

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2017.04.016

三峡库区巴东地震前后视应力变化特征

戴 苗^{1,2,3)} 吴桂桔¹⁾* 刘 坚¹⁾ 申重阳¹⁾
孙少安¹⁾ 申学林^{1,2,3)} 魏贵春^{1,2,3)}

1) 中国地震局地震研究所, 地震大地测量重点实验室, 武汉 430071

2) 中国地震局地震研究所, 地震预警湖北省重点实验室, 武汉 430071

3) 湖北省地震局, 武汉 430071

摘 要 三峡库区地震成因复杂, 为了研究该区域地震的成因及发震规律, 文中利用湖北省区域台网、三峡台网提供的数字波形资料, 计算 2010 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日三峡库区 394 个 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源参数, 获得了三峡库区视应力的时空分布图像, 分析了三峡库区研究时间段显著地震事件前后的视应力时空演化特征。研究表明: 1) 巴东 $M_L 5.5$ 、秭归 $M_L 4.7$ 以及 $M_L 5.1$ 地震发生前后, 不同震级分段计算结果显示, 震前震中区附近新华-水田坝断裂和高桥断裂同时出现高值, 高值区域分布呈现协同化程度高, 而震后零散的现象, 表明该区域在震前积累了较高的应力。2) 研究区域视应力在地震前后经历了一个明显的“上升-下降”过程, 在应力上升初期发生了巴东 $M_L 5.5$ 、秭归 $M_L 4.7$ 以及 $M_L 5.1$ 三次显著地震。3) 研究区域视应力深度剖面显示, 不同深度视应力与震级大小呈现正相关性, 震后研究区内小震属于低应变释放背景下的低应力释放, 未新增明显视应力异常集中区域, 震后巴东高桥断裂、周家山-牛口断裂以及秭归仙女山断裂短期内发生破坏性地震的可能性不大。

关键词 视应力 时空特征 三峡库区 巴东地震

中图分类号: P315.72

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2017)04-0837-16

0 引言

在震源介质为均匀弹性的脆性性质假定下, 地震视应力可由地震波信息获得, 是 1 个与区域平均应力呈正比的物理量, 与地震辐射能量和标量地震矩有关 (Choy *et al.*, 1995; 吴忠良, 2001; 吴忠良等, 2002)。在传统的地震学里, 地震辐射能量和标量地震矩只能利用震级通过经验公式换算得到, 误差较大且不能相互独立。目前, 随着中国观测技术水平的不断提升, 特别是宽频带数字地震计的使用, 使得利用数字波形资料反演地震震源谱的拐角频率、低频水平、地震应力降、标量地震矩以及震源半径等震源参数成为可能, 利用这些参数可以获取相对独立的地震辐射能量, 进而获取地震视应力的大小。考虑到地震震级对视应力计算结果的影响, 具体在利用视应力研究区域应力场变化时, 为尽可能地保证视应力能真实反映区域应力场

[收稿日期] 2016-06-15 收稿, 2016-09-23 改回。

[基金项目] 中国地震局地震研究所所长基金 (201656264) 与中国地震局测震台网青年骨干培养专项 (20160516) 共同资助。

* 通讯作者: 吴桂桔, 副研究员, E-mail: wugjsky@126.com。

的变化,采用震级分段研究是经国内实践验证的最直接也是最有效的手段和方法(李艳娥等, 2015; 陈丽娟等, 2015; 岳晓媛等, 2016)。近年来,王鹏等(2014, 2015)尝试利用视应力值和近震震级的拟合关系,将计算得到的视应力值减去近震震级拟合应力值,得到视应力差值(即差视应力),以期能排除震级对视应力的影响,最终去除视应力的“线性趋势”,但由于能量的测定和地震矩的测定都存在一定误差,该方法又高度依赖统计获取的近似拟合关系,2种效应叠加在一起,获得的结果误差可能会更大。

地震前的应力集中,可通过视应力间接反映,视应力可作为地壳应力水平的下限估计。研究表明视应力在中强地震前会有升高的趋势,可作为震后趋势快速判定的依据(李艳娥等, 2012a, b; 陈丽娟等, 2015)。云南地区中小地震的视应力值在云南地区的部分地震序列中有很好的前兆特征表现,在部分地区,地震序列中只要发生了视应力值超过 1MPa 的中小地震,其后就一定会中强震发生;如果序列中中强地震发生后再没有发生视应力值超过 1MPa 的中小地震,则该序列就不会有强余震发生(刘红桂等, 2006)。2006 年河北文安 5.1 级地震前 2a 开始震中区附近出现了明显的视应力升高过程(陈学忠等, 2007)。龙门山断裂带上小震频次高值区视应力在 2003—2005 年间,曾出现过 2 次较为明显的上升-下降变化过程,汶川地震临震前,视应力出现突然上升(李艳娥等, 2012b)。

2013 年 12 月 16 日,湖北巴东县发生 $M_L 5.5$ 地震,随后不到 4 个月在相距不到 50km 的秭归再次发生 $M_L 4.9$ 、 $M_L 5.1$ 地震,这在湖北有历史地震记录以来是相当罕见的。3 次地震震中均位于秭归向斜 SW 侧,即黄陵背斜之西翼马蹄形盆地的西南边缘,其区域主压应力场方向为 NW-SE 向。巴东地震震源机制解表明,此次巴东地震的主张应力轴走向及主压应力轴走向和震源错动性质与蓄水之前巴东区域的构造应力场背景有近似性,本次主震的最大主压应力轴和最大主张应力轴走向与蓄水前几乎一致,部分学者认为巴东地震活动与震中区域 NE 向断裂的区域构造应力调整有关,属于构造地震(陈俊华等, 2014)。有限元数值模拟巴东地震前库区等效应力场的变化结果显示,巴东地震震中位于蓄水引起的巴东与牛口等效应力差值区的梯度带上,故部分学者指出巴东地震与蓄水相关,震源区附近发育大规模条带岩溶,认为该地震是区域构造应力场叠加蓄水引起的局部构造应力状态调整触发的塌陷型水库地震(陈蜀俊等, 2014)。此外,对于此次地震的发震构造,由于湖北巴东地震及较大余震震源机制解显示,近 EW 向节面为巴东地震发震断层,部分学者认为巴东地震发震构造可能为 EW 向大坪断裂(赵凌云等, 2014)。与此同时,部分学者根据巴东地震区域地震构造环境和地震烈度分布等结论分析认为,巴东高桥断裂、马鹿池断裂及周家山断裂围限的楔形微块体构成巴东地震的发震单元(雷东宁等, 2014),该区域浅表构造和深部构造非一一对应关系,故地表找不到相应的发震构造。

巴东地震是三峡 2003 年蓄水以来库区最强地震,开展巴东地震前后三峡库区地震震源参数及视应力的相关研究,对深入了解巴东地震成因、发震构造以及获取三峡库区近期后续地震趋势具有重要意义。

1 地震构造背景及资料的选取

研究范围属三峡库区地震重点监视区域,区域构造主要以 NNE、NW 向为主,如 NNE 向新华-水田坝断裂(F_3)、九畹溪断裂(F_5)、周家山断裂(F_2)、高桥断裂(F_1),NW 走向的断裂

