

祝涛、沈红会、李鸿宇等,2019,江苏盐城盐纺井地球化学异常信息提取及机理分析,中国地震,35(4),643~653.

江苏盐城盐纺井地球化学异常信息 提取及机理分析

祝涛 沈红会 李鸿宇 田韬 缪阿丽 叶碧文

江苏省地震局,南京 210014

摘要 依据江苏省盐城市纺织厂井 Ca^{2+} 和 Cl^- 月均值浓度,利用从属函数和自适应阈值法对该井进行了地球化学异常信息提取与分析;结合波速比和地磁谐波振幅比数据,利用膨胀扩容模式开展了映震机理讨论。结果表明,2008~2016 年 Ca^{2+} 浓度出现 6 次从属函数异常和 5 次自适应阈值异常, Cl^- 浓度出现 4 次从属函数异常和 5 次自适应阈值异常,较好地对应了台站 200km 范围内 $M_L \geq 4.0$ 的地震。此外,根据波速比、地磁谐波振幅比和该井地下水地球化学成因等分析结果,判断 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度在震前的快速上升与深部流体上涌有关。

关键词: 盐纺井 地球化学 从属函数法 自适应阈值法 异常信息

[文章编号] 1001-4683(2019)04-0643-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

流体是地球形成与演化中的主要因素,是物质运移和能量交换的重要途径(车用太等,2006)。研究表明,地震前后区域构造应力场的变化会改变地下流体的循环体系,并造成流体间的混合或流体和岩石间的相互作用,导致地下流体化学组分的异常变化(高小其等,2002)。前人针对异常变化的提取进行了探索,并提出了一些分析方法。例如,和宏伟等(1999)以云南地区 5 级以上地震为研究对象,采用一阶差分法对 1987~1997 年云南地区 23 个水氡观测点的水氡观测数据进行了处理,对应率达到 70% 左右;范雪芳等(2002)总结了地下流体中期和中短期前兆异常的 4 种判定方法;叶秀薇(2004)利用从属函数对粤闽地区地下流体与地震之间的关系进行了初步研究;杨兴悦等(2011)利用从属函数、变差率以及趋势速率方法提取甘肃东南部水氡资料的地震前兆异常,获得的异常信号很好地对应了 600km 以内 $5.0 \leq M \leq 8.0$ 地震。此外,研究中常用到的方法还有高通滤波法、多项式拟合法、经验模态分解法、概率密度分布法等(邱泽华等,2010;钟伟等,2006;Huang et al,1998;Manshour et al,2009,2010)。

长期以来,国内外学者围绕地震孕育、发展、发生与地下流体的关系进行了探索,提出了不同理论、模式来进行解释。如,Scholz 等(1973)提出了解释地震成因的膨胀扩容模式,米雅奇金(1983)提出了岩石破坏的雪崩不稳定裂隙形成模式,郭增建等(1973)提出了能量积

[收稿日期] 2019-09-05; [修定日期] 2019-10-25

[项目类别] 江苏省地震局局长基金(17410)资助

[作者简介] 祝涛,男,1991 年生,助理工程师,主要从事地震预报方面的研究。E-mail: zthxan@163.com

累单元与调整单元构成的组合模式。上述模式均在一定程度上解释了某些大地震前出现的部分异常现象。

本文采用从属函数法和自适应阈值法,对江苏省盐城市纺织厂井(以下简称盐纺井)的 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度观测资料进行分析,尝试提取 Ca^{2+} 和 Cl^- 浓度在地震前的异常变化。

1 盐纺井简介

1.1 水文地质概况

盐纺井位于江苏省盐城市大庆中路,测项为 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度。观测站周围为第四系覆盖层,覆盖层厚度在千米以上,无基岩出露。测点地处盐城断裂西端,向北毗邻 NE 向展布的洪泽-沟墩断裂,以西靠近泾口-沙沟断裂,向东为南黄海区 NW 向沿海岸线的滨海大断裂。因此,台站受 4 条断裂形成的“口”字型构造复合控制(图 1)。地下水类型为自流抽水井,采样深度为 600m 以下,属热水井,水温最高可达 48°C ;水质类型为 HCO_3-Na 型(表 1)。台站自 1990 年开始观测,原始值为日值。

