

缪阿丽、叶碧文、张艺等,2018,苏皖地区2次中强地震前地下流体异常及其形成机理分析,中国地震,34(2),350~363.

# 苏皖地区2次中强地震前 地下流体异常及其形成机理分析

缪阿丽<sup>1)</sup> 叶碧文<sup>1)</sup> 张艺<sup>1)</sup> 瞿旻<sup>1)</sup> 高力<sup>2)</sup>

1)江苏省地震局,南京市卫岗3号 210014

2)徐州地震台,江苏徐州 221008

**摘要** 归纳总结了安庆  $M_s4.8$  地震、高邮-宝应  $M_s4.9$  地震前出现的地下流体异常,并对其形成机理作了初步讨论。结果显示,这2次地震前地下流体异常特征比较相似。在时间进程上,都表现出中期趋势背景异常与短临异常的配套性特征。在空间分布上,中期趋势背景阶段,水位异常均表现为震中附近流体井水位呈趋势性转折上升,而震中外围流体井水位呈趋势性转折下降的特点。且转折上升的流体井在空间上的分布方位与地震的发震断层走向一致。在短临阶段,异常均表现为先向外迁移继而向震中靠拢的特点。水位在空间上的规律性分布可能受区域应力场作用以及区域构造格局所控制。

**关键词:** 安庆  $M_s4.8$  地震 高邮-宝应  $M_s4.9$  地震 地下流体 异常典型特征 前兆机理  
[文章编号] 1001-4683(2018)02-0350-14 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

## 0 引言

地下流体异常对地震孕震区及其外围区域介质的变化有较为灵敏的响应,与区域构造活动关系也较为密切(车用太等,1997;刘耀炜等,1999;Montgomery et al,2003)。据统计,中国历史地震资料中所记载的地震前后的异常现象中,与地下流体有关的现象约占50%以上(汪成民,1990)。它也被作为一种可靠的地震前兆,得到国内外学者的普遍认可(张炜等,1988;Wang et al,2010)。研究可能与地震有关的地下流体异常现象,对于积累震例、提高地震预测水平有重要的意义。

事实上,已有很多学者对大震前的地下流体异常特征作过很多分析研究(汪成民等,1990;万迪堃等,1993;刘耀炜等,1998、2000、2008、2015;车用太等,1999a、1999b、2008;黄辅琼等,2002;付虹等,2003;焦青等,2007)。研究结果均表明,某些强震前会出现地下流体群体性异常变化,这些异常特征主要表现在出现时间上的阶段性和空间分布上的群体性,即异常按时间进程可分为中期趋势性异常、短期异常和临震异常,有些还有长期趋势性背景异常。在空间分布和演化上,有些地震前的地下流体异常具有规律性,有的主要沿活动断裂带

[收稿日期] 2017-04-11; [修订日期] 2017-06-15

[项目类别] 中国地震局震情跟踪面上课题(2018020303)、中国地震局地质研究所地震动力学国家重点实验室开放基金课题(LED2013B04)共同资助

[作者简介] 缪阿丽,女,1984年生,副研究员,主要从事地震前兆流体和地震预报等研究。E-mail:miaoali330@126.com

有序分布。譬如,1989 年 10 月 19 日大同-阳高  $M_s$ 6.1、1996 年 5 月 3 日包头西  $M_s$ 6.4、1998 年 1 月 10 日张北-尚义  $M_s$ 6.2 地震前,地下流体异常出现了沿构造带呈带状分布的特点(车用太等,1999a、1999b;黄辅琼等,2002)。有的在中短期或短临阶段,异常围绕着震源区出现聚集或扩散现象。譬如 1976 年 7 月 28 日唐山  $M_s$ 7.8、1990 年 4 月 26 日共和  $M_s$ 7.0、1996 年 2 月 3 日丽江  $M_s$ 7.0、2007 年 6 月 3 日宁洱  $M_s$ 6.4、2014 年 8 月 3 日鲁甸  $M_s$ 6.5 地震的孕震过程中,异常的这种特征比较明显(李宣瑚,1981;刘耀炜等,1998、2008;付虹等,2003)。为了揭示地震孕育过程,进而对潜在震源区及发震时间给予较准确的预测,在总结分析大震前出现的地下流体群体性异常特征的同时,异常的形成和发展成因也受到关注。早期,学者们认为地震前兆异常主要来自震源体的活动,前兆场的演化受震源体发展过程的控制(郭增建等,1979)。近些年来,随着研究的深入,在总结分析大震前地下流体异常总体特征的基础上学者们认为,地震前兆异常受区域构造活动和震源体的共同影响(陆明勇,2010;车用太等,1999a、1999b;刘耀炜等,2015)。

前人的工作得到了很好的结果,留下了宝贵的资料。但地震前兆机理仍有进一步深入研究的空间。例如,学者们在总结分析时均提出了地震地下流体前兆异常受区域构造活动的影响。区域构造活动为什么会引起前兆异常如此反应?如沿着构造带分布、在中短期或短期阶段在震源区聚集。水温多数在中期阶段表现为上升变化,而在短临阶段表现为下降变化(刘耀炜等,2008;徐桂明等,2010;缪阿丽等,2014),引起水温如此变化的原因是什么?这些问题都有待探究。本文分析了苏皖地区 20 多年来发生的 2 次中强地震,即 2011 年 1 月 19 日安庆  $M_s$ 4.8 地震(以下简称安庆地震)和 2012 年 7 月 20 日高邮-宝应  $M_s$ 4.9 地震(以下简称高邮-宝应地震)前地下流体的群体性异常特征,并对异常形成机理进行初步讨论。

