

王俊,黄显良,刘朝君,等,2020. 2014年安徽霍山  $M_s$ 4.3地震前地下流体典型异常特征分析. 中国地震,36(1):67~79.

# 2014年安徽霍山 $M_s$ 4.3地震前 地下流体典型异常特征分析

王俊<sup>1,2)</sup> 黄显良<sup>1)</sup> 刘朝君<sup>3)</sup> 李军辉<sup>1)</sup> 何康<sup>1)</sup>  
郑海刚<sup>1)</sup> 王雪莹<sup>1)</sup> 杨源源<sup>1)</sup>

1)安徽省地震局,合肥 230031

2)大别山地震监测预报实验场,安徽六安 237000

3)黄山地震台,安徽黄山 245001

**摘要** 通过对2014年4月20日安徽霍山  $M_s$ 4.3地震前地下流体异常进行回溯性分析,总结了流体异常特征。结果显示,在时间上,流体异常具有配套性、阶段性特征,震前11个月异常月频次逐渐增加;震前3个月异常月频次加速上升,进入临震阶段,震前1.5个月,部分异常结束,异常月频次转折下降;在空间上,流体异常主要集中在震中200km范围内,且外围流体异常主要表现为趋势上升或低值,震中附近流体异常表现为突升。震前流体异常还与测项有关,水温、水化测项映震效果较好,水氦、氢气突升异常短临意义明显。

**关键词:** 霍山  $M_s$ 4.3地震 流体异常 迁移 加速性

[文章编号] 1001-4683(2020)01-0067-13 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

据中国地震台网测定,北京时间2014年4月20日16时00分,在安徽省六安市霍山县(116.10°E,31.40°N)发生了  $M_s$ 4.3地震(以下简称“霍山地震”),震源深度10km,地震宏观震中位于诸佛庵镇。六安、合肥、安庆等地普遍有震感,霍山县内诸佛庵、落儿岭、佛子岭等8个乡镇震感强烈,该地震是2011年安庆  $M_s$ 4.8地震后安徽地区又一次显著地震,也是霍山地区1973年  $M_s$ 4.5地震后时隔41年的又一次  $M_s$ 4.0以上地震(倪红玉等,2015a、2015b),地震造成了霍山地区67间房屋出现开裂和较大的经济损失。地震前,安徽省地震局有明确的预测意见:“安徽省2014年中小地震将持续活跃,应重点关注霍山地区发生  $M_s$ 4.5左右地震的可能”,并根据庐江氢气、舒城水氦等短临突出异常特征,于2014年4月18日填报了为期3个月的短临预测意见。

[收稿日期] 2019-05-07; [修定日期] 2020-12-26

[项目类别] 中国地震局震情跟踪课题(2020010301)、国家自然科学基金(U1602233)共同资助

[作者简介] 王俊,男,1984年生,硕士,高级工程师,主要从事地震地下流体及分析预报工作。

E-mail: renshi1314@126.com

黄显良,通讯作者,男,1972年生,高级工程师,主要从事地震活动性研究、数字地震学等研究工作。

E-mail: hxl818@sina.com

霍山地震发生后,很多学者对该地震做了大量研究工作,如震源机制解变化过程(倪红玉等,2015b)、发震构造(刘泽民等,2015)及发震断层的参数测定(倪红玉等,2015b)等。这些研究工作均取得了很好的应用结果,但至今还未有系统分析霍山地震前地下流体典型异常特征的相关研究论文。而研究表明,地下流体异常对孕震区及其外围区域地下介质环境变化有较好地响应,与区域构造活动关系也较密切(车用太等,1997;刘耀炜等,1999;Montgomery et al,2003;缪阿丽等,2017)。《中国震例》(蒋海昆,2014)统计显示,流体异常占有异常的50%以上。地下流体作为一种可能的地震前兆异常已得到国内外专家学者广泛认可(汪成民,1990;Wang et al,2010)。地震工作者对大震前的流体异常特征做了大量的研究工作(刘耀炜等,2000、2008、2015;车用太等,1999、2008;黄辅琼等,2002;付虹等,2003;晏锐等,2015;周安聘等,2017;王俊等,2018),在时间、空间上均获得了一些认识。譬如大震前,在空间上,长趋势异常和中短期异常具有时空迁移性特征;在时间进程中,异常频次出现加速性等特征。近年来地下水化学参量的异常现象及其机理研究等工作也在不断深入开展,这些均为地下流体异常性质的判定、未来地震预测预报水平的提升提供新的视角。在流体地震前兆异常机理研究方面,认为地震应力积累过程中地下水与地下深部气体的化学性质和物理性质会产生一定变化,且流体前兆异常变化与区域地质构造活动关系密切,对孕震区和外围区域地下介质变化反映较为灵敏(周安聘等,2017;王俊等,2018)。因此,研究可能与地震有关的流体异常特征,对于积累震例、提升地震预测分析水平具有科学意义。

基于此,本文旨在对霍山  $M_s 4.3$  地震前的典型地下流体异常特征进行回溯性研究,总结地下流体中期、短期及临震异常特征,讨论其可能的产生机理,为今后安徽地区地震预测提供借鉴。

## 1 异常基本概述

《中国震例》(蒋海昆,2014)中按照时间发展进程将地震前兆异常分为L-长趋势背景异常(震前5年以上);A-中期趋势异常(震前0.5~5年);B-短期异常(震前延续1~6个月);C-临震异常(震前1个月内)等4个阶段类别;异常信度可分为I(可靠)、II(较可靠)、III(参考)3个等级。本文依据《中国震例》中前兆异常时间、可信度的划分标准,对霍山地震前流体异常进行了归纳、总结(图1)。