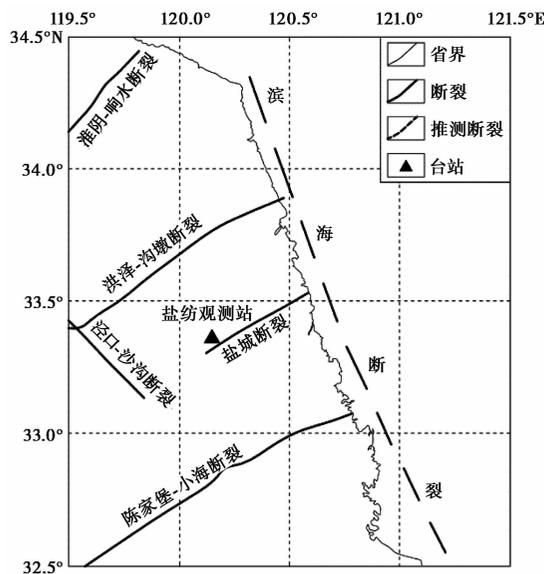


图 1 盐城纺织厂观测站及周边地质构造

1.2 离子测试方法

根据《地震水文地球化学观测技术规范》(中国地震局,2014), Ca^{2+} 浓度采用 EDTA 容量法测定, Cl^- 浓度采用硝酸银容量法测定。

2 观测资料选取和目标地震的筛选

2.1 观测资料的选取

本文主要分析该测点 2007~2016 年的月均值数据, Ca^{2+} 和 Cl^- 浓度月均值原始曲线如图 2 所示,两者含量具有一定的准同步性。

表 1 盐纺井水化学特征(采样时间:1986年5月20日)

主要离子	离子浓度		离子占比/%	
	$/(mg \cdot L^{-1})$	$/(mmol \cdot L^{-1})$		
阳离子	K^+	4.10	0.10	0.89
	Na^+	236.00	10.26	91.04
	Ca^{2+}	10.00	0.50	4.44
	Mg^{2+}	4.90	0.40	3.55
	NH_4^+	0.20	0.011	0.08
	Fe^{2+}	0.04		
	Fe^{3+}	0.48		
	总计	255.70	11.27	100
阴离子	HCO_3^-	396.60	6.50	56.92
	CO_3^{2-}	30.00	1.00	8.76
	Cl^-	103.50	2.92	25.56
	SO_4^{2-}	48.00	1.00	8.76
	NO_3^-	0.00	0.00	0.00
	NO_2^-	0.00	0.00	0.00
	F^-	0.44		
	总计	578.54	11.42	100

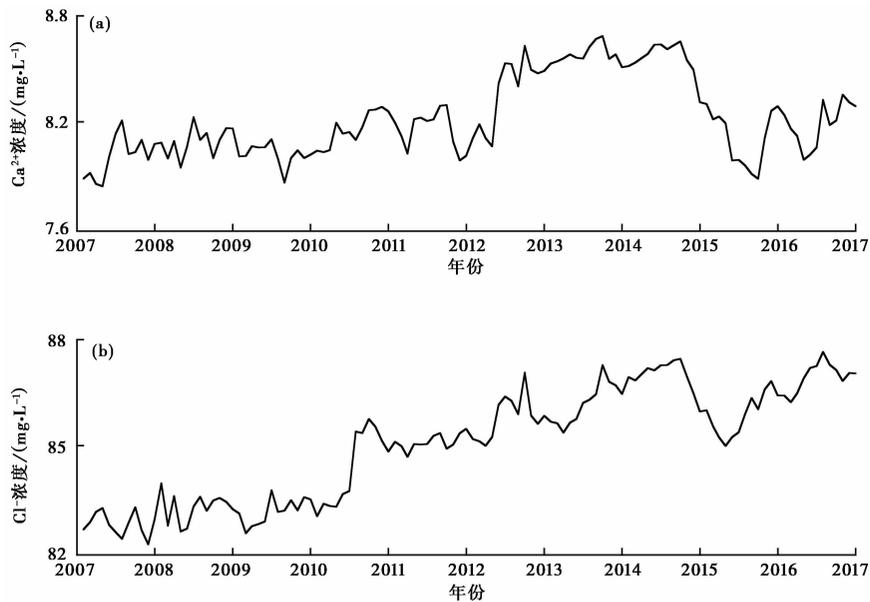


图 2 盐纺井 Ca^{2+} (a) 和 Cl^- (b) 浓度月均值曲线

2.2 目标地震的筛选

目标地震选取震中距 200km 范围内 $M_L \geq 4.0$ 的地震,若一年内在同一区域多次发生中强地震,则以震级较大的地震为主,最终选取的地震见表 2。

表 2 2007~2016 年盐纺井 200km 范围内 $M_L 4.0$ 以上地震目录

编号	发震时间 (年-月-日)	震中位置			M_L	震中距/km
		北纬/(°)	东经/(°)	地点		
1	2010-07-19	32.47	121.58	黄海海域	4.6	168
2	2012-07-20	33.03	119.62	高邮宝应	5.3	65
3	2014-01-18	32.50	121.67	黄海海域	4.1	173
4	2015-08-06	34.39	121.01	黄海海域	4.3	139
5	2016-10-20	33.63	120.32	盐城射阳	4.9	38

3 资料分析与异常提取

选取盐纺 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子 2007~2016 年的月均值为数据序列,依次用从属函数和自适应阈值等方法进行异常的提取与分析。