## 1 苏皖地区 2 次中强地震前地下流体典型异常特征

本文按照《中国震例》(2003~2006)(蒋海昆等,2014)中的划分标准对安庆地震和高邮-宝应地震前的异常进行了归类,即出现在地震前 5 年以上的趋势性异常变化称为长期趋势性背景异常,出现在震前 0.5~5.0 年的趋势性异常变化称为中期趋势性背景异常,出现在震前 1~6 个月内的异常为短期异常,出现在震前 1 个月左右的异常称为临震异常。安庆地震和高邮-宝应地震前异常的基本概况见表 1,2 个地震前的异常台站空间分布见图 1。由表 1、图 1 可知,安庆地震和高邮-宝应地震前,地下流体异常在时间进程上和空间分布上均表现出类似的特征。在时间进程上均可分为中期趋势性背景异常、短期异常和临震异常。在空间分布上,中期趋势性背景异常广泛分布;短临异常向震中收缩。

水位异常可能会受人为活动的影响,因此,对水位数据进行了筛选。选取水位资料时遵循以下原则:①无人干扰(仪器变更、台站改造、井口装置改变、无规律抽水、渠道放水与停水等)引起的台阶变化或对台阶状变化因素比较清楚,能进行矫正,以及无其他变化;②具有明显的年动态变化;③无因长期抽水引起的趋势性变化或因受降雨影响的趋势性变化。按以上原则对数据进行筛选后,苏皖地区符合要求的有 12 口井。本文对这 12 口井水位数据进行了分析,数据类型为日均值,观测井基本特征见表 2。

### 1.1 安庆地震前地下流体典型异常特征

缪阿丽等(2017)曾分析过安庆地震前地下流体典型异常特征。结果表明,在安庆地震

表 1 苏皖 2 次中等地震前地下流体异常基本特征

安庆地震						高邮-宝应地震									
台站名称	测项	异常开始时间 (年-月)	异常结束时间 (年-月)	异常形态	异常幅度	异常信度	异常类型	台站名称	测项	异常开始时间 (年-月)	异常结束时间 (年-月)	异常形态	异常幅度	异常信度	异常类型
宿迁 05 井	水位	2010-01	2012-01	趋势性 转折下降	—	A	中期趋势性 背景异常	宿迁 05 井	水位	2010-01	—	趋势 转折下降	—	A	中期趋势 背景异常
兴化 08 井	水位	2009-08	2011-01	趋势性 转折下降	—	A	中期趋势性 背景异常	金湖 06 井	水位	2010-06	2013-12	趋势 转折下降	—	A	中期趋势 背景异常
苏 12 井	水位	2009-01	2012-07	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常	苏 08 井	水位	2011-01	2012-7	趋势 转折上升	—	A	中期趋势 背景异常
丹徒 18 井	水位	2009-01	2011-12	趋势性 转折上升	—	A	中期趋势性 背景异常	苏 10 井	水位	2010-01	2012-12	趋势 转折下降	—	B	中期趋势 背景异常
溧阳 22 井	水位	2010-03	2013-05	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常	江浦	水位	2011-09	2013-12	趋势 转折下降	—	B	中期趋势 背景异常
江浦台	流量	2009-08	2011-09	趋势性 转折上升	—	B	中期趋势性 背景异常	苏 18 井	水位	2009-01	2011-12	趋势 转折上升	—	A	中期趋势 背景异常
苏 10 井	水位	2010-01	2013-06	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常	苏 19 井	水位	2012-04	2012-04	趋势 转折下降	—	B	中期趋势 背景异常
武进 19 井	水位	2010-04	2012-04	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常	苏 12 井	水位	2009-01	2012-07	趋势 转折下降	—	B	中期趋势 背景异常
定远 04 井	水位	2008-07	2013-07	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常	定远 04 井	水位	2008-07	2013-07	趋势 转折下降	—	B	中期趋势 背景异常

续表 1

安庆地震				高邮-宝应地震											
站名	测项	异常开始时间 (年-月)	异常结束时间 (年-月)	异常形态	异常幅度	异常信度	异常类型	站名	测项	异常开始时间 (年-月)	异常结束时间 (年-月)	异常形态	异常幅度	异常信度	异常类型
五河 11 井	水位	2009-01	2012-01	趋势性 转折下降	—	A	中期趋势性 背景异常	苏 22 井	水位	2012-03	2013-05	趋势性 转折下降	—	B	中期趋势性 背景异常
泾县台	水位	2010-01	2011-05	趋势性 转折上升	—	B	中期趋势性 背景异常	泾县	水位	2011-05	2013-05	趋势性 转折上升	—	B	中期趋势性 背景异常
巢湖 14 井	水温	2010-03	2011-06	趋势性 转折上升	0.046℃	B	中期趋势性 背景异常	苏 15 井	水温	2012-01-01	2012-08-05	下降	0.085℃	B	中期趋势性 背景异常
无为 24 井	水温	2010-02	2011-07	加速上升	0.299	B	中期趋势性 背景异常	无为 24 井	水温	2011-10-02	2013-02-25	加速上升	0.312℃	B	中期趋势性 背景异常
马鞍山 27 井	水位	2010-10	2011-07	下降	1.679m	B	短期异常	盐纺	水化	2012-04-02	2012-10-22	上升	2.027、 0.62mg/L	B	短期异常
安庆 23 井	水位	2010-10	2012-12	破年变	—	B	短期异常	马鞍山 27 井	水位	2012-04-06	2013-03-06	下降	1.073m	B	短期异常
五河女山	水位	2010-11	2011-08	下降	1.134m	A	短期异常	苏 22 井	水温	2012-05-11	2013-02-05	下降	0.005℃	B	短期异常
宿迁 05 井	水温	2010-11	2011-01	下降	0.001℃	A	短期异常	苏 05 井	水温	2012-06-20	2012-11-10	下降	0.001℃	A	临震异常
霍山 33 井	水位	2010-12	2010-12	下降	0.065m	B	临震异常	苏 06 井	水温	2012-07-02	2012-11-05	下降	0.002℃	A	临震异常

