup>-</sup>	2000	3	100
保山14井HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2000	1	100	腾冲袁家塘Mg <sup>2+</sup>	2007	3	100	普洱大寨PH	2004	1	100
保山14井SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	2000	3	100	腾冲袁家塘HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	2000	4	100	普洱大寨水汞	2000	4	25
保山14井PH	2000	2	100	腾冲袁家塘PH	2012	1	100	耿马局CO <sub>2</sub>	2007	3	100
保山14井水Hg	2000	5	80								

34 个测项的连续观测时间中最长 18 年、最短 4 年, 观测 10 年以上的有 28 项, 占 82%。通过统计出现 1 次异常的间隔时间, 发现共有 6 个测项自观测以来仅出现过 1 次异常, 出现异常的间隔时间最长为 18 年, 最短为 4 年。出现异常间隔时间最短的测项为平均每 2 年出现 1 次异常, 34 个测项平均每 6 年出现 1 次异常。以上结果表明, 单项水化学的异常变化对周边中强地震的指示性较好, 但对地震的漏报也较多。

### 2.1.2 单项异常特征

2000—2017 年, 34 个水化学测项共出现 102 次异常, 其中 86 次异常对应地震发生, 平均地震对应率为 84%。异常持续时间最短为 5 d, 最长超过 600 d, 平均为 153 d。异常出现后, 在地震预测有效期内不管发生几次地震, 如果只考虑第一个地震, 得到异常开始至发生第一个地震的时间间隔最短为 1 d, 最长超过 700 d, 平均为 152 d, 其中短期异常共有 59 次, 临震异常 12 次。由前兆异常数量的时间进程特征 (图 3) 可见, 约 64% 的水化学异常在云南中强地震发生前 3 个月内出现, 表明水化学异常主要以短临异常为主, 可以作为较好的短临预测指标。统计所有观测曲线异常变化与对应地震发生的时间间隔, 大于 1 a 的异常很少, 没有观测到长期趋势背景异常。

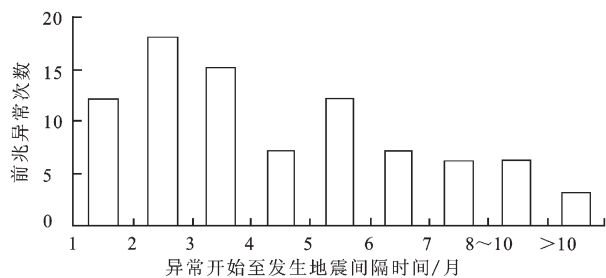


图 3 前兆异常数量的时间进程特征

Fig. 3 Time process characteristics of number of precursory anomaly

## 2.2 群体异常与地震关系

### 2.2.1 单台多测项群体异常与地震

云南省有 11 个综合观测离子浓度的台站, 同时观测多个离子组分的浓度。大关和施甸台的观测资料连续稳定, 但没有提取到与地震有关的异常变化, 因此仅对其余 9 个观测台站中具有映震效果的测项进行群体异常分析。分析单项异常与地

震关系可知, 下关台和巧家局观测台站均有 2 个单项测项提取到震前异常变化, 但均未提取到群体异常现象, 剩下 7 个台站的群体异常变化与地震关系见表 3。由表 3 可见, 有 4 个台站提取到多次群体异常现象, 分别为保山局、隆阳局、腾冲台和普洱市局, 其余 3 个台站均分别提取到 1 次群体异常, 其形态以高值和大幅波动异常形态为主, 地震对应率为 100%。异常出现至发生 5.0 ~ 5.9 级和 6.0 级以上地震的时间间隔平均分别为 90 d 和 120 d, 震中距平均分别为 115 km 和 225 km。以上分析表明, 当一个台站的多个测项出现准同步群体异常变化时, 该特征对后续地震的预测意义比较明确, 增加单台多测项的综合观测, 可以减少对干扰的误判, 更清楚地识别震前异常, 提高观测台站区域地震的监视能力。