3.1 利用从属函数法进行资料分析

(1) 计算:从属函数法公式为

$$\mu_i = \left(1 + \frac{\alpha}{|k_i| + |\gamma_i|} \right)^{-1} \quad (1)$$

$$V_i = \begin{cases} \mu_i (k_i > 0) \\ 0 (k_i \leq 0) \end{cases} \quad (2)$$

其中, μ_i 为从属函数值; k_i 为观测时间序列 $M(t)$ 的斜率; γ_i 为 $M(t)$ 与 t 的相关系数; α 为经验函数,由小到大进行选取,直至异常表现突出;拟合窗长为 $n=5$;由于盐纺井离子浓度上升为异常,因此只取 $k_i > 0$ 的 μ_i 来描述,记作 V_i 。

(2) 异常指标:当盐纺离子浓度的从属函数值 $V \geq 0.5$ 时,视为异常。

(3) 异常特征:在统计时间段内,盐纺井 Ca^{2+} 离子浓度出现了 6 次异常, Cl^- 离子浓度出现了 4 次异常,异常特征及其对应地震见图 3 和表 3。

盐纺井 Ca^{2+} 离子浓度从属函数异常持续时间最长为 11 个月,最短为 3 个月;盐纺井 Cl^- 离子浓度从属函数异常持续时间最长为 13 个月,最短为 3 个月。异常的持续时间与震级之间没有明显的数量关系。

(4) 对应地震情况:在统计时间段内,盐纺井 Ca^{2+} 离子的 6 次异常有 4 次对应地震,对应率为 60%,漏报率为 20%,虚报率为 40%。盐纺 Cl^- 离子的 4 次异常均对应地震,对应率为 100%,漏报率为 20%,虚报率为 0。

3.2 利用自适应阈值法进行异常提取

(1) 计算:自适应阈值法公式为

$$F_i = \left| y_i - \frac{\sum_{j=i-L}^{i-1} y_j}{L} \right| - KS_i \quad (i = L + 1, L + 2, \dots, n) \quad (3)$$

其中, F_i 为自适应阈值; y_i 为观测值; $\sum_{j=i-L}^{i-1} y_j / L$ 为 y_i 前的 L 个观测值的均值,取 $L=5$; S_i 为前 L

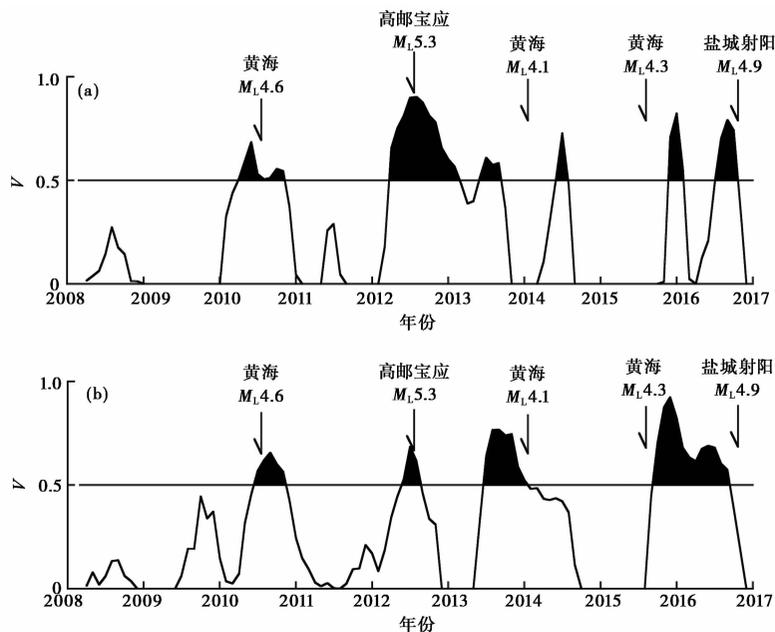


图 3 盐纺井 Ca^{2+} (a) 和 Cl^- (b) 浓度从属函数曲线

表 3 盐纺井 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度从属函数异常特征及对应地震

测项名称	异常描述		对应地震			
	异常时间(年-月-日)	持续时间	发震时间(年-月-日)	间隔时间	M_L	震中距/km
Ca^{2+}	2010-04-01	7 个月	2010-07-19	4 个月	4.6	168
	2012-04-01	11 个月	2012-07-20	4 个月	5.3	65
	2013-06-01	4 个月	2014-01-18	7 个月	4.1	173
	2014-06-01	3 个月			无对应地震	
	2015-12-01	3 个月			无对应地震	
Cl^-	2010-05-01	6 个月	2010-07-19	3 个月	4.6	168
	2012-05-01	3 个月	2012-07-20	3 个月	4.6	168
	2013-07-01	8 个月	2014-01-18	6 个月	4.1	173
	2015-09-01	13 个月	2016-10-20	12 个月	4.9	38