注：异常信度为 2013 年地下流体学科预报效能评估结果。A 类：资料可靠，震例较多；B 类：资料可靠，震例较少

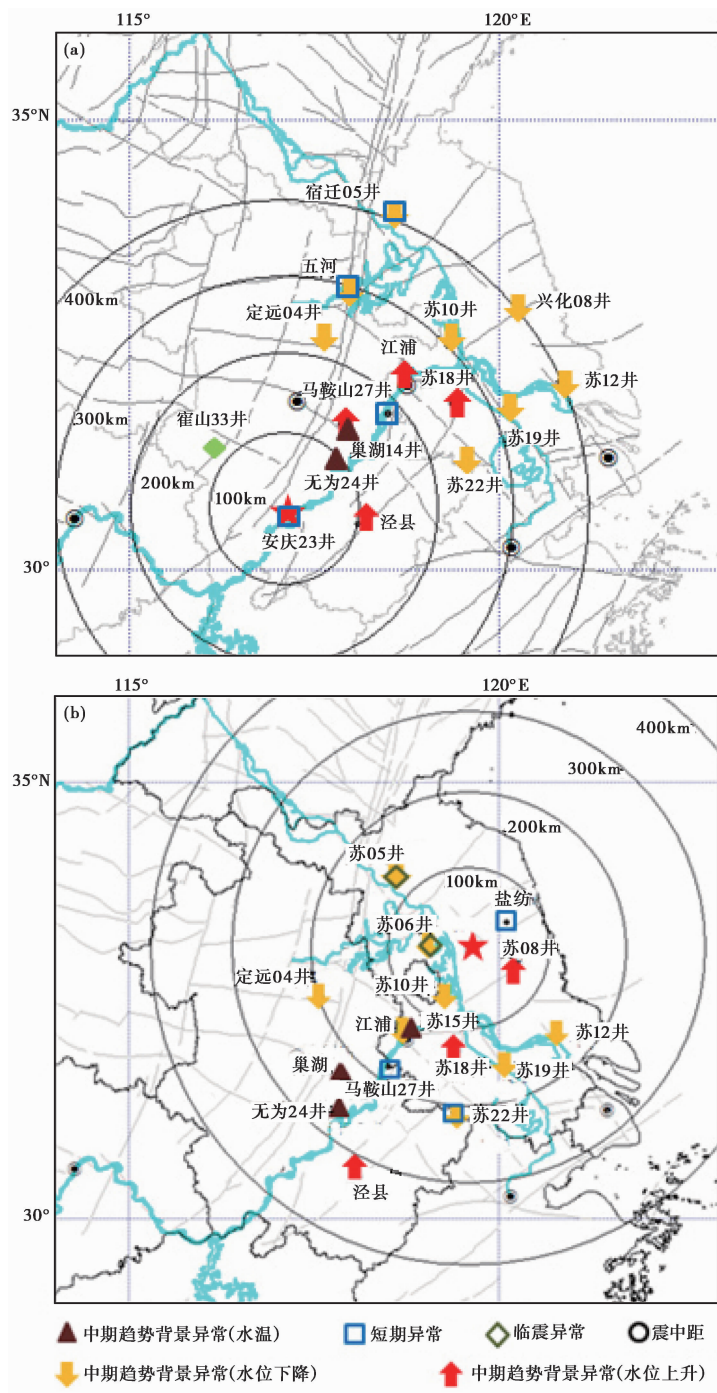


图 1 安庆地震(a)和高邮-宝应地震(b)前异常空间分布

孕育过程中,地下流体前兆异常表现出中期趋势性背景异常与短临异常的配套性特征。

在中期趋势性背景异常阶段,主要有流体井水位异常和水温异常。其中,水位异常表现为趋势性转折变化,且异常分布较广,在距震中 100~400km 范围内均有分布。且异常在空

间分布上具有一定规律性,即以安庆地震震中为中心,外围流体井:安徽的五河 11 井和定远 04 井,江苏的苏 05 井、苏 08 井、苏 12 井、苏 10 井、苏 19 井、苏 22 井等水位表现为趋势性转折下降,而靠近震中的流体井:江苏的江浦井、苏 18 井,安徽的巢湖 14 井、泾县井等水位表现为趋势性转折上升(图 1(a)、表 2)。一个有趣的现象是,出现趋势性转折上升的流体井在空间上的分布方向与安庆地震的发震断层宿松-枞阳断裂的走向(谢祖军等,2012)一致,都是 NE 方向。

表 2 观测井基本特征

观测井	观测层岩性	井深 /m	套管深度 /m	水温传感器深度/m	构造部位
宿迁苏 05 井	细砂岩	930.0	930	200	郟庐断裂带东侧、沐阳凹陷内
金湖苏 06 井	灰岩	2364.5	2008.5	400	金湖凹陷刘庄构造兴隆极高点
兴化苏 08 井	白云岩、灰岩	2680.4	2228	400	溱潼凹陷戴窑构造
苏 10 井	粉砂质粘土	2887.03	1339.88	200	溱潼凹陷南部、泰州-溱潼断裂北侧
丹徒苏 18 井	灰岩	366.8	75.1	180	宁镇反射弧茅山脊柱北端、茅山断裂带茅东断裂西侧
苏 19 井	灰岩	1666.6	415	200	江阴复背斜西南端
苏 12 井	闪长岩	689.75	313.3	200	EW 向南通断裂与 NNE 向断裂的交叉部位
盐纺	亚粘土	826.4	620.99	—	南黄海-苏北凹陷内 NE 向断裂上盘
苏 22 井	大理岩	243.8	26	200	宜溧山区 EW 向背斜轴部附近
无为皖 24 井	灰岩	3200	2900	190	下扬子断块区、无为-和县断裂带东南端点
定远皖 04 井	石膏盐层	683.48	10	—	郟庐断裂带西侧与 NW 向断裂交汇处
马鞍山皖 27 井	闪长玢岩	450	35	200	宁芜断陷盆地西侧、铜井-芜湖 NE 向断裂带
巢湖皖 14 井	石英岩	331	331	195	郟庐断裂带东侧、滁河断裂和桥头集-东关断裂交汇处