霍山地震发生在皖西部地区,震中250km范围内有流体观测点27个,测项53项(表1),震前出现10项流体异常(异常测项比为18.9%),其中,水位异常5项(异常测项比9%),水温异常3项(异常测项比5.7%),水化学异常2项(异常测项比3.8%)。这些异常可分为中期趋势背景异常(3项)、短期异常(4项)及临震异常(3项),以短、临异常为主(占70%);空间上,异常主要集中在0~200km范围内;中短期异常分布在100~250km范围内(震中西南部没有流体观测资料,因此没有异常信息),震中附近100km范围内流体异常则表现为短、临异常特征(表2)。

## 2 典型异常特征分析

本次梳理分析霍山地震前流体异常时,所选取的流体资料,特别是一些水位、水化学资料,可能会受到干扰,因此,在选取异常测项资料时,遵循以下几点原则:①无人为或环境干



扰(如观测仪器更换、环境改造、外界抽注水等);②具有年动态变化特征;③测项效能评估为A、B类。流体异常的判定标准为:①基于以往震例,若以往震例中出现类似形态变化,可作为判定的依据之一;②氢气的异常标准为超出正常背景的5~10倍;水氡的异常判定标准为超出观测异常的2倍均方差;水温异常标准为水温变化 $\geq 0.002^{\circ}\text{C}$ ;水位异常判定标准为打破年变规律、异常的变化速率、异常幅度等(国家地震局科技监测司,1995)。据此整理出了震前10项信度较高的异常,分述如下。

### 2.1 中期异常特征分析

以往震例总结表明,地下流体异常在苏皖地区中地震前具有较好的震兆意义(缪阿丽等,2017;王俊等,2018)。霍山地震前有3项中期趋势背景异常,均为水位异常,这表明该地震前群体性水位趋势异常较为突出。水位异常以趋势上升为主,其起始时间表现出震中附近—外围—震中的迁移性特征。现将各异常基本情况简述如下。

#### (1) 定远皖04井水位

定远皖04井深683.48m,套管下至10m处(0~6m为第四系松散层,6m以下为基岩),观测含水层在460m以下,地下水类型为孔隙承压水。构造上位于郯庐断裂带西侧。自2002年改造后,实行模拟水位观测,该测项在2012年预报效能中被评为B类。自观测以来,定远皖04井水位呈趋势上升变化,但在该井周边中地震前,水位上升速率减小,如2006年定远 $M_s 4.2$ 、2011年安庆 $M_s 4.8$ 地震(王俊等,2018)。2012年4月28日,该井水位上升速率再次减小(图2),震后上升速率逐渐恢复。

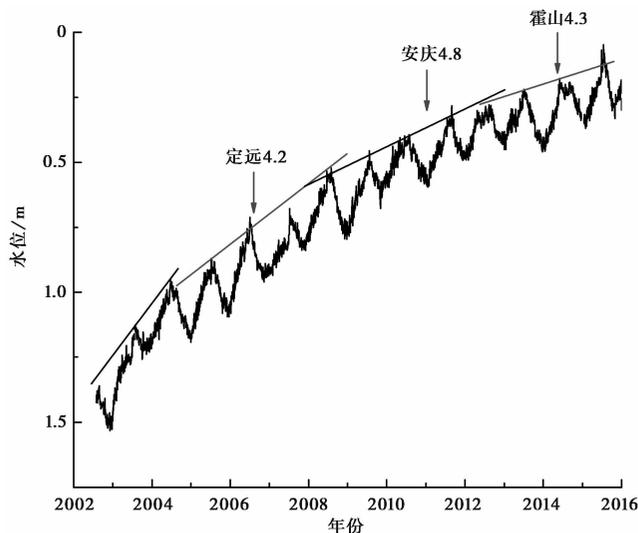


图2 定远皖04井水位日均值曲线

#### (2) 马鞍山皖27井水位

马鞍山皖27井深450.17m,套管下至35m处(0~28m为第四系冲积厚土,29m以下为基岩),观测含水层为29m以下,地下水类型为裂隙承压水。构造上位于枞阳-宿松断裂附近。自2008年开始进行数字化观测,有一定的气压效应,日降雨量达到60mm以上,对水位产生明显影响,该测项在2012年预报效能评估中被评为B类。自2008年数字化观测以来,水位

总体变化平稳,年水位变幅约 47cm。该井异常特征以水位下降或低值后水位出现上升变化为主,如 2011 年安庆  $M_s4.8$ 、高邮  $M_s4.9$  地震前,水位出现快速下降,在水位最低值发生地震;2011 年桐城  $M_s3.6$  地震前,水位先下降至较低值,水位上升后发震。在 2013 年 7 月水位先下降至低值状态后不断上升,最后发生霍山  $M_s4.3$  地震。2015 年阜阳  $M4.3$  地震前也出现类似变化(图 3(a))。