个观测值的均方差; K 为倍数, 取 $K = 2$ 。

(2) 异常指标: 当盐纺离子浓度的自适应阈值超过其 2 倍均方差时, 视为异常。

(3) 异常特征: 在统计时间段内, 盐纺井 Ca^{2+} 离子、 Cl^- 离子浓度均出现了 5 次异常, 异常特征及其对应地震见图 4 和表 4。

盐纺井 Ca^{2+} 离子浓度自适应阈值异常持续时间最长为 3 个月, 最短为 2 个月; 盐纺井 Cl^- 离子浓度从属函数异常持续时间最长为 6 个月, 最短为 1 个月。异常的持续时间与震级之间没有明显的数量关系。

(4) 地震对应情况: 在统计时间段内, 盐纺井 Ca^{2+} 、 Cl^- 离子浓度均出现 5 次异常, 有 4 次

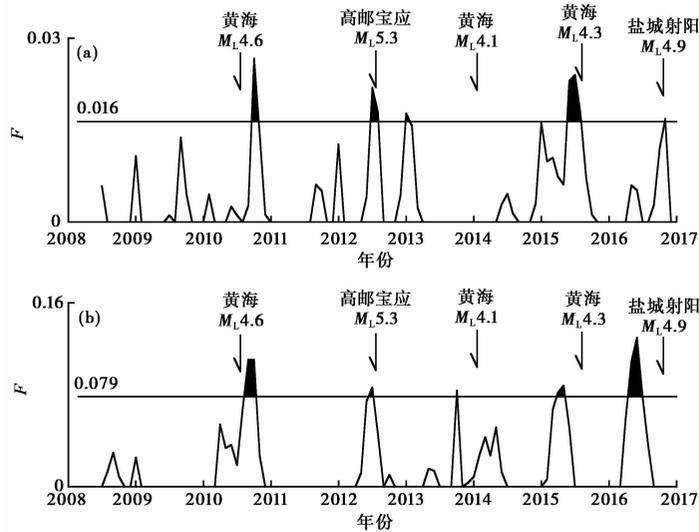


图 4 盐纺井 Ca^{2+} (a) 和 Cl^- (b) 浓度自适应阈值曲线

表 4 盐纺井 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度自适应阈值异常特征及对应地震

测项名称	异常描述		对应地震			
	异常时间(年-月-日)	持续时间	发震时间(年-月-日)	间隔时间	M_L	震中距/km
Ca^{2+}	2010-08-01	2 个月	2010-07-19	-2 个月	4.6	168
	2012-06-01	2 个月	2012-07-20	2 个月	5.3	65
	2012-12-01	1 个月	2014-01-18	13 个月	4.1	173
	2015-05-01	3 个月	2015-08-06	3 个月	4.3	139
	2016-10-01	1 个月	2016-10-20	1 个月	4.9	38
Cl^-	2010-07-01	6 个月	2010-07-19	-1 个月	4.6	168
	2012-06-01	1 个月	2012-07-20	2 个月	5.3	65
	2013-09-01	1 个月	2014-01-18	4 个月	4.1	173
	2015-03-01	2 个月	2015-08-06	5 个月	4.3	139
	2016-04-01	3 个月	2016-10-20	7 个月	4.9	38

注:间隔时间负号表示异常出现在地震之后。

异常发生后对应地震,有 1 次异常发生在震后,对应率为 80%,漏报率为 20%,虚报率 20%。

4 盐纺井 Ca^{2+} 、 Cl^- 映震机理讨论

由于盐纺井仅仅开展了 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子观测,没有其它测项可以协助开展机理分析,相邻地区也无其它流体观测手段,因此,本文以 2012 年高邮 $M_L 5.3$ 地震为例,以盐城台(距盐纺井约 10km)的波速比和地磁谐波振幅比为主要依据,使用膨胀扩容(DD)模式讨论盐纺井 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子的映震机理。

4.1 盐城台波速比

利用 2009 年 1 月~2013 年 12 月盐城台 120km 范围内的地震目录资料,计算单台波速比,计算方法为

$$\frac{v_P}{v_S} = 1 + \frac{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i^2 - \left(\sum_{i=1}^n \Delta t_i \right)^2}{n \sum_{i=1}^n \Delta t_i t_{Pi} - \sum_{i=1}^n t_{Pi} \sum_{i=1}^n \Delta t_i} \quad (4)$$

式中, t_{Pi} 为 P 波走时, Δt_i 为 P 波和 S 波的走时差, $i=1, 2, \dots, n$ (n 为每次地震到时的数据个数)。

计算波速比的约束条件为: $\Delta t \leq 15s$, 相关系数 $R \geq 0.95$, 波速比误差估计 $\sigma \leq 0.05$, 震级下限 $M_L 1.5$, 选择视窗 18 个月的窗口, 逐月滑动时间窗, 计算得到波速比 (v_P/v_S) 随时间的变化。