在中期趋势背景阶段,水温异常有 2 个,分别为距震中 100km 的无为 24 井水温和距震中 140km 的巢湖 14 井水温。这 2 口井水温先后出现快速上升异常变化,异常的起始时间具有从震中向外迁移的特点。另外,这 2 个异常分别在震前 5 个月、1 个月的短临阶段出现转折回落恢复,地震即发生在异常转折下降恢复过程中(图 1(a)、表 1)。

在短临阶段,异常在空间跨度上分布较广,在距震中 383km 范围内都有分布,这些异常分别为安庆 23 井水位、马鞍山 27 井水位、五河女山井水位、宿迁 05 井水温以及霍山 33 井水位。在空间上,这些异常分布虽然较广,但均集中在郟庐断裂带附近,且有沿郟庐断裂带先向远离震中的方向迁移,在临震阶段再向震中靠拢的特点(图 1(a)、表 1)。以上的异常过程表明,安庆地震的孕育过程主要受区域应力场统一作用的影响,因此,在时间进程上出现了中期趋势性背景异常与短临异常的配套过程(刘耀炜等,2008)。这种配套性对于我们较为准确地把握震情变化有着重要的参考价值。

1.2 高邮-宝应地震前地下流体典型异常特征

高邮-宝应地震前,地下流体异常在时间进程上也可分为中期趋势性背景异常、短期异常和临震异常的配套性特征。

在中期趋势背景阶段,异常包括水位异常和水温异常。其中,水位异常主要表现为水位的长期趋势性形态发生转折变化(图 2),异常在空间上呈规律性分布(图 1(b))。以高邮-

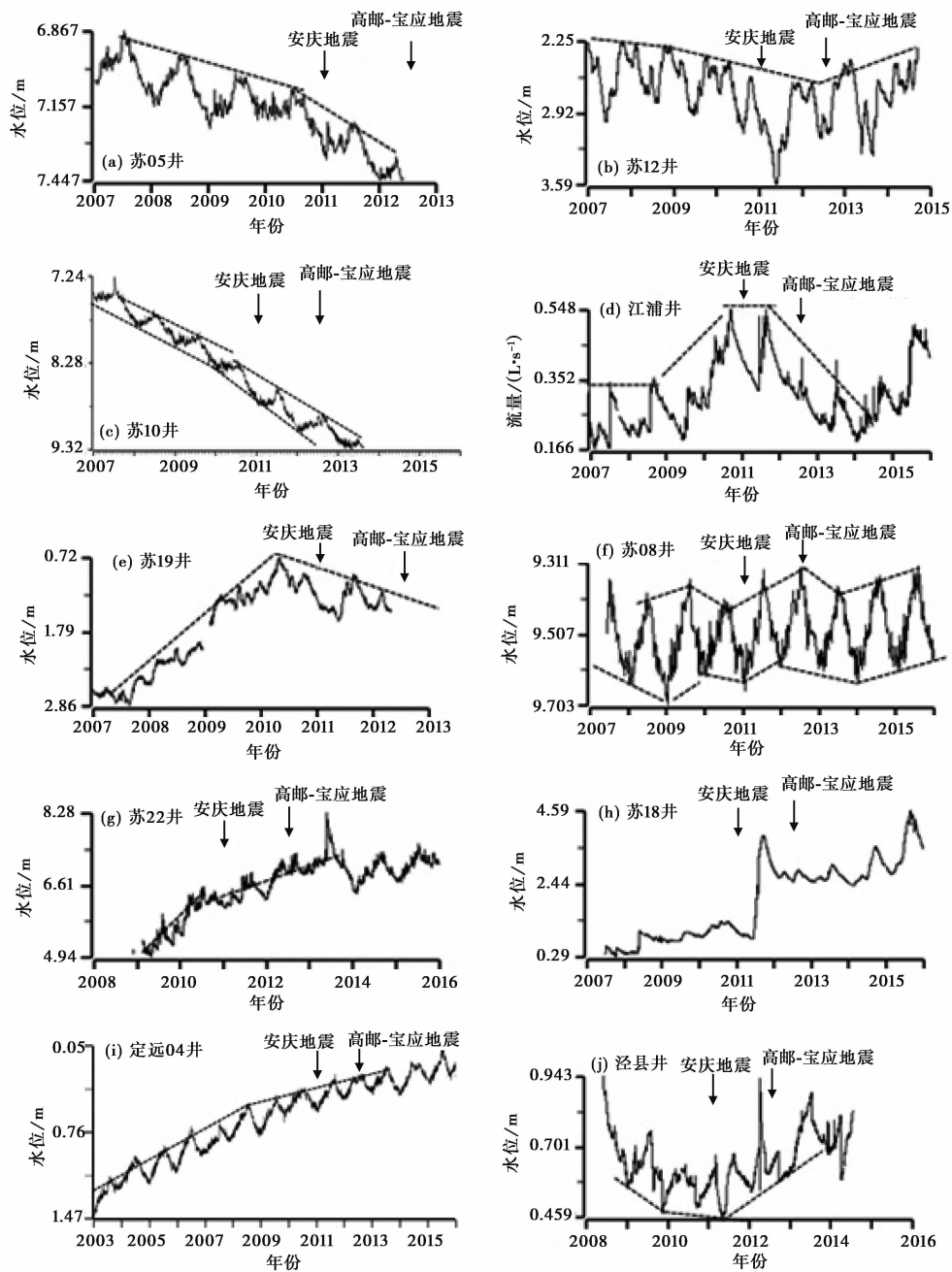


图2 苏皖地区部分流体井趋势性变化

宝应地震震中为中心,外围流体井:安徽境内的定远04井,江苏境内的苏05井、苏06井、江浦流量、苏10井、苏22井、苏19井和苏12井等表现为趋势性转折下降,而震中附近的流体井如江苏境内的苏08井、苏18井则表现为趋势性转折上升。泾县井虽然不靠近震中,但与苏18井处在同一断裂带上。流体井整体表现为震中外围井呈趋势性转折下降变化,震中附近井呈趋势性转折上升变化,且趋势性转折上升的流体井在空间上的分布方向与高邮-宝应

