

doi:10.3799/dqkx.2014.161

注水诱发地震序列的震源机制变化特征： 以四川长宁序列为例

朱 航, 何 畅

四川省地震局, 四川成都 610041

摘要: 2006 年 4 月以来, 四川长宁、兴文、珙县交界区域相继出现注水诱发地震活动, 至 2013 年 4 月 30 日共发生 $M_L 4.0$ 以上地震 16 次, 最大为 2013 年 4 月 25 日 $M_L 5.2$ 地震。通过采用体波谱振幅相关系数方法研究长宁注水诱发地震序列 $M_L 3.0$ 以上地震震源机制变化过程, 结果显示序列震源机制散乱; 利用 CAP 方法计算了序列中 $M_L 4.0$ 以上 12 次地震的震源机制解, 结果同样表明其机制紊乱。分析认为: 钻孔加压注水引起附近岩体的孔隙压力增大及先存断层面的摩擦系数减小, 这 2 种变化均导致库仑应力变化 $\Delta\sigma_i$ 增大, 从而促进地震的发生。因此, 注水诱发地震活动期间, 研究区构造应力场的应力强度无明显增强, 对破裂方向也无明显的约束作用, 故地震序列震源机制发散。

关键词: 注水诱发地震; 地震序列; 震源机制; 谱振幅相关系数; 天然地震。

中图分类号: P315.2

文章编号: 1000-2383(2014)12-1776-07

收稿日期: 2014-02-27

Focal Mechanism Changing Character of Earthquake Sequence Induced by Water Injection: A Case Study of Changning Sequence, Sichuan Province

Zhu Hang, He Chang

Sichuan Earthquake Administration, Chengdu 610041, China

Abstract: Earthquakes induced by water injection appeared in the border area of Changning, Xingwen and Gongxian counties, Sichuan Province since April, 2006. Up to April 30, 2013, 16 $M_L \geq 4.0$ earthquakes occurred and the maximum is $M_L = 5.2$ on April 25, 2013. In this paper, the earthquake focal mechanism changing process of Changning $M_L \geq 3.0$ earthquake sequence is studied by calculating correlation coefficient of body wave spectral amplitudes, and the results show that focal mechanisms of sequence events are scattering, furthermore, 12 $M_L \geq 4.0$ earthquakes' focal mechanisms are calculated by CAP method and they are in disorder also. The following analyses believe that water injection causes the pore pressure of rock body increasing as well as the friction coefficients of pre-existing fault planes decreasing, and those 2 factors lead to Coulomb stress change $\Delta\sigma_i$ increasing, thus induce earthquakes' occurrence. Therefore, the earthquakes induced by water injection occur without obvious enhancement of regional tectonic stress intensity, and there are no obvious restraining effects on the rupture directions of the earthquakes. As a result, the focal mechanisms of those earthquakes appear scattering.

Key words: earthquake induced by water injection; earthquake sequence; focal mechanism; spectral amplitude correlation coefficient; earthquake.

在工业领域里, 人工加压注水方法已广泛应用于采油、采气、采盐及废水处理等方面。但是, 在特定地区的地壳环境中, 注水可能诱发地震。这类地震相对于类似震级的天然地震, 震中烈度较高, 对生产装置和地表建筑产生较强破坏。例如, 20 世纪 60 年代

初, 美国丹佛地区的一家军工厂向一口深井注入废液后引起了一系列有感地震 (Healy *et al.*, 1968), 并且记录到了迄今为止注水诱发的最大震级 ($M_L 5.5$) 地震; 1970 年以来, 国内也相继发现了任丘油田、山东胜利油田角 07 井、广东三水隔坑盐矿区、

重庆荣昌气田以及四川长宁盐矿区注水诱发地震的现象(刁桂苓等,1982;刁守中等,1987;魏柏林等,1999;朱丽霞等,2007;阮祥等,2008)。

针对注水诱发地震的相关科学问题,国内外已开展多方面的研究(刁守中等,1990;朱丽霞等,2007;Lei *et al.*, 2008;龙锋等,2010;张致伟等,2012;郑建常等,2013)。这些研究对象包括地震活动与注水的相关性,注水诱发地震的物理机制、序列特征,震源应力场和尾波衰减特征等。

地震序列的震源机制变化特征是地震学研究中比较关心的问题。根据朱航等(2006)提出的采用体波谱振幅相关系数计算地震序列震源机制变化过程的方法已经研究了多个地震序列(朱航等,2006;李霞等,2010;刘泽民等,2010),并总结了前震、余震序列及普通小震群的识别特征。这个方法可以克服难以精确地计算小地震的震源机制的问题。崔子健等(2012)认为谱振幅相关分析法可能是判定小震群类型的物理意义较为明确的方法,具有实用价值。