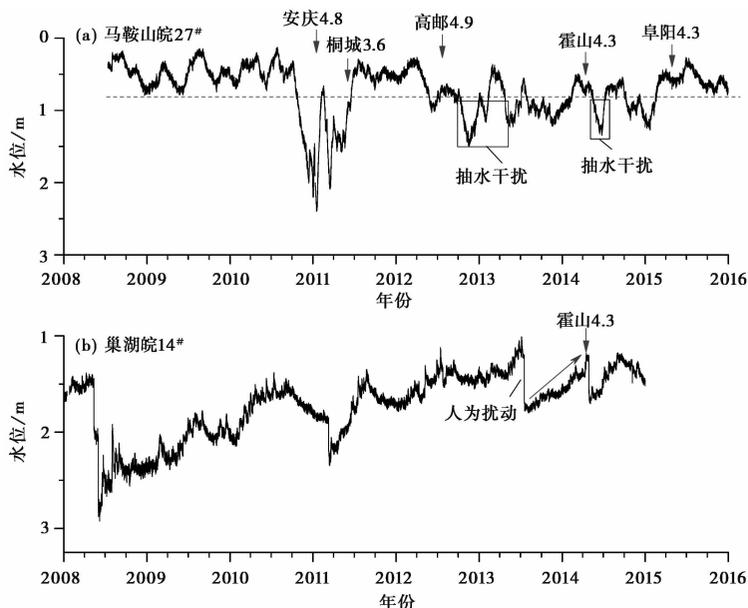


图 3 霍山地震前地下流体中期趋势背景异常

(3) 巢湖皖 14 井水位

巢湖皖 14 井深 331m,2009 年实测井深为 290m,套管下至 331m 处(0~2m 为第四系黏土,2m 以下为基岩),观测含水层在 270.13~301.00m,含水层岩性为石灰岩,地下水类型为孔隙裂隙承压水。构造上位于郟庐断裂带东侧,滁河断裂与合肥-东关断裂交汇处。自 2007 年开始实行数字化观测,水位受降雨影响明显,该测项在 2012 年预报效能评估中被评为 A 类。该井水位每年 1~6 月呈上升变化,7~12 月呈下降变化,但 2013 年 7 月该井水位不降反而持续上升,直至 2014 年 4 月 20 日霍山地震前(图 3(b)),该异常出现后,安徽省地震局预报中心流体学科组曾 2 次赴现场核实分析,认为其异常可信度高。

2.2 短期异常特征分析

霍山  $M_s4.3$  地震前,流体短期异常具有协调性特征,水位、水温及水化学异常相配套出现。在异常形态上,水位、水温异常均表现为下降变化,水化学异常为突升变化。在空间上,主要集中在震中附近 100~200km 范围内,且异常具有震中附近向外围迁移、进入临震阶段又向震中迁移的特征(图 1)。

2.2.1 水位下降异常

(1) 安庆皖 23 井水位

安庆皖 23 井深 650m,套管下至 293m 处(0~30m 为第四系黏土层,30m 以下为基岩),

观测含水层段为 289~315m,含水层岩性为中生代石英正长斑岩,地下水类型为裂隙承压水。构造上位于枞阳-宿松断裂上盘一侧。该井自 2007 年开始进行数字化观测,该井水位测项在效能评估中被评为 B 类。该井水位具有规则的年变动态,每年 1~7 月水位上升,8~12 月水位下降,水位年正常变幅在 35~68cm,而 2013 年 7 月开始水位持续下降,与以往同期相比,2013 年水位最低值明显偏低(图 4(a)),水位年变幅达到 73.8cm,明显高于正常年份水位变幅,之后在水位恢复上升过程中发生霍山地震。

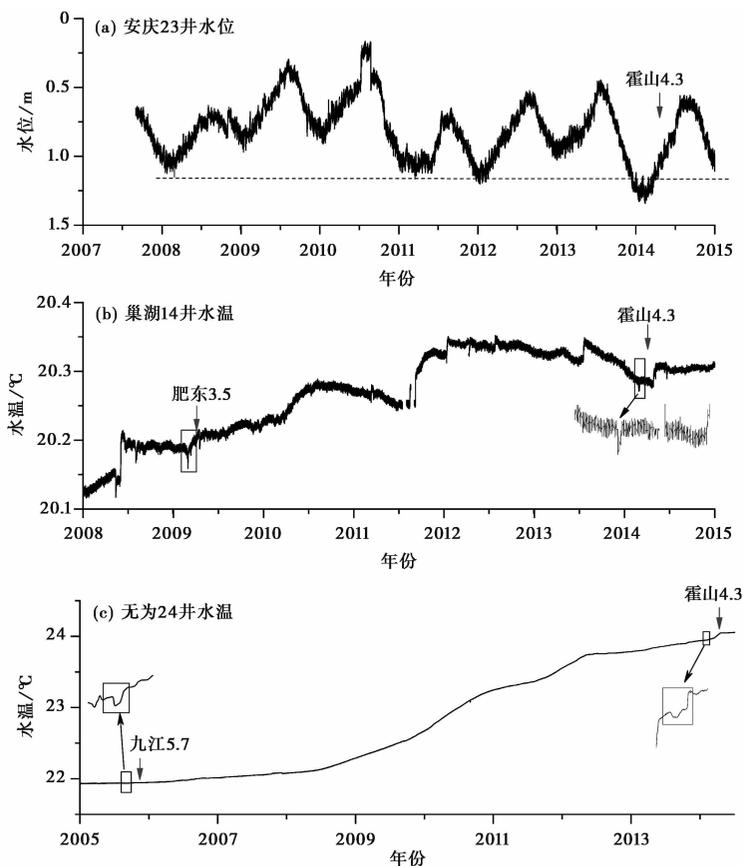


图 4 霍山地震前地下流体短期异常

### 2.2.2 水温下降异常

#### (1) 巢湖皖 14 井水温

巢湖皖 14 井自 2007 年开始实行数字化水温、水位同步观测,水温、水位受降雨影响明显。该井水温测项在预报效能评估中被评为 B 类。该井水温长趋势形态呈上升型。2014 年 2 月份,水温出现“V”型突降变化,幅度达到 0.018℃,水温先下降后恢复上升,在恢复上升过程中发生霍山地震。在 2009 年 4 月安徽肥东  $M_s$ 3.5 地震前,该井水温曾出现类似变化,下降幅度为 0.02℃(图 4(b))。