主要有仙女山断裂(F_4)、天阳坪断裂(F_7)等(图 1)。其中,新华-水田坝断裂新华段属基底断裂,早期具左旋走滑性质;水田坝段属盖层断裂,断层面 W 倾,倾角约 70° ,W 盘向 S 运动,断层具张扭性质,第四纪以来活动性不明显。仙女山断裂走向 $340^\circ\sim 355^\circ$,早期表现为逆冲性质,断面向 E 或 W 陡倾;深部资料显示该断裂未有越过长江的迹象;断裂最新活动时间为早、中更新世(雷东宁等, 2014);以右旋走滑兼正断倾滑性质为主;2008 年 11 月 26 日,该断裂附近发生了三峡蓄水后首次 4 级以上地震,震级达 $M_L 4.6$ 。天阳坪断裂走向 320° ,倾向 SW,倾角 $30^\circ\sim 70^\circ$;西接仙女山断裂,西段倾角较陡,剖面表现为逆冲叠瓦状冲断组合;第四纪以来活动性较弱。周家山-牛口断裂发育于震中东部,总体走向 20° ,倾向 300° ,倾角约 70° ;此断裂为周家山向斜内部的 1 条横断裂,表现为左行平移逆冲活动的特点,喜山期以来为张性正断性质;其最新活动年代测定为晚更新世早期(华卫等, 2010)。此次巴东地震震中位置正好位于高桥断裂与周家山-牛口断裂之间。

本文主要选用湖北区域台网、三峡台网记录的 2010 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日共计 394 个 $M_L \geq 2.0$ 地震的数字地震波形资料;该时间段内 $M_L 2.0$ 以上地震月频次相对较为稳定,频次较高,且台网观测站分布均匀,选用台站及地震事件时空分布见图 1, 2。选用台站仪器型号主要为 BBVS-60、FSS-3M 和少量 JC-V104-3D,观测频带主要为 $0.017\sim 40\text{Hz}$ 、 $0.5\sim 70\text{Hz}$,个别为 $1\sim 40\text{Hz}$,采样率均为 100Hz 。在近震源条件下,计算时主要选用震中距在 $25\sim 150\text{km}$ 以内的台站,选取信噪比较高的波形数据,并对这些数据进行去倾和仪器响应校正处理。

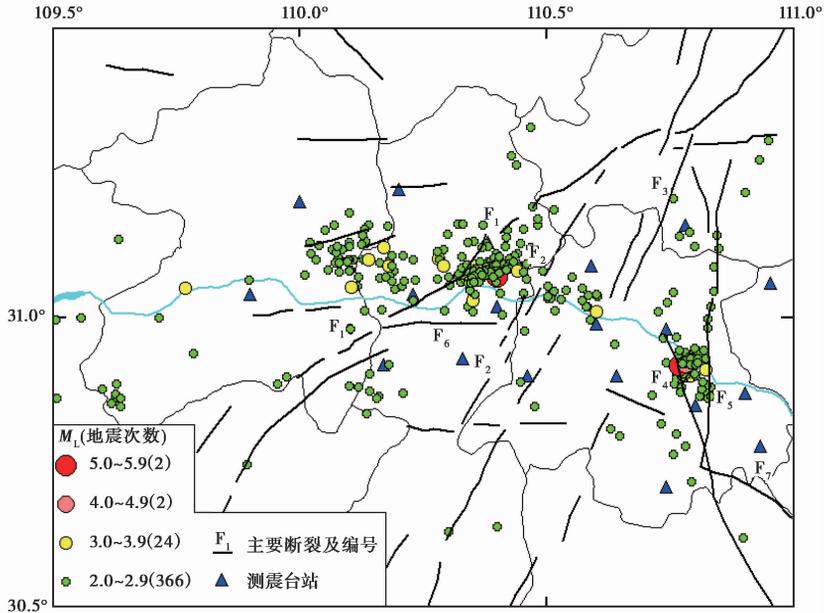


图 1 研究区地震活动性、测震台站分布及构造分布图(2010-01-01—2015-12-30)

Fig. 1 Distribution map of earthquakes, seismic stations and faults in the Three Gorges reservoir area(2010-01-01—2015-12-30).

F_1 高桥断裂; F_2 周家山断裂; F_3 新华-水田坝断裂; F_4 仙女山断裂;

F_5 九畹溪断裂; F_6 亩田湾断裂; F_7 天阳坪断裂

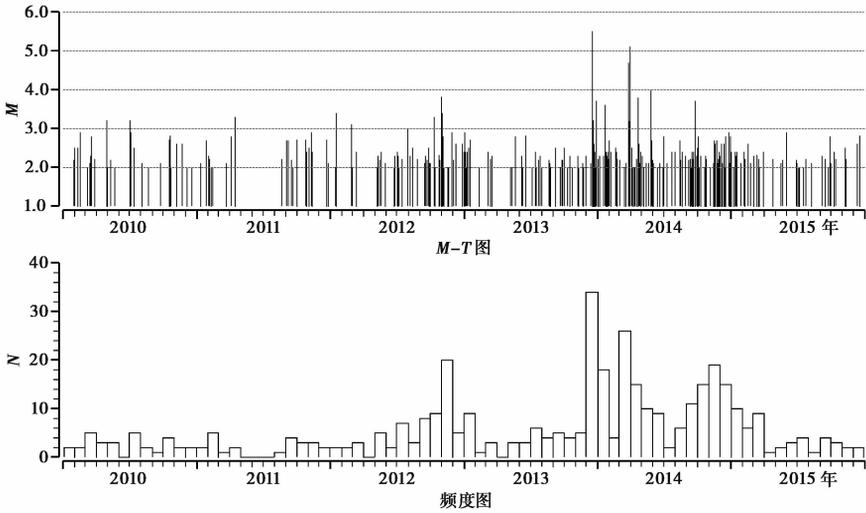


图2 三峡库区2010年1月1日至2015年12月30日地震活动性参数图

Fig. 2 Seismicity parameters in the Three Gorges reservoir area during 2010-01-01—2015-12-30.

2 计算方法及过程

首先,将波形数据进行傅里叶变换计算观测谱。然后,从观测谱中扣除传播路径效应和场地效应等因素的影响,得到地震震源位移谱;对于中小地震,震源位移谱符合 Brune 圆盘模型,震源位移谱 $\Omega(f)$ 可表示为(李艳娥等,2012a, b; 陈丽娟等,2015)

$$\Omega(f) = \frac{\Omega_0}{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2} \quad (1)$$

式(1)中, Ω_0 为离开震源质心单位距离处的震源位移谱低频水平; f_c 为震源位移谱的拐角频率。给定 Ω_0 和 f_c 即可确定震源谱。可采用以下方法确定 Ω_0 和 f_c 。

本文采用的数据为三分向速度记录,各个分向可以得到相应的速度谱,总的速度谱是各个分量速度谱的矢量合成,即

$$V(f) = \sqrt{V(f)_Z^2 + V(f)_{NS}^2 + V(f)_{EW}^2} \quad (2)$$

速度谱和位移谱 $\Omega(f)$ 的关系为

$$V(f) = 2\pi f \Omega(f) \quad (3)$$

所以可得到位移谱:

$$\Omega(f) = \frac{\sqrt{V(f)_Z^2 + V(f)_{NS}^2 + V(f)_{EW}^2}}{2\pi f} \quad (4)$$