从2006年4月开始,四川长宁、兴文、珙县交界区域小震活动突然增加。阮祥等(2008)通过长宁盐矿区注水与地震活动变化的对比分析,判定该小震活动为注水诱发的地震序列(本文简称为长宁序列)。

通过分析四川地震台网观测资料,基于阮祥等(2008)的判定结果,本文采用体波谱振幅相关系数方法研究长宁注水诱发地震序列的震源机制变化特征。

1 长宁盐矿区注水诱发的地震活动

在我国,油矿、气矿与盐矿可采用注水方法生产。水溶开采是我国大规模岩盐矿山普遍采用的方法,已有近50年的历史;与早采相比,其人员劳动强度大幅减轻,安全系数增大,地面环境污染降低,劳动生产率大幅提高,土地面积大量节约,生产成本大幅降低。其工艺路线可分硐室水溶和钻井水溶开采两种。除云南有采用硐室水溶方法外,其他省普遍采用钻井水溶开采方法(续培信,2012)。

长宁—兴文地区为四川盐矿产区之一,岩盐产于长宁背斜构造轴部上震旦统灯影组白云岩底部,埋深均超过2500 m(寸树苍等,1996)。长宁背斜为该区域内主要的地质构造,为不对称复式背斜,东西长约100 km,南北宽为20 km,主要分布在长宁县、

兴文县一带;主轴走向是东段呈NW-SE向;西段为近EW向。长宁背斜包含多个断裂构造,多数发育在背斜的两翼及核部,以小断裂为主,断裂与褶皱相伴,构造形迹显示为近SN向、EW向、NW向、NE向等不同方向(阮祥等,2008)。

2006年4月起,长宁、兴文、珙县交界区域小震活动突然增加,活动强度及频度均高于以往。截至2013年4月30日,已发生 $M_L 2.5$ 以上地震321次, $M_L 4.0$ 以上地震16次, $M_L 4.5$ 以上地震4次;其中2013年以来发生了2次 $M_L 4.5$ 以上的地震,2013年4月25日 $M_L 5.2$ 地震为该区域有记录以来的最大地震。

长宁盐矿区注水钻孔深2800~3000 m。阮祥等(2008)研究发现,2006年4月前长宁盐矿区钻孔注水量与出水量相当,地震活动平稳;2006年4月至2007年11月注水量远超过出水量,此时长2井与长6井对接连通进行注水、出水,采矿规模扩大,在注水量和出水量的差值大幅上升时,浅层中小地震频次急剧增加,因此,判定长宁盐矿及附近的长宁、兴文、珙县交界区域2006年4月后出现的密集中小地震活动属于注水诱发地震。2007年12月至2013年4月,注水量与出水量相似,但注水钻孔附近区域的中小地震较高频次活动依然持续(图2)。

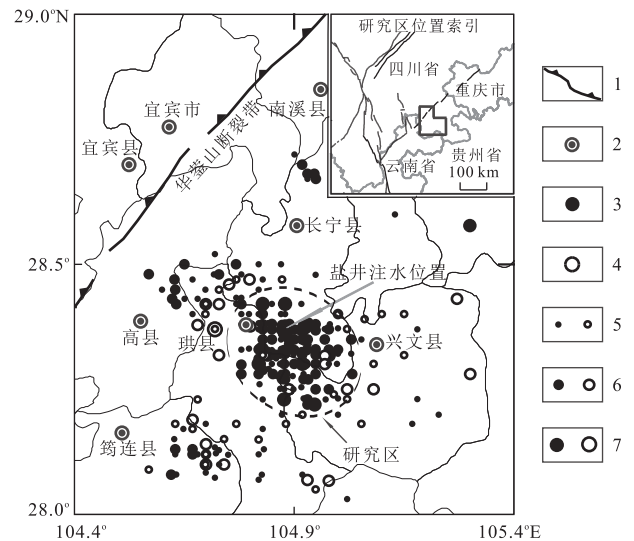


图1 长宁、兴文、珙县交界区域地震的空间分布(2000年1月至2013年4月)

Fig.1 Map of earthquake distribution in the border area of Changning, Xingwen and Gongxian counties

1.主干逆断层;2.城镇;3.2006年4月—2013年4月发生的地震;4.2000年1月—2006年3月发生的地震;5.地震 $3.0 > M_L \geq 2.5$;6.地震 $4.0 > M_L \geq 3.0$;7.地震 $5.2 \geq M_L \geq 4.0$