### 2.2.2 区域群体异常与地震

在单项异常与地震关系分析结果的基础上, 对 34 项水化学测项进行处理: 异常的测值用“1”表示, 无异常的测值用“0”表示。云南水化学观测台站主要分布在以丽江—大理—保山等为主的滇西北东带、保山—临沧—思茅为主的滇西南以及曲靖—昭通为主的滇东北地区 (图 1), 所以本文以旬为时间单位按照这 3 个地区分别绘制异常频次曲线图, 提取区域群体异常 (图 4)。

图 4a 为滇西北东带地区的异常频次曲线, 区内共有 23 个测项。由图 4a 可见, 当有 3 个及以上测项出现准同步异常, 且同步异常持续时间超过 1 个月时, 其后在小滇西地区会发生 5.0 级以上地震, 对应率为 100%。因此, 滇西北东带地区出现的群体异常可以作为该区 4 ~ 6 个月内发生 5.0 级以上地震的短期预测指标。与该区群体异常变化关系对应较好的震例主要发生在澜沧江以西的小滇西地区, 分析认为可能和该区大多数观测台站和测项集中分布有关。

图 4b 为滇西南地区的异常频次曲线, 该区有 2 个观测台站 (耿马局和普洱局), 共 6 个观测项目。由图 4b 可见, 2000—2017 年有 2 个及以上测项的观测曲线同时出现异常的情况共 7 次, 只有 1 次虚报, 地震对应率约为 86%。震例结果显示异常出现后的 3 个月内, 主要对应发生 5.0 级以上地震; 当异常持续时间超过 3 个月, 则对应发生 6.0 级以上地震。