在实际计算中,选取谱形状较好的台站进行计算,根据实际情况选取位移谱的低频段水平部分,低频范围假设为 $f_1 \sim f_2$,同时选取高频段的衰减起始频率 f_3 。在低频段($f_1 \sim f_2$), $\Omega(f) \approx \Omega_0$,则位移谱平方的积分为

$$SD = \int_{f_1}^{f_2} \Omega(f)^2 df = \Omega_0^2 (f_2 - f_1) \quad (5)$$

$$\Omega_0 = \sqrt{\frac{SD}{f_2 - f_1}} \quad (6)$$

对于实际位移谱的低频段水平部分, 用式(5)进行积分, 根据式(6)可得到位移谱零频极限值 Ω_0 。得到 Ω_0 后, 可以通过如下方法确定拐角频率 f_c , 在 $f_1 \sim f_3$ 频段范围, 将得到的 Ω_0 代入式(1)可得到这个频段内的理论值 Ω_{ii} , 而同频段内的实际观察谱为 Ω_i , 二者之间的距离可由式(7)计算:

$$R_\Omega = \sum_{i=1}^N (\Omega_i - \Omega_{ii})^2 \quad (7)$$

R_Ω 随频率变化, 当其最小时, 即说明理论值与实际观测值之间的偏差最小; 因此, 将 R_Ω 为最小值时的 f 值作为拐角频率 f_c 。

中小地震的地震矩可利用式(8)计算:

$$M_0 = \frac{4\pi\rho v^3 \Omega_0 d}{R} \quad (8)$$

式(8)中, ρ 为地壳密度; v 为 S 波速度; d 为震源距; R 为辐射因子。

对于 1 条数字化的速度波形地震记录, 在进行仪器响应校正、自由表面效应校正、介质衰减校正后, 其地震辐射能量可表示为

$$E_s = 4\pi\rho\beta \cdot 2 \int_0^\infty V(f)^2 df \quad (9)$$

具体在计算的过程中, 考虑到中小地震含有较多的高频成分, 有限的频带宽度可能会导致地震辐射能量低估, 所以在计算过程中还需考虑低频和高频补偿。在得到地震矩 M_0 和地震能量 E_s 后, 即可计算地震视应力:

$$\sigma_a = \mu \frac{E_s}{M_0} \quad (10)$$

式(10)中, μ 为剪切模量。具体对某次地震时, 一般会有多个台站记录到波形资料, 可根据上述方法分别求得每个台站的震源力学参数, 再由各台站的值求平均得到多台平均值。

采用上述方法, 我们计算了研究区域 2010 年以来近 6a 内 $M_L 2.0$ 以上地震的拐角频率、地震矩、地震能量以及视应力等震源动力学参数, 表 1 中给出了研究区域部分地震 ($M_L \geq 2.7$ 地震) 的震源动力学参数计算结果。其中, 研究区域 $M_L 2.0$ 以上地震视应力平均值为 0.05MPa, 这和华东地区视应力场平均值 0.08MPa(黄显良等, 2005)以及江西地区平均视应力 0.04MPa(汤兰荣等, 2007)非常接近。

3 三峡库区地震震源参数特征

地震震源参数与震级的关系国内外已有相关研究, 但地震震源参数和震级的相关性存在着地区差异, 图 3 给出了三峡库区 $M_L 2.0$ 以上地震事件各震源参数与震级的统计关系。

3.1 地震矩与震级的关系

图 3a 为研究区域地震矩与震级之间的定标关系图。从计算结果来看, 三峡库区地震矩的对数和震级基本呈现线性关系, 两者统计关系为 $\log M_0 = 0.85 \times M_L + 13.6$ 。表明该地区随着震级的增大, 地震矩也相应增大。定标关系的斜率可反映研究区域介质的非均匀度(钟羽云

表1 研究区域 $M_L \geq 2.7$ 地震的震源动力学参数计算结果Table 1 Seismic source dynamic parameters of $M_L \geq 2.7$ earthquakes in the study area

年	月	日	时	北纬 /(°)	东经 /(°)	震级 M_L	拐角频率 /Hz	零频极限 /m·s	地震矩 /PNm	地震能量 /TNm	视应力 /MPa
2010	2	16	9	31.03	110.57	2.9	3.097	0.054	8.464	0.822 8	0.030 9
2010	3	19	22	31.63	111.37	2.8	3.147	0.162	43.467	6.924 8	0.036 4
2010	7	2	4	31.05	110.58	3.2	2.549	0.154	20.545	6.264 5	0.059 7
2010	7	3	23	31.02	110.58	2.9	3.022	0.088	11.303	2.816 4	0.048 6
2010	10	17	17	31.08	110.90	2.7	3.225	0.134	17.452	1.774 8	0.031 3
2010	10	19	23	31.20	110.07	2.8	2.398	0.066	8.909	0.514 6	0.016 8
2011	1	27	17	31.20	110.78	2.7	3.238	0.057	6.535	1.068 8	0.058 2
2011	4	5	21	31.12	110.20	2.8	2.460	0.022	2.008	0.080 2	0.018 3
2011	4	16	6	31.20	110.28	3.3	2.293	0.131	13.929	2.117 5	0.052 8
2011	9	4	8	31.12	110.62	2.7	2.924	0.087	10.892	0.686 9	0.037 4
2011	9	6	21	31.17	110.22	2.7	2.342	0.023	1.250	0.060 8	0.016 3
2011	10	2	4	31.55	111.37	2.7	2.583	0.133	33.675	6.260 7	0.027 1
2011	10	25	11	31.28	110.80	2.7	3.206	0.062	6.485	1.515 6	0.057 8
2011	11	11	9	31.53	111.33	2.9	2.858	0.222	51.091	16.222 6	0.057 1
2011	12	22	8	31.53	111.28	2.7	3.116	0.292	76.154	30.289 2	0.092 0
2011	9	6	21	31.17	110.22	2.7	2.303	0.024	1.278	0.060 8	0.015 7
2012	10	11	22	31.02	111.00	3.3	3.167	0.160	27.295	9.799 6	0.071 9
2012	10	31	3	31.50	111.30	3.8	2.711	0.303	74.319	15.970 1	0.064 7
2012	10	31	5	31.50	111.30	3.3	1.958	0.094	24.663	0.481 0	0.005 9
2012	11	1	2	31.50	111.32	3.0	3.059	0.094	26.821	1.393 8	0.016 0
2012	11	1	3	31.50	111.32	3.1	2.938	0.106	26.079	1.873 9	0.020 6
2012	11	2	4	31.55	111.30	2.9	2.876	0.107	29.486	8.177 1	0.029 2
2012	11	3	20	31.53	111.32	2.8	3.081	0.070	17.520	1.263 1	0.019 4
2013	5	21	16	31.50	111.28	2.8	3.787	0.071	18.525	3.682 3	0.032 8
2013	6	18	8	31.22	110.22	2.8	2.560	0.037	4.833	0.224 4	0.012 7
2013	12	16	13	31.12	110.67	5.5	2.066	3.376	509.040	1 161.280 0	0.521 1
2013	12	16	13	31.13	110.60	3.0	4.425	0.016	1.378	0.269 6	0.116 5
2013	12	19	2	31.12	110.57	3.2	3.820	0.041	4.571	0.804 9	0.077 9
2013	12	27	17	31.15	110.60	3.4	3.136	0.130	14.823	3.045 1	0.144 2
2013	12	27	22	31.08	110.17	3.7	2.184	0.139	16.974	1.877 6	0.031 1
2014	1	20	20	31.13	110.73	3.6	2.891	0.253	30.719	17.690 4	0.182 4
2014	1	31	22	31.25	110.50	2.7	2.545	0.008	1.442	0.007 2	0.001 5
2014	3	27	0	31.53	111.28	4.7	2.523	3.950	1.181	2 674.103 0	0.509 2
2014	3	27	1	31.53	111.32	2.7	3.321	0.059	14.699	1.056 4	0.021 3
2014	3	27	1	31.53	111.32	3.5	3.080	0.315	79.090	33.764 8	0.106 0
2014	3	27	9	31.55	111.32	3.1	3.123	0.118	29.004	3.699 0	0.039 3
2014	3	27	18	31.53	111.32	3.2	3.204	0.209	51.926	13.931 9	0.069 2
2014	3	30	0	31.53	111.28	5.1	2.174	5.169	1.273	3 353.984 0	0.582 7
2014	4	21	0	31.15	110.48	3.8	2.987	0.442	47.798	38.329 8	0.300 1
2014	5	26	6	31.53	111.30	4.0	3.193	0.877	219.109	274.315 3	0.244 6
2014	5	29	15	31.10	110.57	2.7	3.002	0.051	4.011	0.524 1	0.031 9
2014	6	30	5	31.07	110.75	2.8	3.175	0.075	9.897	1.752 4	0.053 8
2014	8	14	12	31.55	111.32	2.7	2.902	0.516	126.155	145.122 8	0.059 9
2014	11	16	20	31.52	111.58	2.7	3.111	0.088	30.588	1.727 2	0.017 4
2014	11	23	19	31.12	110.65	2.7	3.365	1.108	73.808	399.475 7	0.326 6
2014	12	26	13	31.52	111.32	2.9	3.839	0.054	13.582	1.261 4	0.027 7
2015	6	2	5	31.48	111.35	2.9	2.897	1.183	289.088	847.121 9	0.166 5
2015	9	27	6	31.22	110.22	2.8	2.772	0.025	3.251	0.127 3	0.011 8