地震的断层走向(刘建达等,2012;康清清等,2015)一致。

在中期趋势背景阶段,水温异常的井有 3 个,分别为南京苏 15 井、无为 24 井和巢湖 14 井。巢湖 14 井距震中 230km,井深 331m,观测段为 270~301m,观测含水层岩性为泥盆系石英岩,地下水类型为孔隙裂隙承压水,构造部位为郟庐断裂带东侧、滁河断裂与桥头集-东关断裂交汇处。巢湖 14 井水温在长期趋势上表现为趋势性上升,上升速率为  $0.0096^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,2011 年 9 月 7 日出现快速上升,速率为  $0.2964^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,是正常速率的几十倍,到 2012 年 1 月 17 日达到最大值,最大上升幅度为  $0.052^{\circ}\text{C}$ ,之后稍有回落,高邮-宝应地震即发生在水温缓慢回落过程中(图 3(a))。无为 24 井距震中 290km,井深 3200m,观测层为第四系、石炭系、泥盆系含水层,地处下扬子断块区,地表为第四系覆盖,受降雨干扰小,该井水温正常情况下以  $0.3444^{\circ}\text{C}/\text{a}$  的速度呈上升趋势变化。2011 年 10 月 2 日无为 24 井水温上升速率加快,为  $0.5724^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,2012 年 6 月 6 日达到最高值,升温最大幅度达  $0.312^{\circ}\text{C}$ ,之后缓慢回落,地震即发生在水温缓慢回落过程中(图 3(b))。苏 15 井距震中 140km,水温长期变化较稳定,下降速率为  $0.006^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,2012 年 1 月 1 日出现加速下降,下降速率为  $0.1488^{\circ}\text{C}/\text{a}$ ,下降幅度  $0.085^{\circ}\text{C}$ 。地震即发生在下降转平阶段。中期异常具有先从震中向外迁移、再向震中靠拢的特点(图 1(b)、表 1)。

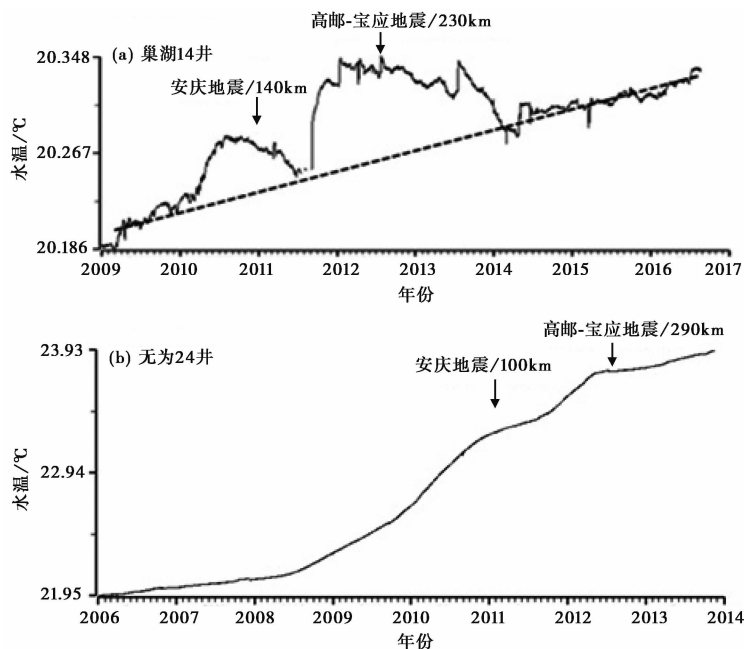


图 3 安庆地震前地下流体中期异常  
140、230、100、290km 分别为震中距

在短期阶段,异常有盐纺井离子(钙离子、氯离子)、马鞍山 27 井水位和溧阳苏 22 井水温等。盐纺井距震中 60km,观测站周围为第四系覆盖层,隐伏断裂有盐城-南洋岸断裂和洪泽-沟墩断裂。正常情况下盐纺井氯离子、钙离子浓度分别以  $0.26、0.07(\text{mg} \cdot \text{L}^{-1})/\text{a}$  的速度缓慢上升,2012 年 4 月 2 日盐纺井氯离子、钙离子浓度出现同步突升,上升速率分别为



36.00、3.48( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )/a,最大上升幅度分别为 2.027、0.620 $\text{mg}/\text{L}$ 。高邮-宝应地震即发生在离子浓度高值时(图 4(a))。马鞍山 27 井距震中 180km,观测站位于宁芜断陷盆地西侧、铜井-芜湖 NE 向断裂带上的枞阳-宿松断裂近侧,地下水类型为裂隙承压水。马鞍山 27 井水位在长期趋势上缓慢上升,上升速率为 0.054 $\text{m}/\text{a}$ 。2012 年 4 月 6 日马鞍山 27 井水位出现突降,下降速率为 7.494 $\text{m}/\text{a}$ ,最大降幅 1.073 $\text{m}$ ,地震即发生在水位下降过程中(图 4(b))。溧阳苏 22 井距震中 210km,观测站位于茅山断裂带宜溧山区 EW 向背斜轴部、2 条次级断裂交汇处。苏 22 井水温有很好的映震能力,当水温下降幅度 $\geq 0.005^{\circ}\text{C}$ 时,异常与周围中地震间有很好的对应关系,如 2009 年 4 月 6 日安徽肥东  $M_s 3.5$  地震、2010 年 7 月 19 日黄海  $M_s 4.6$  地震、2011 年 6 月 17 日安徽桐城  $M_s 3.6$  地震以及 2011 年 9 月 10 日江西瑞昌  $M_s 4.5$  地震前均有反映(缪阿丽等,2014)。2012 年 5 月 11 日溧阳苏 22 井水温再次出现下降变化,最大降幅 0.005 $^{\circ}\text{C}$ (图 4(c)),之后发生高邮-宝应地震。在短期阶段,异常表现为从震中向外迁移的特点(图 1(b))。