表3 单台群体异常与地震关系

Tab. 3 The relationship between group anomaly of single stations and earthquakes

台站	测项	异常持续日期	异常形态	异常天数	对应地震	震中距/ km	异常开始至发震 间隔时间/d
洱源台	$\text{Ca}^{2+}$	2013-12-20—2014-11-30	高值	340			160
	$\text{HCO}_3^-$	2014-03-30—2014-05-30	高值	60	2014-05-30 盈江 $M_s 6.1$ 地震	230	60
	Hg	2014-04-10—2014-09-10	高值	150			50
保山局	$\text{Ca}^{2+}$	2003-07-05—2003-12-25	持续下降	170	2003-07-21 大姚 $M_s 6.2$ 地震	225	16/101
	$\text{SO}_4^{2-}$	2003-07-20—2004-05-10	低值	290	2003-10-16 大姚 $M_s 6.1$ 地震		1/86
	$\text{HCO}_3^-$	2005-06-05—2006-02-28	低值	263	2006-01-12 墨江 $M_s 5.0$ 地震	315	216
	Hg	2005-12-05—2006-09-10	高值	275			37
	Hg	2007-04-15—2008-01-25	高值	280	2008-03-21 盈江 $M_s 5.0$ 地震	130	336
	PH	2008-01-05—2009-07-10	大幅波动	535			76
隆阳局	$\text{Ca}^{2+}$	2004-07-15—2004-12-30	高值	165			161
	$\text{Mg}^{2+}$	2004-10-25—2004-11-10	高值	15	2004-12-26 楚雄 $M_s 5.0$ 地震	225	61
	$\text{HCO}_3^-$	2004-11-25—2005-01-30	上升	65			31
	$\text{Ca}^{2+}$	2010-11-10—2011-01-05	高值	55			120
	$\text{Mg}^{2+}$	2010-10-15—2011-05-15	下降	210	2011-03-10 盈江 $M_s 5.8$ 地震	130	145
	$\text{HCO}_3^-$	2010-11-05—2011-01-15	上升	70			125
	$\text{SO}_4^{2-}$	2010-09-20—2011-06-15	低值	265			170
腾冲台	$\text{Ca}^{2+}$	2004-08-10—2004-12-20	高值	130	2004-10-19 保山 $M_s 5.0$ 地震	50	39
	$\text{HCO}_3^-$	2004-08-20—2005-01-10					59
	$\text{Ca}^{2+}$	2007-09-30—2007-12-20	高值	70			160
	$\text{Mg}^{2+}$	2007-09-01—207-12-20	高值	110	2008-03-21 盈江 $M_s 5.0$ 地震	70	200
	$\text{HCO}_3^-$	2007-09-10—2008-08-30	高值	350			191
	$\text{HCO}_3^-$	2010-08-10—2010-12-30	高值	140	2011-03-10 盈江 $M_s 5.8$ 地震	70	210
	$\text{Mg}^{2+}$	2010-10-20—2010-12-30	高值	70			140
	$\text{Mg}^{2+}$	2016-09-30—2017-02-30	高值	150	2017-03-27 漾濞 $M_s 5.1$ 地震	155	177
	$\text{HCO}_3^-$	2016-08-30—2017-02-30	高值	180			182
腾冲局	$\text{Ca}^{2+}$	2013-10-25—2014-06-30	高值	245	2014-05-30 盈江 $M_s 6.1$ 地震	70	215
	$\text{Mg}^{2+}$	2013-09-05—2014-06-30	高值	295			265
鲁甸局	$\text{F}^-$	2014-03-08—2014-08-30	高值	172	2014-04-05 永善 $M_s 5.0$ 地震	110	27/145/159
	$\text{HCO}_3^-$	2014-01-01—2014-05-30	破年低值	150	2014-08-03 鲁甸 $M_s 6.5$ 地震	25	125/213/227
					2014-08-17 永善 $M_s 5.3$ 地震	110	
普洱市局	$\text{Ca}^{2+}$	2002-11-20—2003-07-10	大幅波动	230			241
	$\text{HCO}_3^-$	2002-10-20—2003-06-05	高值	225	2003-07-21 大姚 $M_s 6.2$ 地震	310	271
	Hg	2003-01-25—2003-07-10	高值	165			176
	Hg	2003-01-25—2003-07-10	高值	165	2003-10-16 大姚 $M_s 6.1$ 地震	310	261
	$\text{Ca}^{2+}$	2002-11-20—2003-07-10	大幅波动	230			326
	$\text{HCO}_3^-$	2009-03-25—2009-10-25	高值	210	2009-07-09 姚安 $M_s 6.0$ 地震	310	104
	PH	2008-09-04—2009-12-04	高值	450			335
	$\text{Ca}^{2+}$	2013-12-10—2014-09-10	高值	270	2014-05-31 盈江 $M_s 6.1$ 地震	400	171
	$\text{F}^-$	2012-10-10—2014-05-10	高值	570			590

图 4c 为滇东北地区的异常频次曲线, 只有鲁甸局和巧家局的水化学观测项目具有地震预测效果, 共有 5 个测项 (表 2)。由图 4c 可见, 2014 年 8 月 3 日鲁甸 6.5 级地震前 5 个月, 鲁甸局观测的  $\text{HCO}_3^-$  和  $\text{F}^-$  的观测曲线出现群体异常。