#### (2) 无为皖 24 井水温

无为皖 24 井深 3200m,套管下至 3200m 处(0~50m 为第四系砂砾层,50m 以下为基

岩),受外界干扰很小。观测含水段为 1100~1200m,含水层岩性为三叠系灰岩,地下水类型为裂隙承压水。构造上位于下扬子断块区,无为-和县断裂带东南端。该井水温自 2005 年开始观测,其水温测项在预报效能评估中被评为 B 类。该井水温长趋势形态表现为趋势上升型。2014 年 2 月,该井水温出现“U”型变化,变化幅度为  $0.008^{\circ}\text{C}$ (图 4(c)),在时间上,与巢湖 14 井水温异常同步;空间上,两者也相接近,这可能是由于受到区域应力场的统一作用。2005 年江西九江  $M_s 5.7$  地震前,无为 24 井水温曾出现类似“U”型变化,幅度为  $0.01^{\circ}\text{C}$ 。

### 2.2.3 水化学突升异常

#### 庐江台氢气

庐江地震台观测井井深 327.05m,套管下至 42m 处(0~19m 为第四系砂、砂砾覆盖层,19m 以下为基岩),为温泉、自流观测井。观测含水层为 290~320m,含水层岩性为晚白垩纪闪长玢岩。地下水类型为  $\text{SO}_4\text{-Na}$  型。地质构造上,位于郟庐断裂带南段西侧。受外界干扰较小,因此该台氢气测项在效能评估中被评为 B 类。

该台在 1985 年被国家地震局列为 I 类水化观测站,观测项目众多,有井压、流量、水汞、动水位、水温,水中部分溶解气体、气氦、气汞等观测项目。中国地震局于 2013 年 7 月 1 日在“背景场”项目中增设了 SP-3400 型气相色谱仪,主要观测水中溶解的氢气、氦气等气体,由此庐江台增加了氢气观测项目。研究表明,氢气具有较强的映震灵敏性,特别是在短临阶段的映震能力明显优于其他气体测项,是地震短临预测预报的重要手段之一(张培仁等,1993;林元武等,1994;车用太等,2002;刘耀炜等,2004a、2004b、,2006;范雪芳等,2012)。

庐江台氢气自 2013 年 7 月 1 日开始观测,数据总体变化平稳,但 2014 年 1 月 20 日氢气出现突升变化,变化幅度达到  $0.05\% \text{ppm}$ (超过正常背景值的 7 倍),直至 2014 年 2 月 28 日恢复突升前水平(图 5(a))。该异常出现后,庐江台观测人员及时对气路系统、进样系统、色谱柱、观测环境等进行核实,最终分析认为,观测数据变化真实,反映了来自深部的氢气浓度增大,可能反映了该区域存在一定的构造活动。

### 2.3 临震异常特征分析

研究表明,临震异常是预测地震发生时间的有效手段(刘耀炜等,2004a;王俊等,2018)。霍山地震前,水物理、水化学短临异常突出,这些异常是震前填报短临预测意见的重要依据。在空间分布上,这些异常均集中在震中 100km 范围内;从异常空间发展上,异常具有从外围向震中迁移的特征(图 1),从异常形态上,异常均表现为突升变化(图 5),即具有协调性特征。

#### (1) 舒城台水氦

舒城水化站观测井井深 75.15m,套管下至底部(0~4m 为第四系覆盖层,4m 以下为基岩)。观测含水层 18~30m,含水层岩性为石英正长岩,地下水类型为  $\text{SO}_4\text{-Ca}\cdot\text{Mg}$  型。构造上位于郟庐断裂带南段西侧,青山晓天断裂和梅山龙河口断裂之间,秦岭-大别断褶带东段的一个温泉出露区。该台水氦测项在效能评估中被评为 B 类,受外界干扰较小。

舒城水氦总体变化较为平稳,但在 2014 年 3 月 28 日水氦出现突升变化,水氦观测值由  $118\text{Bq/L}$  突升至  $165\text{Bq/L}$ ,幅度达 39.8%(超出 2 倍均方差),霍山地震后,水氦逐渐恢复(图 5(b))。在时间上,与庐江氢气异常变化较为同步(图 5(a)、5(b)),空间上相接近(图 1),构造上均位于郟庐断裂带南段西侧。