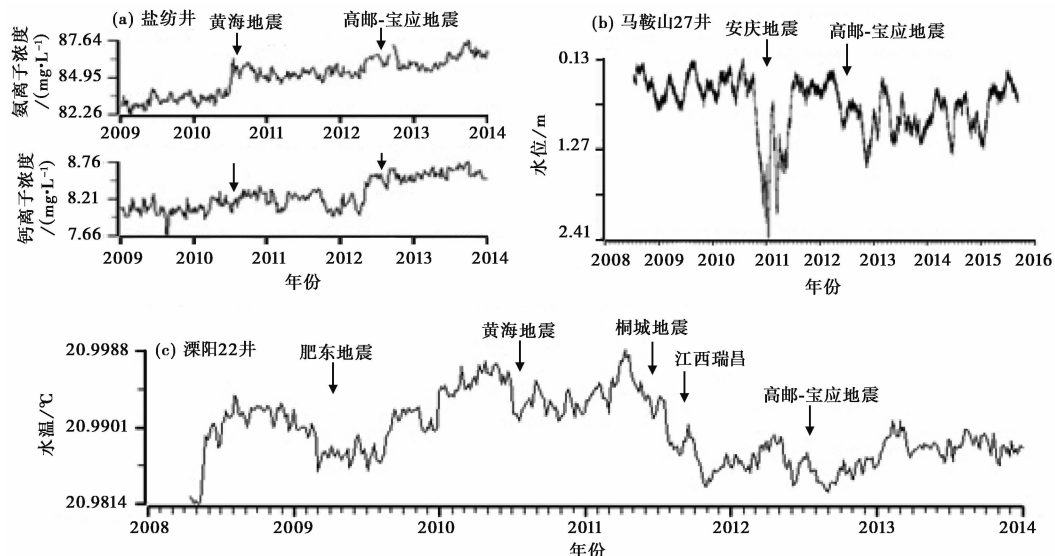


图 4 高邮-宝应地震前短期异常

在临震阶段,异常主要为苏 05 井、苏 06 井的水温异常。苏 05 井、苏 06 井水温均具有较好的映震能力,在江苏地区地震的短期、短临预测方面发挥了较好的作用(徐桂明等,2010)。苏 05 井距震中 130km,位于郟庐断裂带东侧沭阳凹陷内。观测井深 976m,观测层埋深 827~862m,系白垩纪赤山组细沙岩,其上有厚层泥岩,含水层具有一定封闭性,不受表层水干扰。苏 05 井水温长期趋势性上升,2012 年 6 月 20 日苏 05 井水温在趋势性上升的背景下出现下降,下降幅度为 0.001 $^{\circ}\text{C}$ 。高邮-宝应地震即在水温下降到最低值时发生(图 5(a))。苏 06 井距震中 50km,台站基底由中元古界张八岭群组成,岩性主要为灰黑、灰绿色条带状粉砂质千枚岩。该井水温在长趋势上处于上升变化,2012 年 7 月 2 日井水温出现下降,下降幅度为 0.002 $^{\circ}\text{C}$ (图 5(b))。高邮-宝应地震即发生在水温低值时。从异常起始时间来看,临震阶段异常有向震中迁移的特点(图 1(b))。

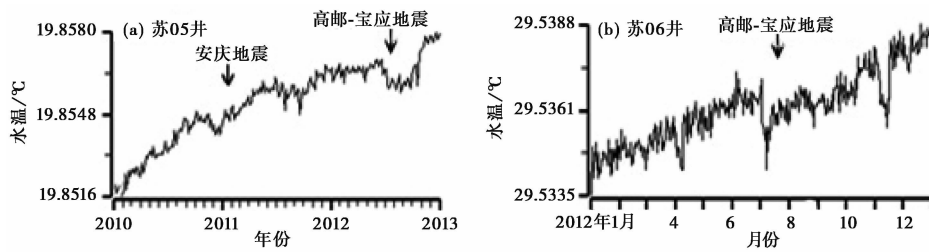


图 5 高邮-宝应地震前临震异常

## 2 群体异常特征分析

### 2.1 时间进程中的配套性

在安庆地震和高邮-宝应地震孕育过程中,地下流体前兆异常表现出相似的特点。在时间进程上均表现出中期趋势性背景异常和短临异常的配套性特征,这种时间进程上的配套性是地下流体强地震前兆的主要特征之一(刘耀炜等,2000、2008)。本文结果表明,这种时间进程上的配套性不仅是强震前的主要特征,在中等地震前也能观察到。

在中期趋势性背景阶段,2次地震前地下流体异常可分为水位异常和水温异常。其中,水位异常表现为趋势性转折变化,且在空间分布上呈一定规律性,即震中外围流体井水位表现为趋势性转折下降,震中附近的表现趋势性转折上升。而水温也先后出现快速上升变化,异常的起始时间具有从震中向外迁移的特点。另外,水温异常在进入短临阶段出现转折回落恢复,地震即发生在异常转折恢复过程中。在短临阶段,从起始时间看,异常具有从震中向外围扩展继而向震中靠拢的特点。以上的异常过程表明,安庆地震和高邮-宝应地震的孕育过程主要受区域应力场统一作用,因此,在时间进程上出现了中期、短临前兆的配套过程(刘耀炜等,2008)。这种时间进程中的配套性对于较为准确地把握震情发展有重要的参考价值。