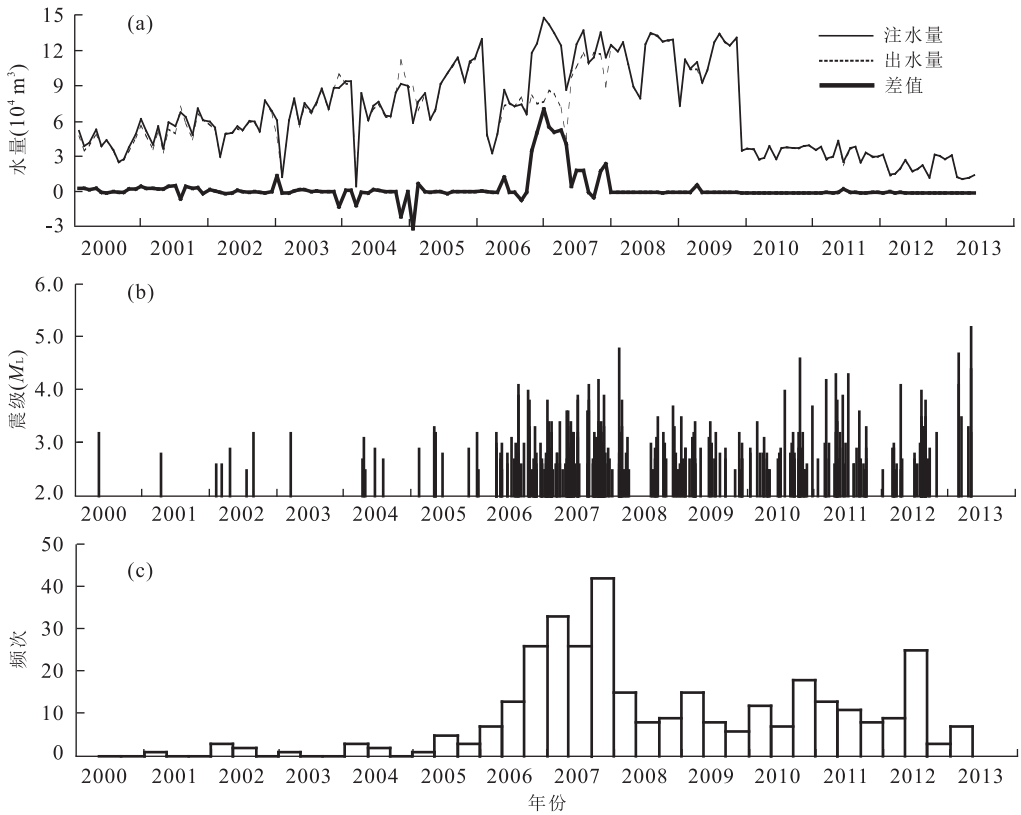


图 2 研究区内注水量及 $M_L \geq 2.5$ 以上地震的时间分布(2000 年 1 月—2013 年 4 月)

Fig.2 The water injection and $M_L \geq 2.5$ earthquake temporal distribution in the study area

a.注水量、出水量曲线;b.M-t 曲线;c.N-t 曲线

根据阮祥等(2008)的判定结果,本文取长宁、兴文、珙县交界区域地震较密集区域进行研究.研究区参见图 1 中椭圆虚线所包围的范围,椭圆长轴长度为 32 km,短轴长度为 24 km.从图 1 与图 2 中可以看出 2006 年 4 月以后地震震级升高,频次大幅增加,地震活动空间分布集中,总体展布为 NW-SE 向,与长宁背斜主轴东段的走向一致.

2 体波谱振幅相关系数及其分析方法

在震害学中,台站记录地震波位移观测谱振幅的一般表示式是:

$$O_{ij}(f) = M_i(f) \mathfrak{R}_{ij}(\theta, \varphi) P_{ij}(r) F_{ij}(f, r) G_j(f) I_j(f), \quad (1)$$

式中: i 表示第 i 个地震事件, j 表示第 j 个台站, f 表示频率, r 表示地震与台站之间的距离. $G_j(f)$ 为台站的场地响应, $I_j(f)$ 为仪器响应,两者仅与频率有关. $M_i(f)$ 为地震的震源谱,表达式为:

$$M_i(f) = \frac{M_0(i)}{1 + [f/f_c(i)]^2}, \quad (2)$$

式中: M_0 为地震矩, f_c 为拐角频率; $\mathfrak{R}(\theta, \varphi)$ 为地震波的辐射型因子,其中 θ, φ 表示震源球坐标系中台站的方位; $P_{ij}(r)$ 是几何扩散系数; $F_{ij}(f, r)$ 为非弹性衰减系数.