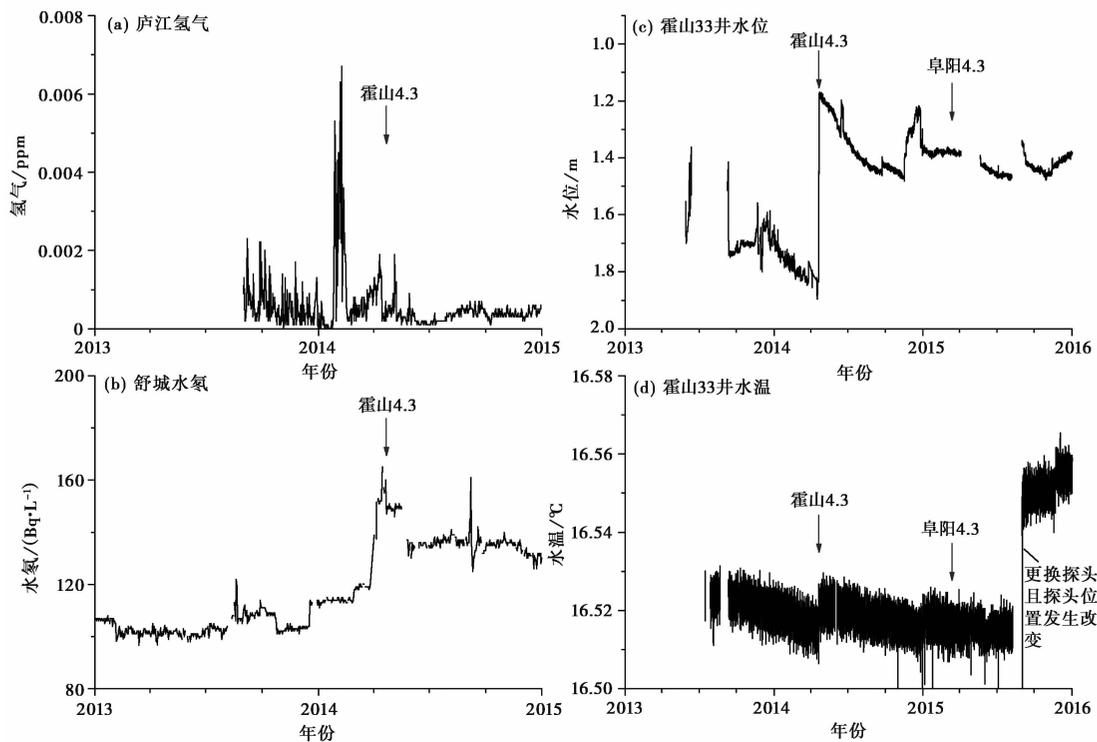


图 5 霍山地震前流体短临异常变化曲线

(2) 霍山皖 33 井水位与水温

霍山皖 33 井井深 230.91m,套管下至 58m 处(0~10m 为第四系覆盖层,10m 以下为基岩),观测含水层为 120~230.91m,含水层岩性为石英岩。构造上位于青山-晓天断裂近侧。周边无明显干扰,该井水位、水温测项在效能评估中均被评为 B 类。

霍山皖 33 井水位于 2014 年 4 月 20 日 15 时开始突升,至 16 时 00 分霍山地震发生时,幅度达到最大值,约 66.2cm,至 2014 年 4 月 23 日水位开始下降恢复(图 5(c));水温同步突升,变化幅度为 0.009°C(图 5(d))。在 2015 年安徽阜阳 M4.3 地震前,该井水位、水温也出现类似变化(图 5(c)、5(d))。

### 3 霍山地震前地下流体异常特征分析

#### 3.1 时间进程中的配套性和阶段性

在霍山地震孕育过程中,地下流体异常表现出中期趋势背景异常、短期及临震异常在时间进程中的配套性和阶段性特征。配套性表现为:中期阶段,距离震中较远的定远 04 井水位出现趋势上升变化,震前 1 年,距离震中最远的马鞍山 27 井水位先下降至低值后,出现转折上升变化,震前半年,安庆皖 23 井水位持续下降变化,震前 4 个月,巢湖 14 井、无为 24 井水温出现下降变化,震前 1 个月舒城水氦出现突升变化,进入临震阶段,震源区的霍山 33 井水位、水温同步突升变化,这种配套性特征是地震前地下流体前兆异常的主要特征之一(刘耀炜等,2000)。阶段性特征体现在:震前最先出现水位趋势上升异常变化,但仅有 1 项;震前

11 个月流体异常月频次逐渐增加,震前 5 个月,异常月频次再次增加,震前 3 个月,异常月频次快速增加,频次达到峰值,异常种类也明显增多;震前 1.5 个月,流体异常月频次开始转折下降,即进入临震阶段,部分异常结束,异常数量减少,最后发生霍山地震(图 6)。上述异常的时间进程反映了霍山地震的孕育过程主要受区域应力场的统一作用。因此,时间进程上的中、短、临前兆异常的配套性以及前兆异常月频次的加速、转折下降的阶段特征,对我们准确把握地震发生时间具有重要的参考价值(李琼等,2016;缪阿丽等,2017;王俊等,2018)。