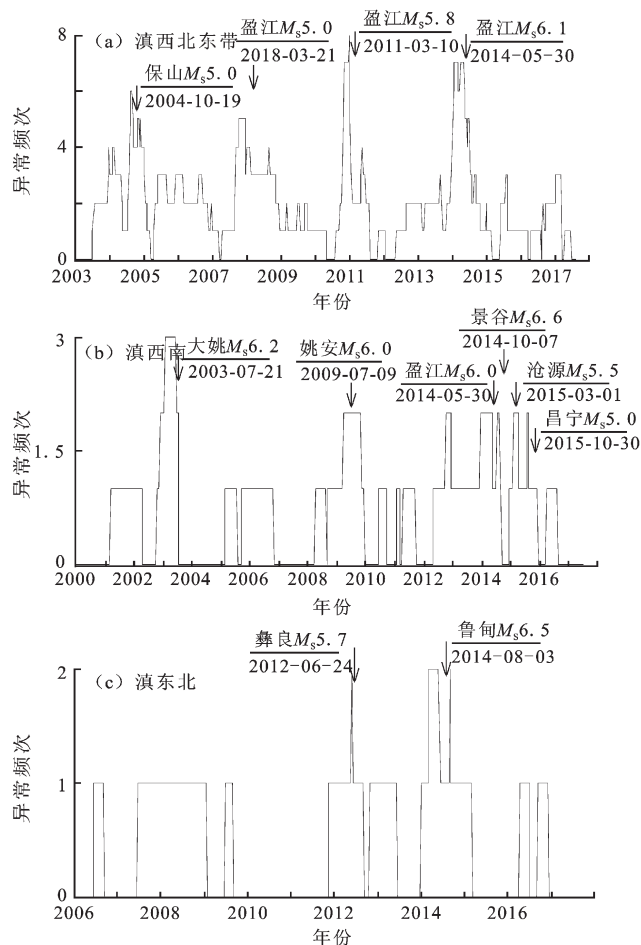


图 4 云南水化学异常频次叠加值曲线

Fig. 4 Graph of abnormal frequency overlay values of hydrochemistry in Yunnan

### 3 结论与讨论

利用在原始观测曲线上识别异常的传统分析方法, 提取 2000—2017 年云南地区水化学单项异常, 分析单项及单台群体异常的地震预测效能。根据观测台站的区域分布特征, 对单项异常进行频次叠加, 分区域提取综合异常, 分析其与地震的关系, 得出如下主要结论:

(1) 目前, 云南省用于日常及年中、年度震情会商的水化学观测资料有 16 个观测台站, 共计

61 个测项, 其中 5 个观测台站的 27 项观测资料没有对应震例, 占总测项的 44%; 有对应地震的测项中, 88% 的测项出现异常的地震对应率超过 75%, 其中 26 个测项的异常变化没有出现虚报, 地震对应率为 100%。云南水化学观测资料的地震预测有效占比仅为 56%, 观测台站的映震能力是不均一的, 这反映出水化学观测台站在构造活动引起的水岩反应程度上有较大差异, 且具有多种成因的特征 (张伟等, 1988; 鱼金子等, 2000)。因此, 地震异常灵敏点的选择及高质量的观测资料是获取地震前兆异常的基础条件。

(2) 单项异常从出现至发生地震的时间间隔平均为 116 d, 短临异常约为总异常的 70%, 临震异常为 12 次, 没有观测到长趋势背景异常。这种以短临异常为主的特征表明在地震孕育的短临阶段具有较强的深部热物质活动以及不同层位地下水的相互作用 (刘耀炜, 施锦, 2000), 也充分表明强构造活动是形成区域水化学地震前兆的关键因素。

(3) 根据云南水化学观测台站的集中分布区域, 分区提取群体异常, 结果显示: 当异常测项增多时, 该区 5 级及周边 6 级以上地震的对应率均大于 85%。滇西北东带地区的观测台站密集, 群体异常最显著, 滇西南和滇东北地区的观测台站相对较少, 能覆盖的区域有限, 群体异常与地震有一定的相关性, 但仅有 1~2 个异常测项, 异常的显著程度没有滇西北东带地区强。这表明研究区域的测项具有一定的规模和数量是提高群体异常可信度的前提。水化学测站相对密集地区的异常数量较多且地震对应率较高, 进一步印证了在复杂构造条件下, 有较高密度观测点的区域才能有效观测到流体活动加剧的前兆现象这一结论 (刘耀炜等, 2015)。因此, 继续推进高质量水化学观测点的建设, 包括密集式低成本断层气连续观测点的布设, 是今后提高地震地球化学监测预测能力的重要基础。

#### 参考文献:

- 寸菊艳. 2005. 保山水泵异常与中强地震关系研究[J]. 地震研究, 28(4): 325-330.
- 付虹, 钱晓东, 毛玉平, 等. 2015. 2014 年云南鲁甸  $M_6.5$  地震异常及预测[J]. 地震研究, 38(2): 181-188.
- 官致君. 2003. 四川地区水化学短期异常指标与地震预测方法[J]. 四川地震, (4): 21-27.