如果两个地震位于同一个位置(或者两个地震之间的距离远小于地震到台站之间的距离),那么,这两个地震到同一个台站的几何扩散、非弹性衰减、仪器响应和场地响应是一样的.对于同一频率,在同一个台站的体波观测谱值之比可表示为:

$$\frac{O_{1j}(f)}{O_{2j}(f)} = \frac{\mathfrak{R}_{1j}(\theta, \varphi)}{\mathfrak{R}_{2j}(\theta, \varphi)} \times \frac{M_0(1)}{M_0(2)} \times \frac{1 + [f/f_c(2)]^2}{1 + [f/f_c(1)]^2}. \quad (3)$$

当 $f \ll f_c(1)$ 和 $f_c(2)$ 时,公式(3)可表示为:

$$\frac{O_{1j}(f_0)}{O_{2j}(f_0)} = \frac{\mathfrak{R}_{1j}(\theta, \varphi)}{\mathfrak{R}_{2j}(\theta, \varphi)} \times \frac{M_0(1)}{M_0(2)}, \quad (4)$$

式中: $O_{1j}(f_0)$ 和 $O_{2j}(f_0)$ 表示两个台站观测谱的零频谱值, $\frac{M_0(1)}{M_0(2)}$ 为一个常数.

由于不同震级地震的地震矩差别较大,为便于比较,对公式(4)取对数,即:

$$\log[O_{1j}(f_0)] = \log[O_{2j}(f_0)] + b(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2), \quad (5)$$

式中: $b(\theta_1, \theta_2, \varphi_1, \varphi_2) = \log\left[\frac{M_0(1)}{M_0(2)} \times \frac{\Re(\theta_1, \varphi_1)}{\Re(\theta_2, \varphi_2)}\right]$.

Lund and Bödvarsson(2002)提出一种计算体波谱振幅相关性的方法:对同一震源区 2 次事件的不同台站的波形记录,使用直达 P、S 波零频谱振幅值计算相关系数.对于 3 分向波形记录,每个台站可以得到 5 个零频谱值:垂向和径向 P 波(PZ 和 PR),垂向、径向和切向 S 波(SZ、SR 和 ST),称这 5 个谱值为谱值分量.计算其线性相关系数 r_{xy} 可以得到 2 次事件的相似性:

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})(y_{ij} - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i,j} (x_{ij} - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i,j} (y_{ij} - \bar{y})^2}}, \quad (6)$$

式中: x_{ij} 是一次事件在第 i 个台站上的第 j 个谱值分量的对数, \bar{x} 是 x_{ij} 的平均值; y_{ij} 是另一次事件的谱值分量的对数; r_{xy} 为体波谱振幅相关系数.

体波谱振幅相关系数给出了 2 次震中位置相近事件在不同方位的零频谱值分量分布的相似性量度,由公式(4)和公式(5)可知,该系数也可以描述 2 次事件震源机制解的几何特性的相似程度.如果相关系数接近 1,那么各台记录的 2 次事件波形应相似,震源机制解的几何特性相同;如果相关系数比较低,那么 2 次事件的震源机制解的几何特性具有不同程度的差异.在这个意义上,体波谱振幅相关系数可认为是震源机制异同的归一化的数值描述.

将每一次事件与序列中其他事件进行相关分析,就得到了相互之间震源机制的差异.在此基础上,可以研究地震序列震源机制的时空变化特征.

3 计算结果分析

本文取研究区内,2006 年 4 月至 2013 年 4 月 $M_L 3.0$ 以上的地震共计 72 个,其中包含 $M_L 4.0$ 以上地震 12 次,最大地震为 2013 年 4 月 25 日 $M_L 5.2$ 地震.

根据上节所述原理与方法,观测台站的选取应满足两个条件:(1)台站距研究区域的距离应大于 100 km;(2)研究时段内台站记录正常.

按照以上条件,本文选用四川地震观测台网的 4 个台站的波形记录进行计算,台站分别为花马石台(HMS)、五马坪台(WMP)、峨眉山台(EMS)及油

罐顶台(YGD),台站均位于研究区的北西侧,距离研究区中心 130~220 km.