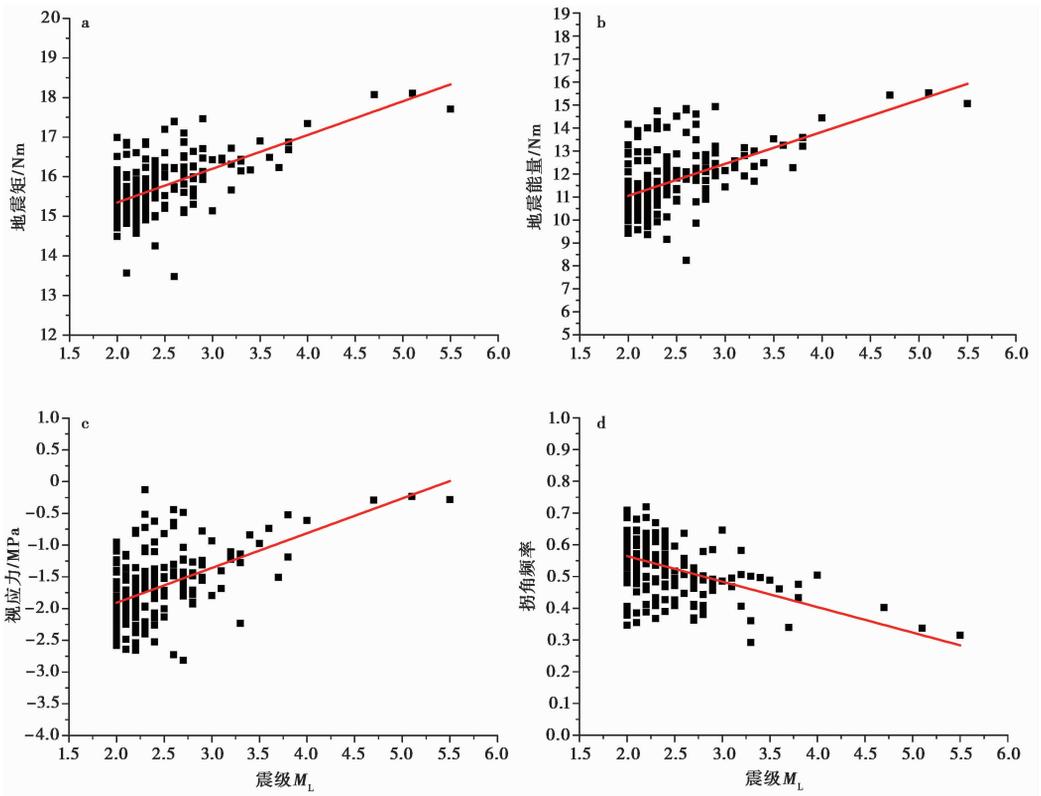


图 3 研究区震源动力学参数与震级之间的关系

Fig. 3 Relationship between seismic source dynamic parameters and magnitude.

等, 2004)。三峡地区地震矩与震级定标关系的斜率为 0.85, 低于中国平均水平(易桂喜等, 2011; 阮祥等, 2011; 王鹏等, 2014, 2015; 李艳娥等, 2015), 表明该地区介质的均匀度较好。

3.2 地震辐射能量、视应力与震级的关系

图 3b 和图 3c 分别为三峡地区地震辐射能量、视应力与震级之间的定标关系图, 根据计算结果, 它们的定标关系分别为 $\log E_s = 1.392 \times M_L + 8.213$, $\log \sigma_a = 0.548 \times M_L - 3.004$ 。三峡库区地震的辐射能量以及视应力均随震级的增大而增大。表明震级越大, 地震辐射的能量越多, 视应力越高; 如果个体地震与视应力出现非关联性, 可以考察其视应力是否存在异常特征。地震视应力随震级增大而增大意味着地震越大, 单位地震矩所释放的地震能量越多, 反映出大地震是比小地震具有更高效率的地震能量辐射体, 大地震和小地震可能在破裂速度等方面有较大差异。

3.3 地震拐角频率与震级的关系

图 3d 为三峡地区地震拐角频率与震级之间的定标关系图, 定标关系为 $\log f_c = -0.08 \times M_L + 0.725$ 。统计结果显示, 中小地震的拐角频率较大, 大地震往往拥有较小的拐角频率。此外, 不同类型地震的 P 波和 S 波拐角频率也会有差别(张丽芬等, 2013), 统计结果显示的三峡地区拐角频率与震级之间的定标关系斜率为 -0.08 , 计算结果低于中国其他非水库区域的计算结果(易桂喜等, 2011; 阮祥等, 2011; 王鹏等, 2014; 李艳娥等, 2015; 王鹏等, 2015), 这可能

和三峡库区 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 震级段的地震中含有部分水库诱发的塌陷型地震有关。

4 研究区域视应力的时空变化特征

4.1 地震前后视应力的空间分布

2013年12月16日湖北巴东发生 $M_L 5.5$ 地震, 2014年3月27日和3月30日, 湖北秭归先后发生 $M_L 4.7$ 和 $M_L 5.1$ 地震, 4个月内, 接连发生3次 $M_L 4.5$ 以上地震。以2013年12月16日湖北巴东 $M_L 5.5$ 地震和2014年3月30日湖北秭归 $M_L 5.1$ 地震为时间节点, 将时间段分成地震前、地震后及地震时3个时间段, 为消除余震对震后计算结果的影响, 具体计算时震后的时间起始时间从2014年4月10日开始计算。以 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的空间窗, 对视应力进行空间扫描, 可以得到研究区域视应力的空间分布(图4)。