图 5 为参与计算的地震分布情况, 图 6 为波速比计算结果。由图 6 可见, 在 2012 年 7 月 20 日高邮地震前, 盐城台波速比出现了显著的下降变化, 并于震后迅速恢复, 具体过程可以分为 3 个阶段。第一阶段(2010 年 8 月~2011 年 2 月), 随着应力的积累, 新的微裂隙产生或原有裂隙扩张, 岩体发生膨胀和扩容, 波速比开始下降, 岩体的扩容导致了本身的孔隙压降低, 孔隙中的流体呈现不饱和状态, 深部的卤水开始渗入到裂隙中; 第二阶段(2011 年 3 月~2012 年 6 月), 由于卤水的渗流速度较慢, 因此波速比到达最低点后将在低值波动一段时间; 第三阶段(2012 年 7 月~2012 年 8 月), 随着深部卤水的渗入, 岩体的孔隙压和弹性模量增大, 波速比回升, 岩体加速破裂进而发震。

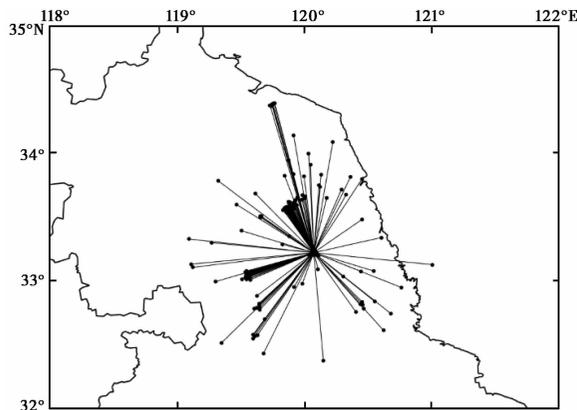


图 5 参与计算的地震分布

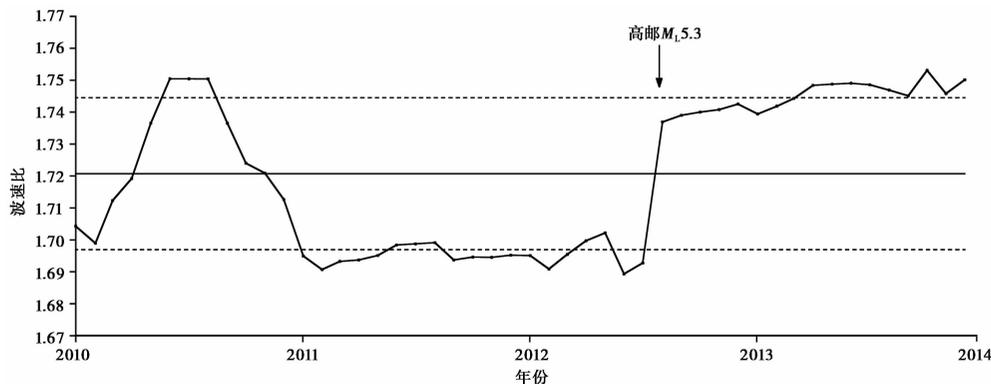


图 6 盐城台波速比计算结果

4.2 地磁谐波振幅比

地磁谐波振幅比 Y_{ZH_x} (NS) 和 Y_{ZH_y} (EW) 的定义为

$$Y_{ZH_x}(\text{NS}) = \left| \frac{Z(\omega)}{H_x(\omega)} \right| \quad (5)$$

$$Y_{ZH_y}(\text{EW}) = \left| \frac{Z(\omega)}{H_y(\omega)} \right| \quad (6)$$

其中, $Z(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$ 分别为地磁场的垂直分量、南北和东西向水平分量的频谱, ω 为圆频率。

冯志生等(2013)指出,对于随时间周期变化的不均匀场源,在地球介质为均匀各向同性的平面导体的条件下 Y_{ZH_x} (NS) 和 Y_{ZH_y} (EW) 与地下介质的电阻率 ρ 呈正比,即 Y_{ZH_x} (NS) 和 Y_{ZH_y} (EW) 的变化可以近似反映地下介质电阻率 ρ 的变化。

利用谐波振幅比研究盐城台周边地下介质的电阻率变化,资料选取、处理和计算过程为:①选取盐城台地磁三分量 F 、 H 、 D 相对观测资料,并转换成 Z 、 H_x 、 H_y ;②利用富氏拟合去噪声,加汉宁窗去高频干扰,窗长为 6h;③计算每分钟的三分量富氏谱 $Z(\omega)$ 、 $H_x(\omega)$ 、 $H_y(\omega)$;④计算 10~60min 共 6 个频带的地磁谐波振幅比,并使用年滑动平均法去年变化,计算结果如图 7 所示。