3.1 序列震源机制的时间演化

利用上述 4 个台站记录到的波形数据计算研究区内 72 次 $M_L 3.0$ 以上地震事件的谱振幅相关系数,图 3 为谱振幅相关系数滑动平均时序曲线,滑动窗长为 5,步长为 1,即求得 5 次事件间两两组合的相关系数后取算术平均值,并将该结果标在窗内最后一次地震的发生时刻,因此图 3 中时间坐标起点为第 1 个时间窗内最后一次地震的发生时刻(2006 年 8 月 1 日).图 3 显示相关系数滑动平均值在 0.67~0.91 间波动,大多数时段处于 0.73~0.85,处于稳定高值的时段;先前的震例研究结果(朱航等,2006)显示,序列的相关系数滑动平均值大于 0.94 时,表明该震群相邻地震的震源机制解具有较高的相似程度,因此在时间进程上,长宁序列多数相邻地震的震源机制不相似.

本文利用 CAP 方法(Zhao *et al.*, 1994)计算了序列中 $M_L 4.0$ 以上 12 次地震的震源机制解(表 1),在图 3 中于相应的地震发生时刻上方绘出了其震源机制解图形(上半球投影),这些震源机制多数是走滑型,也有少数的逆冲型与正断型,各次地震的主压应力轴方向比较紊乱.

结合图 3 的谱振幅相关系数滑动平均时序曲线形态与 $M_L 4.0$ 以上地震发震时间还可以看出,在 $M_L 4.0$ 以上地震密集发生时段,谱振幅相关系数滑动平均时序曲线多处于相对高值.

表 1 列出了 CAP 方法计算出的序列中 $M_L 4.0$ 以上 12 次地震震源的最佳拟合深度,其中有 9 次在 2~5 km 范围内,与钻孔注水深度以及岩盐的埋深相近;另外有 3 次的范围为 8~10 km,与普通天然地震的震源深度类似.

3.2 序列震源机制的聚类分析

在求得序列中任何一次事件与其他事件之间的谱振幅相关系数的基础上,可根据事件之间相关系数的大小进行聚类分组.

聚类分析是对于不知道其类别的一批样本,使用某种方法把观测进行合理的分类,使得同一类的观测比较接近,不同类的观测相差较多.聚类分析依赖于对观测间的接近程度(距离)或相似程度的理解,定义不同的距离量度和相似性量度就可以产生不同的聚类结果.距离的一般要求:① $d(i, j) \geq 0$; ② $d(i, j) = d(j, i)$; ③ $d(i, j) \leq d(i, k) + d(k, j)$.

本文使用谱系聚类方法中的最长距离法.谱系

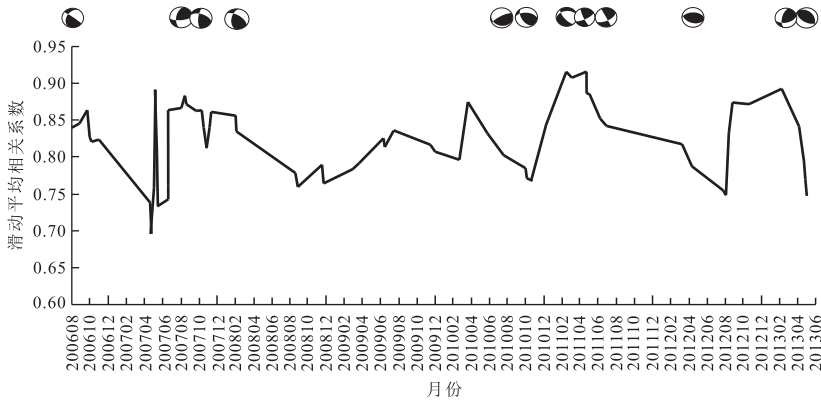


图 3 研究区内 $M_L \geq 3.0$ 地震事件谱振幅相关系数滑动平均时序曲线

Fig.3 Moving average curve of spectrum amplitude correlation coefficient of $M_L \geq 3.0$ earthquake in the study area

表 1 CAP 方法计算出的序列中 12 次 $M_L \geq 4.0$ 以上地震的震源机制解和震源最佳拟合深度

Table 1 The focal mechanisms and the best fitting focal depths of 12 $M_L \geq 4.0$ earthquake calculated by CAP method in the sequence