### 2.2 空间演化过程的协调性

安庆地震和高邮-宝应地震前出现的中期、短临异常在空间动态演化过程中表现出了很明显的规律性。在中期趋势性背景阶段出现了水位、水温2种异常。其中,水位异常分布较广,在距震中100~400km范围内均有分布,且在空间分布上具有一定规律性,即震中外围流体井水位表现为趋势性转折下降,而靠近震中的流体井表现为趋势性转折上升。另外,出现趋势性转折上升的流体井在空间上的分布方位与2次地震发震断层的走向一致(谢祖军等,2012;刘建达等,2012;康清清等,2015)。这可能说明水位的这种中期趋势性异常虽受区域应力作用的影响,但也受构造格局的控制。而水温异常有从震中向外迁移的特点,虽然高邮-宝应地震前,水温异常先从震中向外迁移继而向震中靠拢,但这与在短期阶段,异常向震中附近靠拢的趋势相承接。与中期趋势性背景异常相比,短临异常在空间上向震中附近靠拢,在异常起始时间上,短临异常有先向远离震中方向迁移,在临震阶段向震中回迁的特点。

## 3 地下流体异常形成演化机理讨论

(1)在中期趋势性背景阶段,水位异常在空间上表现为震中附近流体井水位呈趋势性转折上升,而震中外围的呈趋势性转折下降的特点。另外,2次地震前转折上升的流体井在空

间上的分布方位主要为 NE 向,与 2 次地震的发震断层走向一致(谢祖军等,2012;刘建达等,2012;康清清等,2015)。地下水前兆的主要模式有扩容-扩散(DD)模式(Scholz 等,1973)与裂隙串通(IPE)模式(米雅奇金,1983),这 2 种模式都强调了震源区及其附近的岩体在震前的破裂活动,水位异常在微破裂发生时表现为下降,在裂隙扩容或串通阶段表现为大幅上升。根据如下郭增建等(1979)提出的地震断层破裂长度  $L$  的统计公式,可计算出安庆地震和高邮-宝应地震时断层的大致破裂长度

$$\lg L = \frac{M - 2.56}{2.97} \quad (1)$$

其中,  $M$  为震级。通过式(1)可以得到安庆地震和高邮-宝应地震的断层破裂长度分别为 5.7、6.1km,而安庆地震和高邮-宝应地震前的水位群体变化中距震中最近的流体井的震中距也远大于这个尺度。因此,以上 2 种模式都不适合解释安庆地震和高邮-宝应地震前水位的群体变化,即这 2 个地震前水位的群体变化反映的是场兆信息,而非源兆信息。井水位的上升、下降异常变化除了与裂隙的破裂有关外,还受到周围应力场活动的影响。在区域应力场作用下,岩石的孔隙度和渗透系数都会发生变化。在相对挤压的环境中,孔隙度下降,孔隙水渗透进井孔造成水位上升;同样,水位下降则反映了周围岩石的相对拉张变化。因此认为,水位在形态上表现出的震中外围流体井趋势性转折下降,震中附近流体井趋势性转折上升的变化特征以及在空间分布上表现出的与发震断层走向一致的特点,说明流体井的趋势变化更多是受区域应力场作用以及区域构造格局所控制。

(2)在中期趋势性背景阶段,水温异常在形态上表现为先快速上升变化,在进入短临阶段时出现缓慢回落的特点。关于影响井水温变化的机理,有学者在研究水温的同震响应现象时提出振荡时水受扰动导致不同深度、不同温度水的混合而引起水温变化的弥散模型(石耀霖等,2007),以及由于井水中的气体释放引起水温同震突降的气体溢出说(鱼金子等,1997;陈大庆等,2007),这些模型能解释水温同震下降现象,但无法解释中期阶段水温上升到回落的整个过程。据监测志记载,巢湖 14 井井深 331m,套管深度 331m,水温探头放置在深 195m 处,观测层岩性为石灰岩,该井水温测项不受降雨影响。巢湖 14 井水温随深度的变化结果显示(图 6),在 110m 以下,该井水温呈线性变化,且随深度的增加而增大,这说明该段水温观测环境简单。无为 24 井井深 3200m,套管深度 2900m,水温探头深度 190m,这种观测条件下,可排除由于围岩孔隙水与井内水交互作用而引起水温变化的可能。另外,可能引

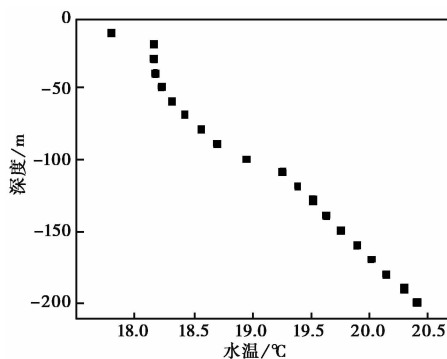


图 6 巢湖 14 井水温随深度的变化

起井水温上升变化的原因有 3 个, 即有深部热流补给、受区域应力加载作用以及断层活动产生的摩擦热作用等(车用太等, 2008)。巢湖 14 井和无为 24 井水位并没有发生异常变化, 因此, 可排除深部热流补给的可能, 而断层活动产生的摩擦热作用适用于源兆。综合分析认为, 水温异常变化为区域应力加载作用的结果。

## 4 结论

本文归纳总结了 2011 年 1 月 19 日安庆  $M_s$ 4.8 地震和 2012 年 7 月 20 日高邮-宝应  $M_s$ 4.9 地震前出现的地下流体异常特征, 并对其形成机理作了初步分析, 得出以下结论。

(1) 在时间进程上, 安庆地震和高邮-宝应地震孕育过程中都表现出中期趋势性背景异常和短临异常的配套性特征。这种时间进程上的配套性对于较为准确地把握震情发展有重要的参考价值。