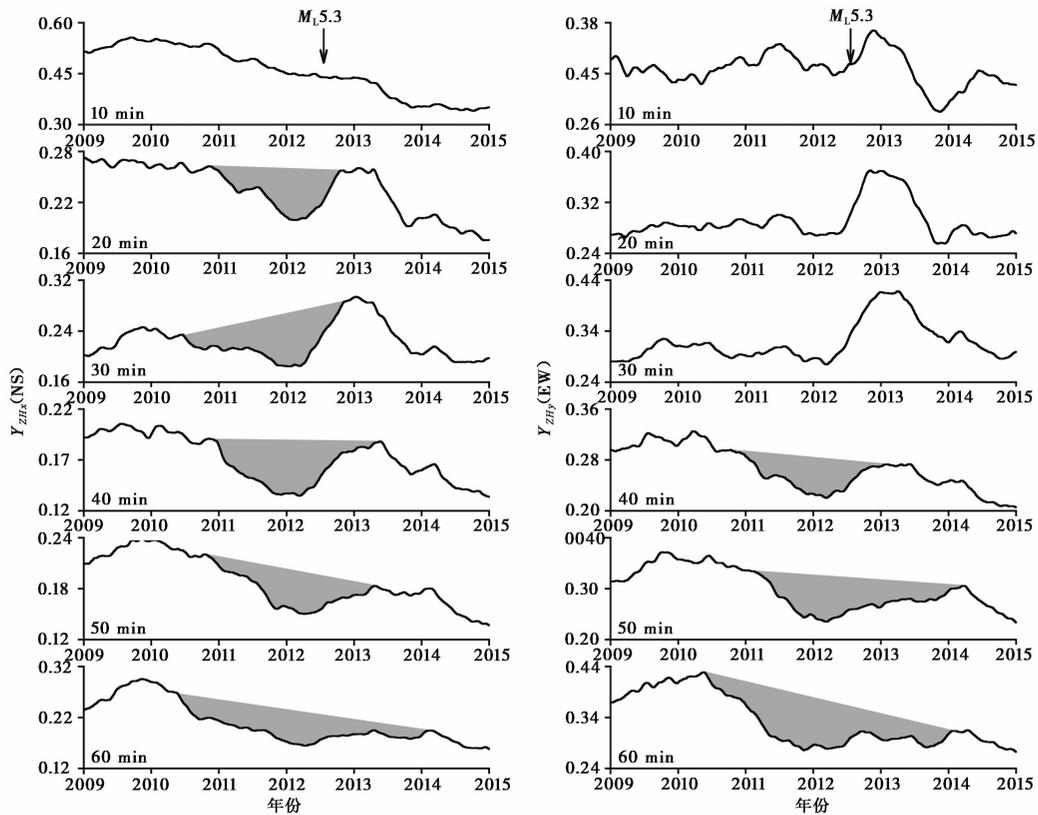


图 7 盐城谐波振幅比结果

盐城台谐波振幅比在多个周期内出现了下降—转折—恢复的变化特征。下降的起始时间约在 2010 年 7 月~2011 年 2 月,转折时间均集中在 2012 年 1~3 月,恢复所用的时间不完全一致,跨度较短的于 2012 年 10 月恢复,跨度较长的在 2014 年才缓慢回升。

4.3 膨胀扩容 (DD) 模式

根据 Scholz 等 (1973) 提出的膨胀扩容模式,孕震过程可以分为弹性应变、膨胀裂隙形成和地下水扩散 3 个阶段。如图 8 所示,2012 年高邮 $M_L 5.3$ 地震孕震过程与这一模式较为符合,具体的过程如下:

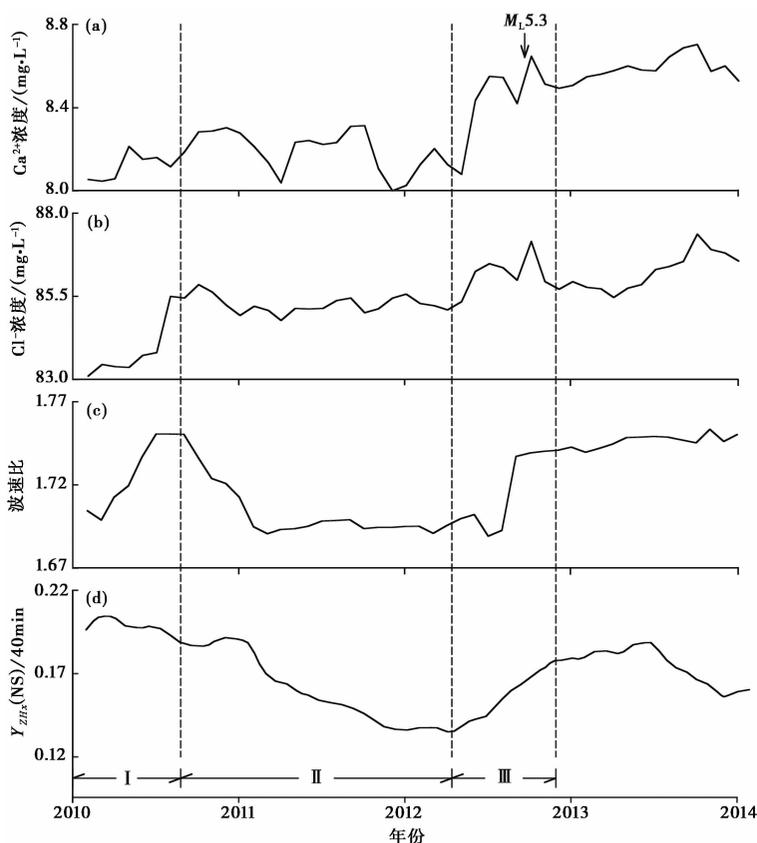


图 8 膨胀扩容模式示意图

(1) 弹性应变阶段(2010 年 8 月之前),该阶段还未出现前兆现象。

(2) 膨胀裂隙形成阶段(2010 年 8 月~2012 年 2 月),因膨胀而新形成的裂隙中,由于流入了流体,导致震源区的介质处于不饱和的状态,引起盐城台的波速比和谐波振幅比(深部电阻率)出现明显的下降变化。

(3) 地下水扩散阶段(2012 年 2 月~2012 年 7 月),由于地下水的进一步扩散,膨胀岩石的物理性质恢复,使得波速比、电阻率等转折回升;当矿化度较高的深层卤水扩散至浅层,并与浅层地下水混合后,盐纺水化站的 Ca^{2+} 、 Cl^- 浓度上升;由于流体的渗入,破裂过程得以加速,进而发震。

5 结论与讨论

5.1 地震中短期指示意义

通过对盐纺井 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子浓度进行的异常提取,结果显示 Ca^{2+} 和 Cl^- 离子浓度异常出现时间多在震前半年左右,对台站 200km 范围内的地震具有较好的中短期指示意义。

5.2 映震灵敏性成因分析

中国地震局地下流体学科技术管理组于 2015 年和 2016 年对盐纺井进行了水化学成分测试,获得了水质、氢氧同位素和氦同位素结果^①。测试结果显示,盐纺井离子特征与该地区地下水特征基本一致,但是总溶解固体(TDS)特征低于区域地下水特征,表明该井属于较封闭的地下水环境;Na-K-Mg 三角图显示该井水属于部分平衡水范畴(图 9),表明该井水的水-岩反应相对较为充分,水流系统相对稳定;地热温标显示该井水的热储温度介于 71~150℃ 之间,热储深度大致在 2.3~5km;氢氧同位素测值显著偏离全球大气降水线(图 10),其氧同位素富集可能表明该井水为大气降水补给,且水体经过了长距离的运移和蒸发作用,与该井水较低 TDS、时间序列无明显年变特征一致,2015 年测量的 $^3\text{He}/^4\text{He}$ 结果也显示该井水壳源 He 同位素贡献率高达 62%,大气 He 同位素贡献率为 38%。

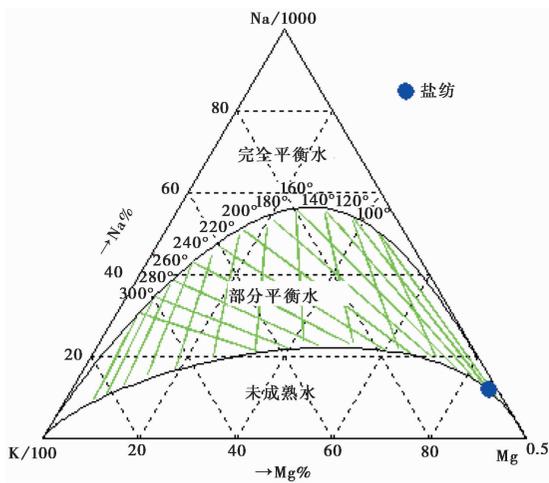


图 9 盐纺井 Na-K-Mg 三角图

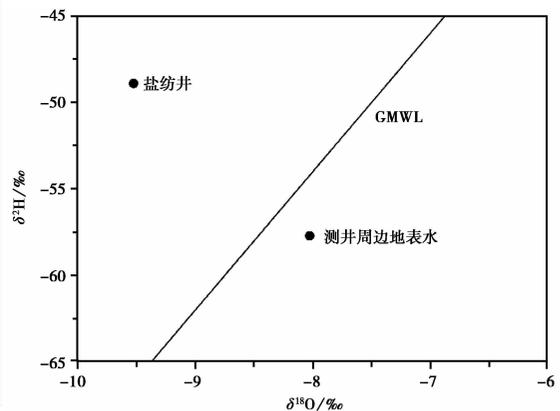


图 10 盐纺井氢氧同位素图

地下水地球化学成因数据显示该井地下水补给循环较深,不易受浅层降水及环境干扰。波速比和地磁谐波振幅比的结果表明,盐纺井 Ca^{2+} 、 Cl^- 离子浓度在震前的快速上升可能与深部流体上涌有关。井水的水-岩反应程度适中,比较适合开展地震地下流体地球化学观测,较易获取地震前兆异常信息,这可能是该井 Ca^{2+} 和 Cl^- 具有较好映震灵敏性的原因。