发震时间	震级 M_L	节面 I			节面 II			最佳拟合深度 (km)
		走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	
2006-08-01	4.1	306°	76°	60°	193°	33°	154°	8
2007-08-14	4.1	190°	55°	27°	84°	68°	142°	3
2007-10-06	4.2	185°	71°	143°	289°	55°	23°	3
2008-02-01	4.8	305°	59°	44°	189°	53°	140°	3
2010-07-16	4.0	241°	75°	73°	111°	23°	138°	10
2010-10-06	4.6	274°	51°	49°	148°	54°	129°	3
2011-03-01	4.2	141°	69°	-59°	262°	37°	-143°	15
2011-04-20	4.3	75°	90°	-177°	345°	87°	0°	2
2011-06-26	4.3	69°	75°	170°	162°	80°	15°	4
2012-04-09	4.1	275°	49°	79°	112°	42°	102°	3
2013-02-19	4.7	84°	55°	151°	192°	67°	39°	5
2013-04-25	5.2	324°	39°	107°	123°	53°	77°	3

聚类是一种逐次合并类的方法,最后得到一个二叉树聚类图.对于 n 个观测,先计算其两两的距离得到一个聚类距离,然后把离得最近的两个观测合并为一类,于是只剩下 $n-1$ 个类(每个单独的未合并的观测作为一个类).计算这 $n-1$ 个类两两之间的距离,找到离得最近的两个类将其合并,就只剩下 $n-2$ 个类,依此类推,直到剩下两个类并把它们合并为一个类为止.但是,完全合并为一个类就失去了聚类的意义,所以上面的聚类过程应该在某个类水平数(即未合并的类数)停下来,最终的类就取决于这些未合并的类.

根据类间距离的计算方法的不同,有多种不同的聚类方法.最长距离法计算两类观测间最远一对的距离,即:

$$D_{KL} = \max_{i \in CK} \max_{j \in CL} d(x_i, x_j), \quad (7)$$

递推公式为:

$$D_{JM} = \max(D_{JK}, D_{JL}). \quad (8)$$

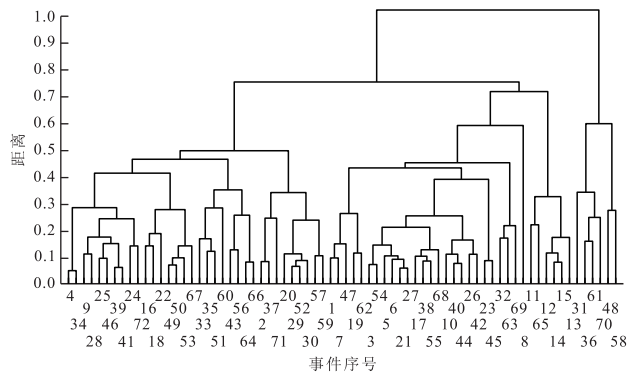


图 4 研究区内 $M_L \geq 3.0$ 地震事件聚类树

Fig.4 Clustering tree of $M_L \geq 3.0$ earthquake in the study area

本文定义距离为 1 与谱振幅相关系数的差值,含义为 2 次事件距离越大,其相似程度越低.

图 4 是长宁序列 $M_L \geq 3.0$ 以上地震事件聚类树,图上可以看出事件之间的相似程度差,不能在较小的距离标准下合并包含较多观测的类,例如在距离

小于 0.1 时,最多只有 3 次事件聚为同一类,表明序列事件的发散机制。

4 讨论与结论

对同一震源区的不同地震在不同台站得到的直达波零频观测谱值进行比较,可以了解不同地震之间的震源机制差异,从而得到地震序列震源机制的变化过程。本文使用谱振幅相关系数方法研究了长宁注水诱发地震序列 $M_L 3.0$ 以上地震的震源机制的变化特征,结果显示,总体上地震震源机制散乱。利用 CAP 方法计算了序列中 $M_L 4.0$ 以上 12 次地震的震源机制解,该方法的计算结果同样表明序列的震源机制紊乱。

前人对强震的前震和余震序列研究结果(朱航等,2006;崔子健等,2012)显示,强震序列的初期震源机制有从散乱到一致的过程,主震和较大地震发生后小震机制有一定的发散;而普通小震群序列中,地震的机制散乱。分析认为,孕震应力场的应力强度对孕震区内地震的破裂方向有明显的约束作用。小震序列孕震应力场的应力强度较低,故震源机制比较紊乱;而强震序列孕震应力场的应力强度高,对序列事件的破裂方向有明显的约束作用,故强震序列震源机制相似的地震居多。