- 李琼,付虹,钱晓东. 2016. 云南盈江  $M_s 6.1$  地震前兆异常特征分析[J]. 地震研究, 39(2): 207–302.
- 李琼,付虹,朱荣欢,等. 2014. 滇东北  $M_s \geq 5.0$  地震前地下流体异常特征与 2014 年云南鲁甸 6.5 级地震研究[J]. 地震研究, 37(4): 495–502.
- 林元武,翟盛华. 1993. 断层气  $\text{CO}_2$  快速测定法及其在地震研究中的应用[J]. 地震, 13(6): 65–67.
- 刘丽芳,付虹. 2003. 2003 年云南大姚 6.2 级、6.1 级地震中短期地震学异常演化特征[J]. 地震地磁观测与研究, 26(5): 33–38.
- 刘耀伟,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[J]. 地震地质, 37(1): 307–408.
- 刘耀伟,施锦. 2000. 强震地下流体前兆信息特征[J]. 地震学报, 22(1): 59–64.
- 刘月,邵志刚. 2016. 2014 年云南景谷  $M_s 6.6$  地震前地震活动变化分析[J]. 地震地质, 38(4): 1070–1081.
- 秦嘉政,皇甫岗,钱晓东,等. 2005. 云南强震活动与预测方法研究[M]. 昆明: 云南科技出版社, 2.
- 田雷,余怀忠,周志华. 2018. 基于水化学分析的滇 17 井流体异常识别及应用[J]. 地震研究, 41(4): 551–558.
- 王俊,邵志刚,孙小龙,等. 2016. 川滇地区强震前流体异常特征与预测指标体系初探[J]. 地震, 36(4): 109–119.
- 杨杰英. 1997. 武定 6.5 级地震前的水化学异常[J]. 华南地震, 17(1): 50–57.
- 鱼金子,徐峰,刘五洲,等. 2000. 地下水化学异常信息迁移的水动力学模型实验研究[J]. 地震, 20(1): 91–95.
- 张立,付虹. 2000. 云南地区水质前兆异常与  $M \geq 6.0$  级地震关系研究[J]. 高原地震, 12(1): 43–50.
- 张伟,王吉易,鄂秀满,等. 1988. 水文地球化学预报地震的原理与方法[M]. 北京: 教育科学出版社.
- 赵慈平,虎雄林,付虹,等. 2003. 2001 年 10 月 27 日云南永胜 6.0 级地震的前兆异常特征[J]. 地震研究, 26(2): 126–135.
- 周龙泉,刘杰,张晓东. 2007. 2003 年大姚 6.2 和 6.1 级地震前三维波速结构的演化[J]. 地震学报, 29(1): 20–31.
- Claesson L, Skelton A, Graham C, *et al.* 2004. Hydrogeochemical changes before and after a major earthquake [J]. *Geology*, 32(8): 641–644.
- Woith H, Wang R, Maiwald U, *et al.* 2013. On the origin of geochemical anomalies in groundwaters induced by the Adana 1998 earthquake [J]. *Chemical Geology*, 339: 177–186.

## The Relationship between Anomalies of Hydrochemical Observation Data and Earthquakes in Yunnan Province

LI Qiong, FU Hong, HU Xiaojing, GAO Wenfei

(Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, Yunnan, China)

### Abstract

Based on the observation data of Hydrochemistry in Yunnan Province from 2000 to 2017, a traditional analysis method of identifying anomalies with original observation curve is used to extract single and group anomalies and analyzed the relationship between them and earthquakes. The results show that during the research period, the utilization rate of hydrochemical data in Yunnan is 56%, which reflects the uneven seismic reflection capacity of hydrochemical observation stations. The earthquake case study shows that the hydrochemical anomalies are mainly short-term anomalies, accounting for 70% of the total anomalies. The prediction efficiency of the earthquake is good, and 76% of the items are not false. The single station group and regional group anomalies are closely related to earthquakes. The number of anomalies in the area with dense stations is large and the earthquake response rate is high. The construction of high-density and high-quality observation points is an important basis for improving the earthquake prediction ability of hydrochemical data.

**Keywords:** Yunnan area; hydrochemical observation data; earthquake prediction efficiency; relationship between anomalies and earthquakes