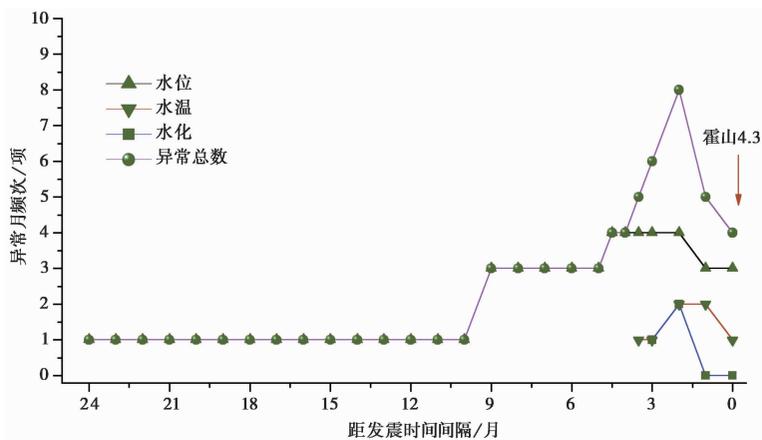


图 6 霍山地震前流体异常时间进程

### 3.2 空间演化过程中的迁移性和协调性

由流体前兆异常时空演化图(图 7)可知,霍山地震前流体异常分布于 0~250km 空间范围内,但主要集中于 0~200km。异常在空间分布上呈现一定的规律性特征,中期阶段,外围异常总体呈趋势上升变化;进入中短期阶段,水位、水温异常呈下降变化;进入短临阶段,各类异常表现为突升变化,并且这些异常不断向震中迁移、收缩(图 7),这种具有方向性的协调性异常演化特征,是前兆异常特别是地下流体异常在短临阶段判断震区的重要标志

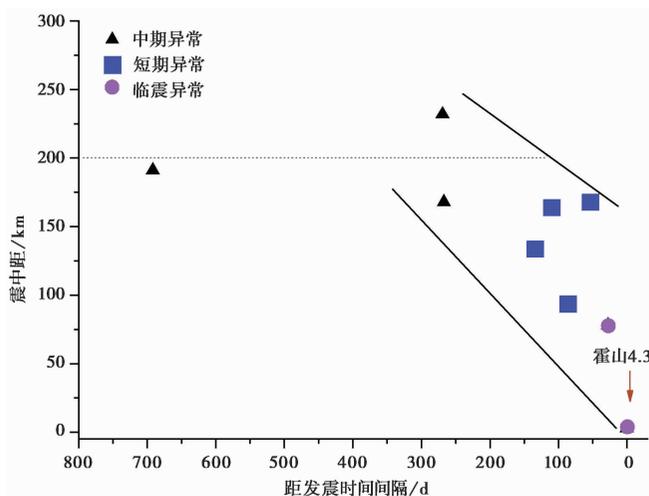


图 7 霍山地震前流体异常空间变化特征

之一(刘耀炜等,2000)。霍山地震前地下流体前兆异常在空间演化过程中的协调性变化,是流体异常向震中收缩的一种动态的过程(李宣瑚,1981;王俊等,2018)。值得指出的是,本次地震前出现的流体异常在空间上的分布方位与霍山地震的发震断层土地岭-落儿岭断裂(图8)的走向(NE向)一致(刘泽民等,2015;倪红玉等,2015b),这可能反映震前流体异常不仅受区域应力场作用影响,也受到构造的控制作用影响。在短临阶段,流体异常出现突变性(突升)变化,而突变性短期前兆异常生成的机理实际上是增加的构造力持续作用的结果(刘耀炜等,2004a)。

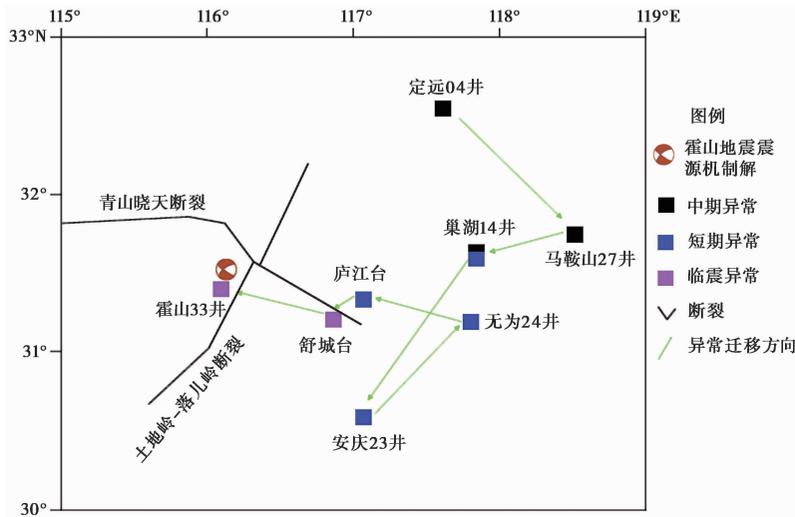


图8 霍山地震前流体异常空间迁移及震源机制解示意图

#### 4 地下流体异常成因及其机理探讨

(1)在中期趋势性背景阶段,地下流体异常均为水位异常且表现为趋势上升变化。在区域应力场的作用下,岩石的孔隙度和渗透系数均会发生变化,在相对挤压的环境下,孔隙度下降,孔隙水深入井孔含水层引起井水位上升变化,而在震中外围的群体性水位上升异常变化可能反映的是场兆信息,其趋势上升变化更多的是受区域应力场与区域地质构造的共同作用(刘耀炜等,1999)。