然而,本文研究处于初步阶段,仍然存在不足之处,比如每一次地震前是否均会出现类似于 2012 年高邮 $M_L 5.3$ 地震前的 3 个阶段,还有待进一步深入研究。

^① 高小其,2016,2016 年华东流体异常现场核实工作汇报,中国地震局地壳应力研究所内部资料。

致谢: 中国地震局地壳应力研究所高小其教授在盐纺井水文地球化学资料收集过程中给予了支持和帮助,并对论文撰写给予指导,在此表示感谢。

参考文献

- 车用太、鱼金子,2006,地震地下流体学,北京:气象出版社.
- 范雪芳、张淑亮、王吉易,2002,地下流体中期和中短期前兆异常的四种判定方法,地震,22(4),136~139.
- 冯志生、李鸿宇、张秀霞等,2013,地磁谐波振幅比异常与强地震,华南地震,33(3),9~15.
- 高小其、迪里夏提、许秋龙等,2002,乌鲁木齐9、10号泉F⁻映震特征的研究,地震学刊,22(1),5~11.
- 郭增建、秦保燕、徐文耀等,1973,震源孕育模式的初步讨论,地球物理学报,16(1),43~48.
- 和宏伟、和国文、李永莉等,1999,云南地区水氡前兆异常动态演化与地震关系研究,地震研究,22(4),365~371.
- 米雅奇金 В И,1983,地震孕育过程,冯德益、顾瑾平,译,北京:地震出版社.
- 邱泽华、张宝红、池顺良等,2010,汶川地震前姑咱台观测的异常应变变化,中国科学:地球科学,40(8),1031~1039.
- 杨兴悦、王燕、猴亚江等,2011,甘肃东南部水氡中期异常特征研究,地震研究,34(1),8~18.
- 叶秀薇,2004,粤闽地区地下流体从属函数异常与地震关系的初步研究,防灾减灾工程学报,24(2),195~201.
- 中国地震局,2014,地震水文地球化学观测技术规范,北京:地震出版社.
- 钟伟、杨宝俊、张智,2006,多项式拟合技术在强噪声地震资料中的应用研究,地球物理学进展,21(1),184~189.
- Huang N E, Shen Z, Long S R, et al, 1998, The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, Proc Roy Soc A, 454(1971), 903~995.
- Manshour P, Ghasemi F, Matsumoto T, et al, 2010, Anomalous fluctuations of vertical velocity of Earth and their possible implications for earthquakes, Phys Rev E Stat Nonlin Soft Matter Phys, 82(3), 036105.
- Manshour P, Saberi S, Sahimi M, et al, 2009, Turbulencelike behavior of seismic time series, Phys Rev Lett, 102(1), 014101.
- Scholz C H, Sykes L R, Aggarwal Y P, 1973, Earthquake prediction: a physical basis, Science, 181(4102), 803~810.

Geochemical Abnormal Extraction and Mechanism Analysis of the Yanfang Well, Yancheng City, Jiangsu Province

Zhu Tao Shen Honghui Li Hongyu Tian Tao Miao Ali Ye Biwen

Jiangsu Earthquake Agency, Nanjing 210014, China

Abstract In this paper, based on the subordinate function method and adaptive threshold method, the Ca²⁺ and Cl⁻ concentration monthly observation data of Yancheng Yanfang Mill in Jiangsu Province were analyzed and anomalies before earthquakes were extracted. Combined with wave velocity ratio and geomagnetic harmonic amplitude ratio data, the mechanism of reflecting earthquakes was discussed by the dilatancy-diffusion model. The results show that from 2008 to 2016, Ca²⁺ concentration has 6 subordinate function anomalies and 5 adaptive threshold anomalies, Cl⁻ concentration has 4 subordinate function anomalies and 5 adaptive threshold anomalies, which correspond well to earthquakes of local magnitude above 4.0 within 200km of epicenter distance from the station. In addition, according to the results of wave velocity ratio, geomagnetic harmonic amplitude ratio and geochemical origin of groundwater, it is judged that the rapid rise of Ca²⁺ and Cl⁻ concentration before earthquakes are related to the upwelling of deep fluid.

Key words: Yanfang well; Geochemistry; Subordinate function method; Adaptive threshold method; Abnormal information