对天然地震的研究仅考虑了地壳构造应力场作用,而在研究注水诱发地震序列的震源机制变化过程时,必须考虑水的作用。研究区内的长宁背斜包含多个断裂构造,多数发育在背斜的两翼及核部,以小断裂为主,其构造的几何特征存在巨大差异。当钻孔加压注水时,将导致 2 种变化的同时出现:第一,注水点附近岩体的孔隙压力增大;第二,液体沿断面渗透,导致先存断层面的摩擦系数减小。断层趋于破裂的过程可以使用库仑应力变化 $\Delta\sigma_f$ 进行描述(Stein,1999):

$$\Delta\sigma_f = \Delta\tau_s - \mu'(\Delta\sigma_n - \Delta\rho), \quad (9)$$

式中: $\Delta\tau_s$ 为断层面的剪切应力变化, $\Delta\sigma_n$ 为正应力变化, $\Delta\rho$ 为孔隙压力的变化, μ' 为断层面的摩擦系数。即使 $\Delta\tau_s$ 和 $\Delta\sigma_n$ 不变,上述钻孔加压注水时导致的 2 种变化都将使库仑应力变化 $\Delta\sigma_f$ 增大,从而促进地震的发生。因此,在加压注水的情况下,研究区构造应力场的应力强度无需明显升高也可能导致地震的发生,地震活动与注水行为在时间上具有相关性;另外,参照前人的研究结果(朱航等,2006;崔子健等,2012),由于注水诱发地震序列的构造应力场

强度较低,其震源机制比较紊乱。

从上述分析可以看出,发生注水诱发地震的必要条件之一是注水点附近存在断层。因此,不是每一个注水行为都能诱发地震。

利用 CAP 方法还得到了序列中 $M_L 4.0$ 以上 12 次地震震源的最佳拟合深度,其中有 9 次在 2~5 km 范围内,与钻孔注水深度以及岩盐的埋深相近。其他研究者也描述了类似的现象(魏柏林等,1999;阮祥等,2006;Lei *et al.*,2008)。震源深度较浅、且震源分布在注水层位附近,可以作为判断注水诱发地震的依据之一。

致谢:本研究使用了安徽省地震局刘泽民同志编制的 BodyWave 软件(体波谱振幅相关系数计算程序),在此表示感谢。

References

- Cui, Z. J., Li, Z. X., Chen, Z. L., et al., 2012. A Study on the New Method for Determining Small Earthquake Sequence Type—Correlation Analysis of Spectral Amplitude. *Chinese J. Geophys.*, 55(5): 1718—1724 (in Chinese with English abstract).
- Cun, S. C., Shi, Y. J., Chen, H. B., 1996. A Synthesis Study of Drill and Geophysical Operations for the Shuanghe Rock Salt Mining Area. *Journal of Chengdu Institute of Technology*, 23(1): 100—104 (in Chinese with English abstract).
- Diao, G. L., Zhang, D. Y., Zhao, G. M., 1982. Preliminary Study on Water Injection Earthquake of Renqiu Oil-Field. *Northwestern Seismological Journal*, 4(3): 89—95 (in Chinese with English abstract).
- Diao, S. Z., Jiang, H. K., Xu, X. Y., 1990. The Evolution and Mechanism of Earthquake Sequences Induced by Water Injection in Jiao 7 Oil Well of Shengli Oil Field, Shandong Province. *Acta Seismologica Sinica*, 12(4): 399—406 (in Chinese with English abstract).
- Diao, S. Z., Zhou, H. P., Guo, A. X., 1987. Induced Earthquakes by Injecting and Leaking Water in Jiao 7 Oil Well, Shandong Province—Characteristics of the Focal Parameters and Earthquake Sequences. *Seismology and Geology*, 9(3): 84—89 (in Chinese with English abstract).
- Healy, J. H., Rubey, W. W., Griggs, D. T., et al., 1968. The Denver Earthquakes. *Science*, 161(3848): 1301—1310. doi:10.2307/1725684
- Lei, X. L., Yu, G. Z., Ma, S. L., et al., 2008. Earthquakes Induced by Water Injection at -3 km Depth within the Rongchang Gas Field, Chongqing, China. *J. Geophys.*