(2)在短临阶段,井水位由震中外围的上升向震中附近的下降转变,表明震中附近的围岩已处于相对拉伸状态,此时孔隙度增大,井孔含水层中的地下水向孔隙中渗透造成井水位下降;而短期水温则表现为下降变化,而氢气出现突升变化,这可能是由于井水中的气体释放(溢出)引起井水温的下降变化(鱼金子等,1997;陈大庆等,2007)。进入临震阶段,据Mjachkin等(1975)提出的裂隙串通(IPE)模型(图9)可知,进入Ⅲ阶段,为微裂隙串通阶段,在该阶段,在构造应力的持续作用下,微裂隙剧烈增加,小裂隙发育成较大的裂隙(图9),由于介质的不均匀性,大裂隙加速增大,发生不稳定变形,从而形成窄带区,在剪切应力作用下,窄带区大裂隙发育成若干小断裂;这些小断裂之间不断破裂,串通形成主断裂,为地球深部流体上涌提供了有益通道,为深部气体的释放提供了逸出通道,导致水位上升,水化学气体释放量增加,即进入临震阶段,震源区的流体异常则表现为霍山皖33井水位突

升、水温上升,庐江氢气、舒城水氦突升。上述异常变化现象与霍山地震后震源机制解结果是一致的(图 8),即该地区构造应力场最大主压应力轴的方位角为  $267^\circ$ ,倾角  $5^\circ$ ,最小主压应力轴的方位角为  $358^\circ$ ,倾角  $4^\circ$ ,发震构造为 NE 向的落儿岭-土儿岭断裂,该断裂发生了一次右旋张性地震(倪红玉等,2015b),这表明本次地震前地下流体异常的发展及其迁移性可能主要受控于区域构造应力场,是场兆信息的重要表征之一。

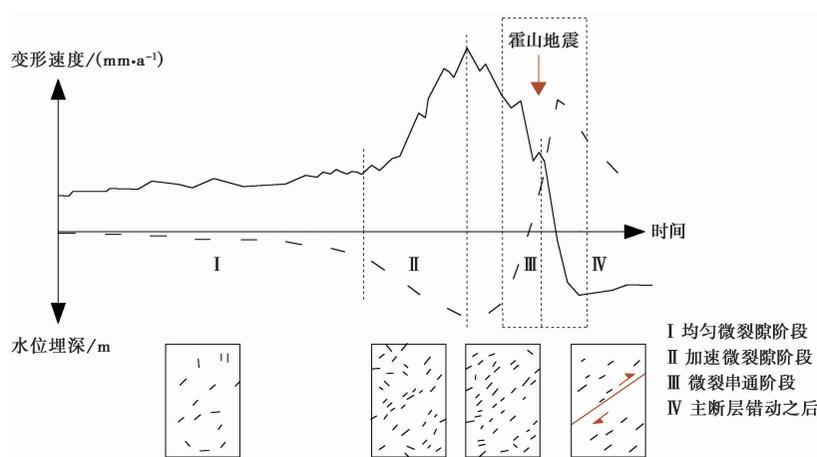


图 9 裂隙串通(IPE)模型(据 Mjachkin 等(1975)修改)

## 5 结论与讨论

### 5.1 结论

本文系统总结了 2014 年 4 月 20 日安徽霍山  $M_s4.3$  地震前出现的地下流体异常特征,并尝试对其形成机理进行分析,获得了以下结论:

(1)在时间进程上,流体异常分为中期背景性异常和短临异常,这些异常在时间上具有配套性和阶段性特征,中短期阶段,异常月频次缓慢增加,震前 3 个月,异常月频次快速增加,异常种类配套增多,进入临震阶段,部分异常结束,异常月频次转折下降。这种异常在时间进程上的配套性、阶段性特征有助于震情趋势判断。

(2)在空间分布上主要表现两方面的特征:一是迁移性特征,异常先出现在距震中 200km 处,随后向外围迁移,进入中短期阶段,再向震中方向迁移,在临震阶段,快速迁移、收缩到震源区,这种前兆场的迁移性特征可作为判别未来地震地点的一个指标;二是集中性特征,该地震前流体异常集中分布于 200km 范围内,表明靠近震源区附近的不同测项异常群体性、协调性特征明显,可能反映了霍山地震的孕育过程主要受区域构造应力场的统一作用。前兆异常的群体性、协调性变化状态有益于识区区域构造应力场的变化,高度关注应力集中区有助于预判未来发震地点(王维等,2016;王俊等,2018)。

### 5.2 讨论

(1)霍山地震前,水位、水温映震效果较好,震中附近的水氦、氢气异常突出,短临意义明显,但这种观测项目较少,特别是震源区西南侧没有流体观测项目,这给地点的准确判定带来了一定难度。因此,建议今后应在该地区合理布局观测点,增加科学、有效的观测手段,实