(2) 在空间分布上, 2 次地震前的地下流体异常特征表现出了相似性。在中期趋势性背景阶段, 异常可分为水位异常和水温异常。2 次地震前水位异常在空间上均表现为震中附近流体井水位呈趋势性转折上升, 而震中外围的呈趋势性转折下降的特点。另外, 2 次地震前转折上升的流体井在空间上的分布方位主要为 NE 向, 与 2 次地震的发震断层走向一致。中期阶段的水温异常大致有先从震中向外迁移继而向震中靠拢的趋势。在短临阶段, 2 次地震前地下流体异常均表现为先向外迁移继而向震中靠拢的特点。

(3) 根据郭增建等(1979)提出的地震断层破裂长度计算公式, 可计算出安庆地震和高邮-宝应地震时断层的大致破裂长度分别为 5.7、6.1 km。而安庆地震和高邮-宝应地震前的水位群体变化中距震中最近的流体井的震中距也远大于这个尺度。因此认为, 这 2 个地震前水位的群体变化反映的是场兆信息, 而非源兆信息。在区域应力场作用下, 岩石的孔隙度和渗透系数都会发生变化。在相对挤压的环境中, 孔隙度下降, 孔隙水渗透进井孔造成水位上升, 同样水位下降则反映了周围岩石的相对拉张变化。因此认为, 水位在形态上表现出的震中外围流体井转折下降, 震中附近流体井转折上升的变化特征以及在空间分布上表现出与发震断层走向一致的特点, 说明流体井水位这种趋势性变化更多是受区域应力场作用以及区域构造格局所控制。

致谢: 感谢安徽省地震局提供巢湖 14 井水温梯度资料。

## 参考文献

- 车用太、刘成龙、鱼金子, 2008, 井水温度微动态及其形成机制, 地震, 28(4), 20~28.
- 车用太、刘成龙、鱼金子等, 2008, 汶川 M8.0 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), 828~837.
- 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、刘五州等, 1999a, 张北-尚义地震的地下流体异常场及其成因分析, 地震学报, 21(2), 194~201.
- 车用太、鱼金子、刘五州等, 1999b, 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.
- 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.
- 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.
- 郭增建、秦保燕, 1979, 震源物理, 70~87, 北京: 地震出版社.

- 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、付虹、杨马陵等,2014,中国震例(2003~2006),北京:地震出版社.
- 焦青、刘耀炜、杨选辉等,2007,文安5.1级地震前兆变化特征分析,大地测量与地球动力学,27(6),96~99.
- 康清清、缪发军、刘红桂等,2015,利用矩张量反演法研究江苏高邮-宝应 $M_s$ 4.9地震震源机制解和震源深度,地球物理学报,58(1),204~215.
- 李宣瑚,1981,水氡异常的扩散收缩现象,地震,5,19~25.
- 刘建达、杨伟林、李丽梅等,2012,江苏高邮-宝应交界4.9级地震震害分析,中国地震,28(4),402~414.
- 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、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.
- 刘耀炜、张元生,1998,共和7.0级地震前地下流体前兆的动态演化特征,西北地震学报,20(1),59~64.
- 陆明勇、范雪芳、周伟等,2010,华北强震前地下流体长趋势变化特征及其产生机理的研究,西北地震学报,32(2),129~138.
- 米雅奇金,1983,地震孕育过程,北京:地震出版社.
- 缪阿丽、冯志生、沈红会等,2014,苏22井水温映震效能及典型地震前兆特征分析,地震地磁观测与研究,35(3/4),140~145.
- 缪阿丽、王俊、叶碧文等,2017,安庆 $M_s$ 4.8地震前地下流体典型异常特征分析及其前兆机理讨论,地震,37(3),180~189.
- 石耀霖、曹建玲、马丽,2007,唐山井水温的同震变化及其物理解释,地震学报,29(3),265~273.
- 万迪堃、汪成民、李介成等,1993,地下水动态异常与地震短临预报,北京:地震出版社.
- 汪成民,1990,中国地震地下水动态观测网,北京:地震出版社.
- 谢祖军、郑勇、倪四道等,2012,2011年1月19日安庆 $M_L$ 4.8地震的震源机制解和深度研究,地球物理学报,55(5),1624~1634.
- 徐桂明、郑江蓉、杨从杰等,2010,江苏05井、06井水温的中短期地震异常典型特征研究,地震研究,33(4),274~280.
- 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,北京:教育科学出版社.
- Montgomery D R, Manga M, 2003, Streamflow and water well responses to earthquakes, Science, 30, 2047~2049.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973, Earthquake prediction, a physical basis, Science, 181, 803~809.
- Wang C, Manga M, 2010, Earthquakes and water, Berlin: Springer.

## Typical Underground Fluid Anomalies and the Precursor Mechanisms of Two Moderate Earthquakes in the Jiangsu and Anhui Regions

*Miao Ali*<sup>1)</sup> *Ye Biwen*<sup>1)</sup> *Zhang Yi*<sup>1)</sup> *Qu Min*<sup>1)</sup> *Gao Li*<sup>2)</sup>

1) Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

2) Xuzhou Seismic Station, Xuzhou 221008, Jiangsu, China

**Abstract** This paper summarized the typical underground fluid anomalies and discussed the possible mechanism of the Anqing  $M_s4.8$  earthquake and the Gaoyou-Baoying  $M_s4.9$  earthquake. The results show that the characteristics of the underground fluid anomalies before the two earthquakes are very similar. According to the duration time, both of them include medium-term trend anomalies and short-term anomalies. There is also certain regularity on spatial distribution. During medium-term stage, the water level of outlying wells shows a downward trend, and the water level of wells close to epicenter shows a rising trend. The distribution orientation of the water level with the rising trend is the same as the trend of the earthquake fault. During short-term stage, anomalies migrate far from the epicenter in the short-term stage first and migrate back close to the epicenter in the impending-term stage. The regularity distribution of the water level probably is controlled by the regional stress field and structure patterns.

**Key words:** The Anqing  $M_s4.8$  earthquake; The Gaoyou-Baoying  $M_s4.9$  earthquake; Underground fluid; Characteristic of anomalies; Precursor mechanism