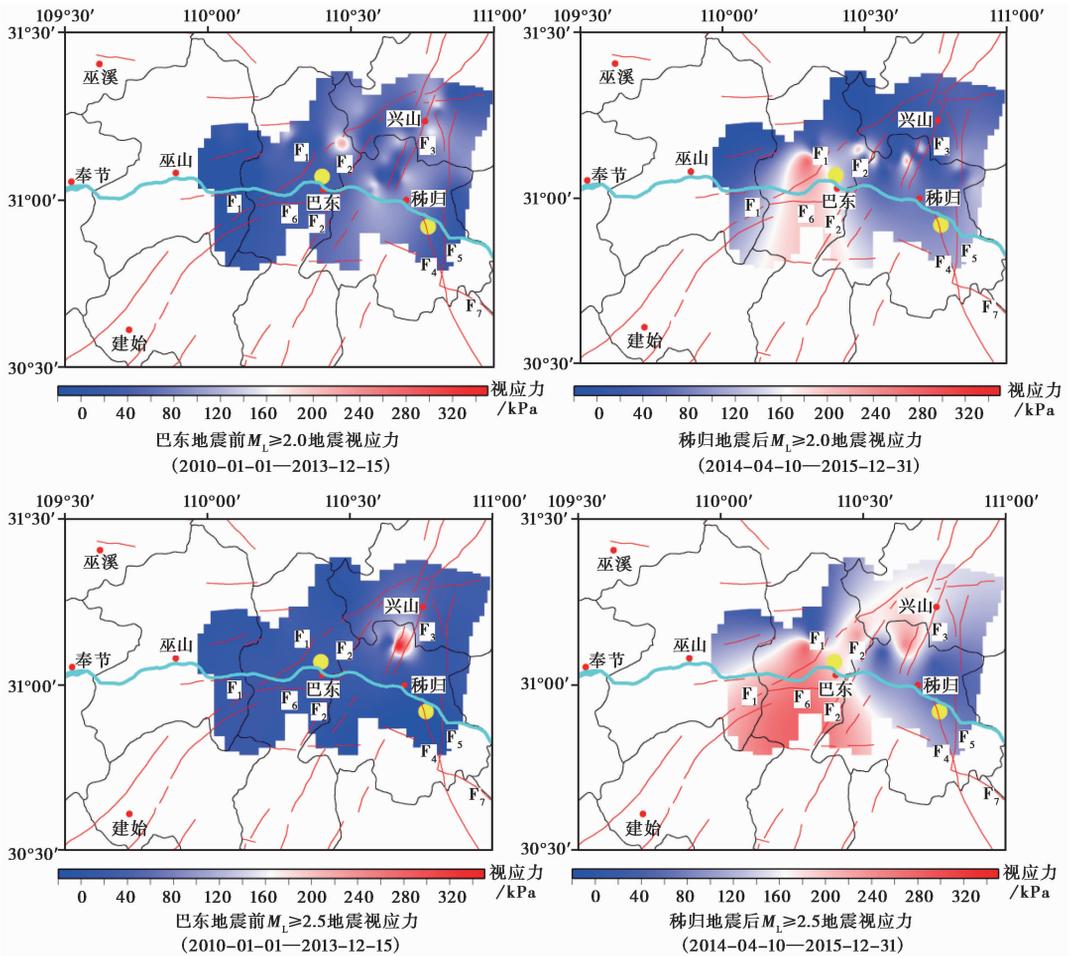


图4 研究区巴东、秭归地震前后 $M_L \geq 2.0$ 及 $M_L \geq 2.5$ 地震视应力空间分布

Fig. 4 The spatial distribution of apparent stress with $M_L \geq 2.0$ and $M_L \geq 2.5$ earthquakes in the study area before and after the Badong earthquake and Zigui earthquake.

结果显示,对于 $M_L \geq 2.0$ 的地震,巴东和秭归地震前视应力高值沿新华-水田坝断裂(F_3)及高桥断裂(F_1)走向展布,协同化程度较高, $M_L \geq 2.5$ 地震视应力主要集中在新华-水田坝断裂(F_3)带上。震后,无论是 $M_L \geq 2.0$ 地震,还是 $M_L \geq 2.5$ 以上地震的视应力高值分布均较为分散和无序。2013年12月16日湖北巴东 $M_L 5.5$ 地震发生在 $M_L \geq 2.0$ 地震视应力震前高桥断裂(F_1)高值异常体的边缘,而2014年3月27日和3月30日湖北秭归 $M_L 4.7$ 和 $M_L 5.1$ 地震均发生在新华-水田坝断裂(F_3)异常条带连线的南端附近。巴东和秭归地震后, $M_L \geq 2.0$ 地震和 $M_L \geq 2.5$ 地震计算所得视应力结果均显示,受巴东地震余震的影响,巴东地震震源体周边出现了非常显著的视应力高值区。

为了消除震级跨度对视应力计算结果的影响,综合考虑湖北省不同强度地震频次的实际情况,我们将研究区域地震震级按照 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 、 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 分段,通过不同震级段视应力的空间分布研究三峡地区巴东和秭归3次显著地震事件前震源体附近视应力的高值分布,以期最终获得具有指示意义的震级段视应力高值异常。分段计算的结果如图5所示。

巴东地震前, $M_L 2.0 \sim 2.4$ 、 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 两个震级段的视应力高值分布在新华-水田坝断裂(F_3)和巴东高桥断裂(F_1)上。震后, $M_L 2.0 \sim 2.4$ 震级段高桥断裂(F_1)高值异常消失,新华-水田坝断裂(F_1)和周家山断裂(F_2)出现新的高值区;受余震的影响, $M_L 2.5 \sim 3.5$ 震级段视应力在巴东地震震源体附近的高桥断裂(F_1)中段以及周家山断裂(F_2)出现大面积高值。

4.2 研究区域地震视应力随时间的变化

为剔除主震本身以及震级差异性对计算结果的影响,我们将震级分为 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 、 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 两个震级段进行研究,由图6可知, $M_L 2.5 \sim 3.5$ 震级段地震视应力平均值要大于 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 震级段,视应力随着震级的增加而增加,这与前人的研究结果是一致的,也间接证实了本文计算视应力方法的可行性以及震级分段研究的必要性。

由图6a所示,研究区域内 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 地震视应力2011年之前一直较为稳定,2011年1月份开始下降,2014年11月底降至最低,然后开始缓慢抬升,上升过程中先后发生2013年12月16日湖北巴东 $M_L 5.5$ 地震,2014年3月27日、3月30日湖北秭归 $M_L 4.7$ 、 $M_L 5.1$ 地震,震后研究区域视应力开始缓慢下降,2015年6月左右恢复到震前水平。 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 地震视应力计算结果受研究区域地震个数的影响,曲线的采样率虽然不高,但从曲线的整体趋势仍可以看出2012年之前研究区域视应力一直较为稳定,2012年1月份开始下降,2013年6月份左右降至最低,然后开始抬升,同样也是在上升的过程中先后发生巴东地震和秭归地震,震后2015年下半年度视应力恢复到震前的平均水平。研究区域 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 震级段地震视应力震前开始抬升的拐点比 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 时间段计算结果提前(图6b),这可能是受该时间段 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 震级段地震数量少导致采样率低所致;即便如此,从图像的整体变化特征仍能看出 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 、 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 两个震级段地震视应力随时间的变化同步性较好。研究区域视应力经历了明显的“上升-下降”变化过程。这种变化过程说明视应力在研究区域内巴东和秭归地震前有明显的升高异常变化。