现多手段综合观测,以有效提升地震监测预报能力。

(2) 地下流体异常的配套性、迁移性、阶段性、加速性等特征为地震预测提供了有效指标,不断积累有观测资料的震例,对少震弱震地区中等地震的预测提供了预报实践。

## 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.
- 车用太,鱼金子,刘五洲,1999. 华北北部地区3次强震前地下流体异常场及其形成与演化机理. 中国地震,15(2):139~150.
- 车用太,鱼金子,张培仁,等,2002.  $H_2$  与  $He$  的映震灵敏性及其干扰初析. 地震,22(4):94~103.
- 车用太,刘成龙,鱼金子,等,2008. 汶川  $M_s 8.0$  地震的地下流体与宏观异常及地震预测问题的思考. 地震地质,30(4):828~838.
- 陈大庆,刘耀炜,杨选辉,等,2007. 远场大震的水位、水温同震响应及其机理研究. 地震地质,29(1):122~132.
- 范雪芳,黄春玲,刘国俊,等,2012. 山西夏县痕量氢观测资料的初步分析. 山西地震,(3):7~12.
- 付虹,刘丽芳,万登堡,2003. 滇川地下水异常时空转移特征研究. 地震,23(4):77~84.
- 国家地震局科技监测司,1995. 地震地下水手册. 北京:地震出版社,343~603.
- 黄辅琼,邓志辉,顾瑾平,等,2002. 张北地震地下流体异常场的研究. 地震,22(4):114~122.
- 蒋海昆,2014. 中国震例(2003-2006). 北京:地震出版社,4~5.
- 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. 地震研究,39(2):207~2012.
- 李宣瑚,1981. 水氢异常的扩散收缩现象. 地震,1(5):41~43.
- 林元武,翟盛华,范树全,等,1994. 华北隐伏活动断裂  $H_2$  异常特征及其异常机制研究. 地震地质,16(3):264~268.
- 刘耀炜,曹玲玲,平建军,2004b. 地下流体短期前兆典型特征分析. 中国地震,20(4):372~379.
- 刘耀炜,陈华静,车用太,等,2006. 我国地震地下流体观测研究40年发展与展望. 国际地震动态,(7):3~12.
- 刘耀炜,范世宏,曹玲玲,1999. 地下流体中短期异常与地震活动性指标. 地震,19(1):19~25.
- 刘耀炜,牛安福,卢军,2004a. 强震短期前兆异常特征物理分析和解释的研究进展. 地震,24(4):57~65.
- 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,2000. 强震地下流体前兆信息特征. 地震学报,22(1):102~107.
- 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. 地震研究,31(4):347~353.
- 刘泽民,黄显良,倪红玉,等,2015. 2014年4月20日霍山  $M_s 4.3$  地震发震构造研究. 地震学报,37(3):402~410.
- 缪阿丽,王俊,叶碧文,等,2017. 2011年安庆  $M_s 4.8$  地震前地下流体典型异常特征及机理研究. 地震,37(3):180~189.
- 倪红玉,洪德全,赵朋,2015a. 2014年霍山  $M_s 4.3$  地震发震断层参数测定. 国际地震动态,(9):113.
- 倪红玉,刘泽民,洪德全,等,2015b. 综合研究2014年霍山  $M_s 4.3$  地震序列的震源机制变化过程. 地震地质,37(4):1004~1019.
- 汪成民,1990. 中国地震地下水动态观测网. 北京:地震出版社,20~28.
- 王俊,缪阿丽,李军辉,等,2018. 2011年安徽安庆  $M 4.8$  地震前苏、皖典型前兆异常特征分析. 地震研究,41(4):568~576.
- 王维,叶碧文,沈红会,等,2016. 高邮-宝应  $M 4.9$  地震前周围水位的群体特征. 震灾防御技术,11(4):791~799.
- 晏锐,官致俊,刘耀炜,2015. 川西温泉水温观测及其在芦山  $M_s 7.0$  地震前的异常现象. 地震学报,37(2):347~356.
- 鱼金子,车用太,刘五洲,1997. 井水温度微动态形成的水动力学机制研究. 地震,17(4):389~396.
- 张培仁,王基华,孙凤民,1993. 氢-预报地震的灵敏元素. 地震地质,15(1):69~77.
- 周安聘,张环曦,董博,等,2017. 地震前地下流体前兆异常特征的研究. 高原地震,29(2):30~34,47.
- Mjachkin V I, Brace W F, Sobolev G A, et al, 1975. Two models for earthquake forerunners. Pure Appl Geophys, 113(1):169~181.
- Montgomery D R, Manga M, 2003. Streamflow and water well responses to earthquakes. Science, 300(5628):2047~2049.
- Wang C Y, Manga M, 2010. Earthquakes and Water. Berlin Heidelberg:Springer.

## Analysis of Typical Anomalies Observed from Underground Fluid before 2014 Huoshan $M_s4.3$ Earthquake

*Wang Jun*<sup>1,2)</sup> *Huang Xianliang*<sup>1)</sup> *Liu Chaojun*<sup>3)</sup> *Li Junhui*<sup>1)</sup> *He Kang*<sup>1)</sup>  
*Zheng Haigang*<sup>1)</sup> *Wang Xueying*<sup>1)</sup> *Yang Yuanyuan*<sup>1)</sup>

1) Anhui Earthquake Agency, Hefei 230031, China

2) Dabie Mountain Earthquake Monitoring and Prediction Laboratory, Liuan 237000, Anhui, China

3) Huangshan Seismic Station, Huangshan 245001, Anhui, China

**Abstract** After reviewing all precursory anomalies from observation of underground fluid before 2014 Huoshan  $M_s4.3$  earthquake we summarized the general characteristics of these anomalies in temporal and space. The results indicate that the overall precursory anomalies are characterized by compatibility. Temporally, the number of abnormal factors began to increase in about eleven months before earthquake, and the growth rate of the number of abnormal factors speeded up in about three months before earthquake. In the impending stage in about 1.5 months before earthquake, however, some anomalies disappeared, and some abnormal intensity decreased. Spatially, the anomalies mainly concentrated in a distances about 200km from the epicenter. Particularly, the fluid anomalies mainly showed a sudden rise near the epicentral region but a gentle rising in distal region. Moreover, the precursor anomaly varies with different observation methods. The effect of fluid temperature, geochemistry such as radon and hydrogen is significant in corresponding to the occurrence of earthquake.

**Keywords:** Huoshan  $M_s4.3$  earthquake; Fluid anomaly; Migration; Acceleration