- Res., 113(B10):310. doi:10.1029/2008JB005604
- Li, X., Dong, X., Liu, X. Q., et al., 2010. Study on the Focal Mechanism Changing Process in Earthquake Concentrating Area Using Correlation Coefficient of Body-Wave Spectral Amplitudes. *Northwestern Seismological Journal*, 32(3):231–236 (in Chinese with English abstract).
- Liu, Z. M., Liu, D. W., Xia, S. A., 2010. The Application of Correlation Coefficient of Body-Wave Spectral Amplitudes in the Tendency Determination after the Feidong Earthquake Sequence. *Seismological and Geomagnetic Observation and Research*, 31(5):13–16 (in Chinese with English abstract).
- Long, F., Du, F., Ruan, X., et al., 2010. Water Injection Triggered Earthquakes in the Zigong Mineral Wells in ETAS Model. *Earthquake Research in China*, 26(2):164–171 (in Chinese with English abstract).
- Lund, B., B  dvarsson, R., 2002. Correlation of Microearthquake Body-Wave Spectral Amplitudes. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 92(6):2419–2433. doi: 10.1785/0119990156
- Ruan, X., Cheng, W. Z., Zhang, Y. J., et al., 2008. Research of the Earthquake Induced by Water Injections in Salt Mines in Changning, Sichuan. *Earthquake Research in China*, 24(3):226–234 (in Chinese with English abstract).
- Stein, R. S., 1999. The Role of Stress Transfer in Earthquake Occurrence. *Nature*, 402(9):605–609. doi: 10.1038/45144
- Wei, B. L., Guo, Q. H., Li, C. Q., et al., 1999. The Cause of the Sanshui Earthquakes. *Earthquake Research in China*, 15(3):247–256 (in Chinese with English abstract).
- Xu, P. X., 2012. On Several Problems Focused on Rock Salt Mine Water Dissolve Mining. *China Salt*, (6):54–56 (in Chinese).
- Zhao, L. S., Helmberger, D. V., 1994. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms. *Bull. Seismol. Soc. Amer.*, 84(1):91–104.
- Zhang, Z. W., Cheng, W. Z., Liang, M. J., et al., 2012. Study on Earthquakes Induced by Water Injection in Zigong-Longchang Area, Sichuan. *Chinese J. Geophys.*, 55(5):1635–1645 (in Chinese with English abstract).
- Zheng, J. C., L  , Z. Q., Xu, P., et al., 2013. Analyses and Discussion on Mechanism of Clustered Microearthquakes in Puyang, Henan Province. *Earthquake Research in China*, 29(1):11–25 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, H., Liu, J., Chen, T. C., 2006. Study on the Changing Process of Earthquake Sequence's Focal Mechanisms Using Correlation Coefficient of Body-Wave Spectral Amplitudes. *Earthquake*, 26(2):1–11 (in Chinese with English abstract).
- Zhu, L. X., Huang, S. Y., Wei, H. M., 2007. On Fluid-Injection Induced Earthquake in Rongchang Area. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 27(6):86–90 (in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 崔子健,李志雄,陈章立,等,2012.判别小震群序列类型的新方法研究——谱振幅相关分析法.地球物理学报, 55(5):1718–1724.
- 寸树苍,石应骏,陈华玢,1996.四川双河岩盐矿区钻探、物探综合研究.成都理工学院学报,23(1):100–104.
- 刁桂苓,张德元,赵根模,1982.任邱油田注水地震的初步研究.西北地震学报,4(3):89–95.
- 刁守中,蒋海昆,徐学炎,1990.山东胜利油田角07井注水地震序列的演化及其机制.地震学报,12(4):399–406.
- 刁守中,周焕鹏,郭爱香,1987.山东角07井注(漏)水诱发地震—震源参数与地震序列特征.地震地质,9(3):84–89.
- 李霞,董翔,刘希强,等,2010.采用体波谱振幅相关系数方法研究地震集中区震源机制变化过程.西北地震学报,32(3):231–236.
- 刘泽民,刘东旺,夏仕安,2010.体波谱振幅相关系数法在肥东地震序列震后判定中的应用.地震地磁观测与研究,31(5):13–16.
- 龙锋,杜方,阮祥,等,2010.用ETAS模型分析自贡矿井注水触发地震.中国地震,26(2):164–171.
- 阮祥,程万正,张永久,等,2008.四川长宁盐矿井注水诱发地震研究.中国地震,24(3):226–234.
- 魏柏林,郭钦华,李纯清,等,1999.论三水地震的成因.中国地震,15(3):247–256.
- 续培信,2012.关于岩盐矿山水溶开采注重的几个问题.中国盐业,(6):54–56.
- 张致伟,程万正,梁明剑,等,2012.四川自贡—隆昌地区注水诱发地震研究.地球物理学报,55(5):1635–1645.
- 郑建常,吕子强,许萍,等,2013.濮阳小震集中区发震机理分析与讨论.中国地震,29(1):11–25.
- 朱航,刘杰,陈天长,2006.采用体波谱振幅相关系数方法研究地震序列的震源机制变化过程.地震,26(2):1–11.
- 朱丽霞,黄世源,魏红梅,2007.荣昌地区注水地震研究.大地测量与地球动力学,27(6):86–90.