4.3 研究区域视应力深度剖面分布特征

基于研究区域 $M_L 2.5$ 以上地震精定位结果,将NE向新华-水田坝断裂(F_3 ,图1)以及长江附近50km范围内地震分别投影到沿断裂和长江的剖面上分析视应力的深度变化特征,以新华-水田坝断裂和长江为横坐标,震源深度为纵坐标,色标为视应力的大小,地震资料选用时

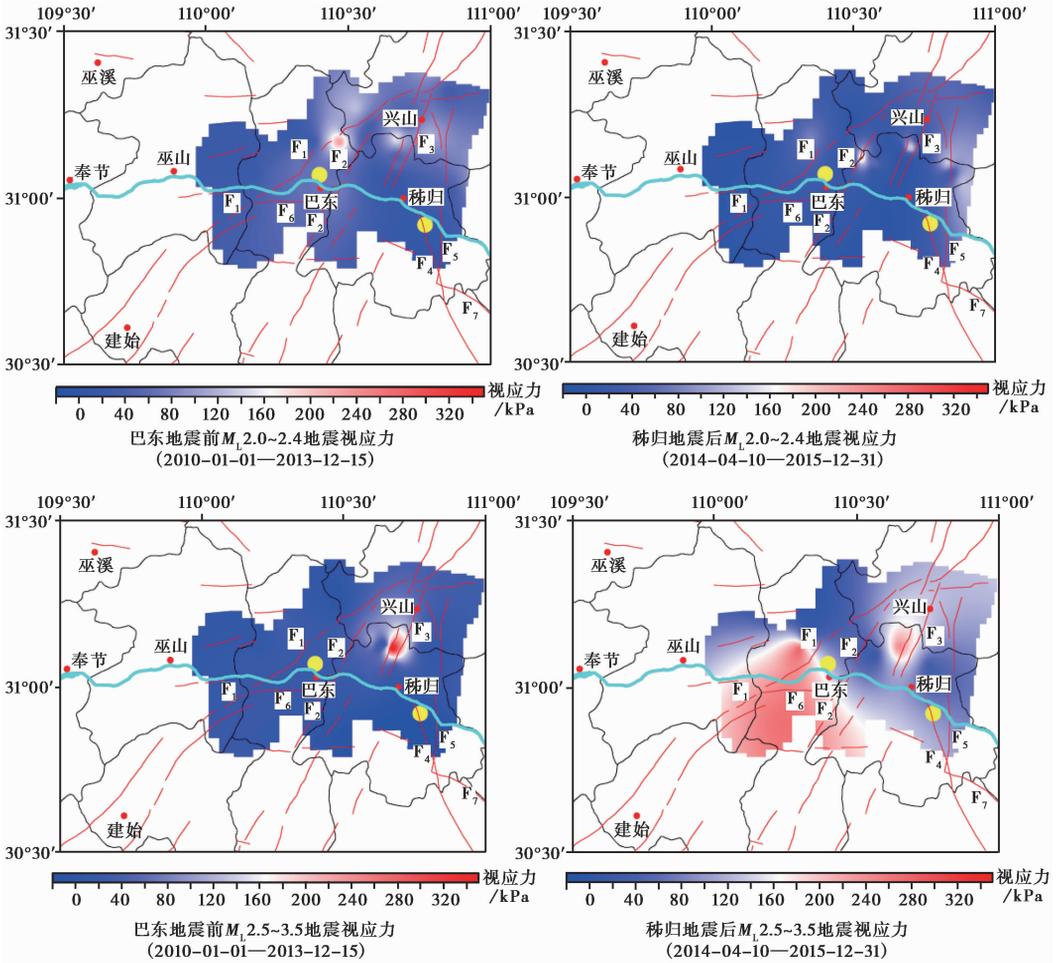


图5 研究区域巴东、秭归地震前后 $M_L 2.0 \sim 2.4$ 和 $M_L 2.5 \sim 3.5$ 震级范围内地震视应力空间分布

Fig. 5 The spatial distribution of apparent stress with $M_L 2.0 \sim 2.4$ and $M_L 2.5 \sim 3.5$ earthquakes in the study area before and after the Badong earthquake and Zigui earthquake.

间段从2010年1月1日至2015年12月31日。从图7、8可以看出，剖面在两河口、水田坝以及信陵镇和郭家坝下方出现视应力的高值集中区域，这跟研究区内秭归双震和巴东地震视应力相关。此外，值得关注的是，图7显示巴东及秭归地震震源体附近或周边出现了地震视应力高值副中心，经核实主要和巴东地震以及秭归地震各自的几次 $M_L 3.0$ 以上的余震有关。震后，2条深度剖面视应力的高值和震级基本呈现正相关，属于低应变释放背景下的低应力释放，震后未出现“小震级大视应力”的现象，未新增视应力高值异常区域。

4.4 研究区水位涨落期间视应力变化特征

为研究三峡蓄水对研究区域视应力的影响，选取低水位期和高水位期2个时间段进行对比研究。低水位与高水位期视应力计算结果分别为2010—2015年6a低水位期(6月1日至8月31日)76个和高水位期(10月1日至次年1月31日)127个地震视应力的累计结果。低水

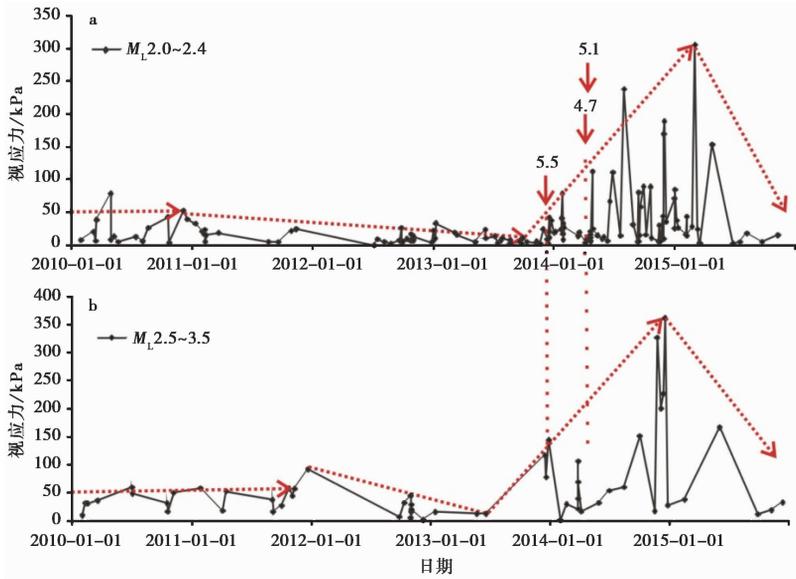


图 6 研究区域不同震级段视应力随时间的变化

Fig. 6 The changes of apparent stress with different magnitudes in the study area.

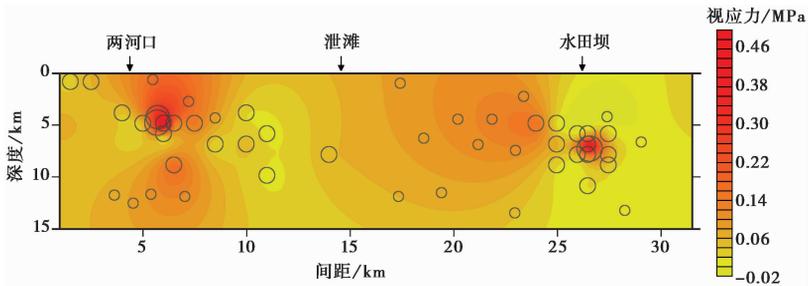


图 7 研究区域视应力沿新华-水田坝断裂深度剖面分布图(2010-01-01—2015-12-31)

Fig. 7 The depth profiles of apparent stress along Xinhua-Shuitianba Fault in the area(2010-01-01—2015-12-31).

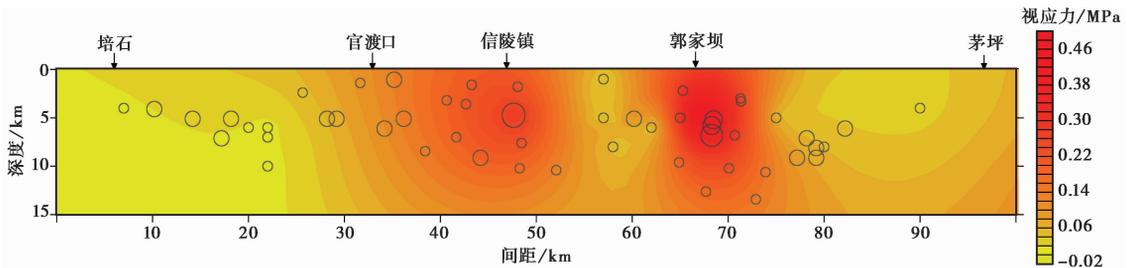


图 8 研究区域视应力沿长江深度剖面分布图(2010-01-01—2015-12-31)

Fig. 8 Depth profiles of apparent stress along the Yangtze River in the study area(2010-01-01—2015-12-31).

位运行期坝前水位维持在 145m 左右, 高水位运行期坝前水位为 165~175m。

计算结果显示: 低水位运行期间, 兴山县境内视应力局部出现高值, 整个库区其他区域视应力分布较为均匀; 高水位运行期间, 巴东高桥断裂沿线出现高值; 值得关注的是, 巴东、秭归长江沿线库岸 10km 范围内视应力分布和水位高低无明显关系。

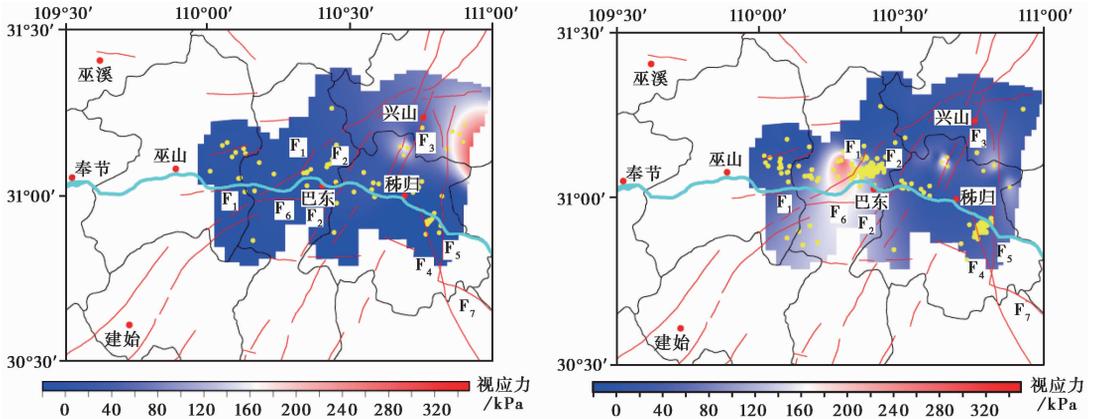


图9 研究区域水位涨落期间 $M_L 2.0 \sim 3.0$ 震级范围内地震视应力空间分布

Fig. 9 The spatial distribution of apparent stress with $M_L 2.0 \sim 3.0$ earthquakes in the study area before and after the impoundment of the Three Gorges Reservoir.

5 结论

三峡库区地震成因较为复杂, 既有天然构造地震, 也有因蓄水导致的塌陷、边坡失稳等水库地震, 同时也包含蓄水因素诱发的构造地震。通过对三峡库区 2010 年 1 月 1 日至 2015 年 12 月 31 日 $M_L 2.0$ 以上地震震源参数的计算, 得到了三峡库区 $M_L 2.0$ 以上地震的地震矩、辐射能量、拐角频率、视应力等震源参数, 三峡库区主要震源参数和震级的统计结果以及三峡库区视应力的时空分布总结得出以下结论:

(1) 三峡地区拐角频率的对数和震级的定标关系斜率为 -0.08 , 该值低于中国非水库地区的计算结果, 这与三峡库区 $M_L 2.0 \sim 2.5$ 震级段地震含有部分塌陷地震事件有关。

(2) 三峡库区视应力空间分布显示, 巴东地震以及秭归地震震前, 三峡库区不同震级段地震视应力在巴东和秭归地震震源体附近或周边出现高值集中现象, 高值分别沿高桥断裂带和新华-水田坝断裂分布且协同化程度震前较高, 震后分布较为零散, 表明该区域在震前积累了较高的应力。巴东地震和秭归地震震中分别位于高桥断裂高值异常体边缘和新华-水田坝断裂异常条带延长线附近, 这可能与震源体在应力的长期连续作用下, 弹性应变不断积累, 导致构造的突然失稳破裂有关。考虑到地震孕育的复杂性, 单纯的依赖视应力的空间分布, 很难确定具体的发震构造。

(3) 三峡库区视应力的时间序列显示, 从 2013 年底至 2015 年初, 研究区域应力经历了 1 个“上升-下降”过程, 在应力上升初期发生了巴东 $M_L 5.5$ 、秭归 $M_L 4.7$ 以及 $M_L 5.1$ 等 3 次显著地震。

(4) 一般情况下, 震级相当时, 视应力值相对高的震源区应力水平高; 视应力值相等时,

震级较低的震源区应力水平高。研究区域视应力的深度投影显示, 巴东及秭归地震震后, 该区域中小地震的视应力和震级呈现较好的正相关性, 未出现“小地震大视应力”的现象, 未新增明显视应力异常集中区域, 目前三峡库区仍处于巴东 $M_s5.1$ 地震震后的调整阶段, 综合考虑三峡库区历史地震背景, 短期内三峡库区发生破坏性地震的可能性不大。

(5) 三峡水位不同区间视应力对比分析结果显示, 三峡水位涨落对三峡库区长江沿岸视应力分布影响有限。表明巴东、秭归地震前库区视应力空间异常和三峡蓄水关联不大, 巴东、秭归地震的主要成因为区域构造应力调整, 巴东、秭归地震均为构造地震。

致谢 中国地震局地球物理勘探中心姚家骏老师对本文提供了全程指导, 审稿专家提出的修改意见对稿件质量的提升帮助很大, 在此表示衷心感谢。

参 考 文 献

- 陈俊华, 陈正松, 蒋玲霞, 等. 2014. 巴东 $M_s5.1$ 地震成因研究 [J]. 大地测量与地球动力学, 34(3): 10—14.
- CHEN Jun-hua, CHEN Zheng-song, JIANF Ling-xia, *et al.* 2014. On causes of Badong $M_s5.1$ earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 34(3): 10—14(in Chinese).
- 陈丽娟, 李艳娥, 杨立明, 等. 2015. 2013年7月22日岷县 $M_s6.6$ 地震前后视应力研究 [J]. 地震, 35(4): 30—42.
- CHEN Li-juan, LI Yan-e, YANG Li-ming, *et al.* 2015. Temporal-spatial variations of apparent stress before and after the 22 July 2013 Minxian $M_s6.6$ earthquake [J]. Earthquake, 35(4): 30—42(in Chinese).
- 陈蜀俊, 姚运生, 吴建超, 等. 2014. 巴东 $M_s5.1$ 地震: 一种新的水库地震类型 [J]. 大地测量与地球动力学, 34(3): 1—5.
- CHEN Shu-jun, YAO Yun-sheng, WU Jian-chao, *et al.* 2014. Badong $M_s5.1$ earthquake: A new type of reservoir earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 34(3): 1—5(in Chinese).
- 陈学忠, 李艳娥. 2007. 2006年7月4日河北文安 $M_s5.1$ 地震前震中周围地区小震视应力随时间的变化 [J]. 中国地震, 23(4): 327—336.
- CHEN Xue-zhong, LI Yan-e. 2007. Temporal changes in apparent stresses of small earthquakes around the epicentral area prior to the July 4, 2006 Wen'an, Hebei earthquake ($M_s = 5.1$) [J]. Earthquake Research in China, 23(4): 327—336(in Chinese).
- 华卫, 陈章立, 郑斯华, 等. 2010. 三峡水库地区震源参数特征研究 [J]. 地震地质, 32(4): 533—542. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2010.04.001.
- HUA Wei, CHEN Zhang-li, ZHENG Si-hua, *et al.* 2010. A study on characteristics of source parameters in the Three Gorges reservoir area [J]. Seismology and Geology, 32(4): 533—542(in Chinese).
- 黄显良, 刘东旺, 沈小七, 等. 2005. 华东地区视应力场的研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 26(6): 29—32.
- HUANG Xian-liang, LIU Dong-wang, SHEN Xiao-qi, *et al.* 2005. The study on the apparent stress field in East China [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 26(6): 29—32(in Chinese).
- 雷东宁, 陈俊华, 张丽芬, 等. 2014. 湖北巴东 $M_s5.1$ 地震构造背景分析 [J]. 大地测量与地球动力学, 34(3): 6—9, 14.
- LEI Dong-ning, CHEN Jun-hua, ZHANG Li-fen, *et al.* 2014. Analysis of seismogenic background of Badong $M_s5.1$ earthquake [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 34(3): 6—9, 14(in Chinese).
- 李艳娥, 陈丽娟, 王生文, 等. 2015. 山东地区地震视应力时空变化特征研究 [J]. 地震, 35(2): 80—90.
- LI Yan-e, CHEN Li-juan, WANG Sheng-wen, *et al.* 2015. Temporal and spatial variations of apparent stress in

- Shandong Province, China [J]. *Earthquake*, 35(2): 80—90(in Chinese).
- 李艳娥, 陈学忠, 付虹. 2012a. 2007年云南宁洱 M_s 6.4地震前滇西南地区震源动力学参数时空变化特征 [J]. *地震*, 32(1): 28—39.
- LI Yan-e, CHEN Xue-zhong, FU Hong. 2012a. Temporal and spatial variation of focal dynamic parameters in southwest Yunnan before the 2007 M_s 6.4 Ning'er earthquake [J]. *Earthquake*, 32(1): 28—39(in Chinese).
- 李艳娥, 陈学忠, 王恒信. 2012b. 汶川 8.0级地震前四川地区地震视应力时空变化特征 [J]. *地震*, 32(4): 113—122.
- LI Yan-e, CHEN Xue-zhong, WANG Heng-xin. 2012b. Temporal and spatial variation of apparent stress in Sichuan area before the M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Earthquake*, 32(4): 113—122(in Chinese).
- 刘红桂, 刘杰, 丁页岭, 等. 2006. 地震视应力在云南地震序列中的前兆特征 [J]. *地震学报*, 28(5): 462—471.
- LIU Hong-gui, LIU Jie, DING Ye-ling, *et al.* 2006. Precursory specialties of apparent stresses in Yunnan earthquake series [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 28(5): 462—471(in Chinese).
- 刘红桂, 王培玲, 杨彩霞, 等. 2007. 地震视应力在地震预测中的应用 [J]. *地震学报*, 29(4): 437—445.
- LIU Hong-gui, WANG Pei-ling, YANG Cai-xia, *et al.* 2007. Application of apparent stress in earthquake prediction [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 29(4): 437—445(in Chinese).
- 阮祥, 程万正, 乔惠珍, 等. 2011. 安宁河-则木河地震带震源参数及应力状态的研究 [J]. *西北地震学报*, 33(1): 46—50.
- RUAN Xiang, CHENG Wan-zheng, QIAO Hui-zhen, *et al.* 2011. Research on source parameters and stress state in Anninghe-Zemuhe earthquake belt [J]. *Northwestern Seismological Journal*, 33(1): 46—50(in Chinese).
- 汤兰荣, 杨锐, 杨雅琼, 等. 2007. 九江-瑞昌地震序列的视应力变化研究 [J]. *华南地震*, 27(4): 19—27.
- TANG Lan-rong, YANG Rui, YANG Ya-qiong, *et al.* 2007. A study on the variations in apparent stress of Jiujiang-Ruichang seismic sequence [J]. *South China Journal of Seismology*, 27(4): 19—27(in Chinese).
- 王鹏, 郑建常. 2014. 鲁东地区视应力时空变化特征分析 [J]. *地震*, 34(4): 70—77.
- WANG Peng, ZHENG Jian-chang. 2014. Temporal and spatial variation of apparent stress in eastern Shandong Province [J]. *Earthquake*, 34(4): 70—77(in Chinese).
- 王鹏, 郑建常, 刘希强, 等. 2015. 郯庐断裂带山东段震源参数及应力状态 [J]. *地震地质*, 37(4): 966—981. doi: 10.3969/j.issn.0253-4967.2015.04.003.
- WANG Peng, ZHENG Jian-chang, LIU Xi-qiang, *et al.* 2015. Research of source parameters and stress state in Shandong segment of Tanlu fault zone [J]. *Seismology and Geology*, 37(4): 966—981(in Chinese).
- 吴忠良. 2001. 由宽频带辐射能量目录和地震矩目录给出的视应力及其地震学意义 [J]. *中国地震*, 17(1): 8—15.
- WU Zhong-liang. 2001. Apparent stress obtained from broadband radiated energy catalogue and seismic moment catalogue and its seismological significance [J]. *Earthquake Research in China*, 17(1): 8—15(in Chinese).
- 吴忠良, 黄静, 林碧苍. 2002. 中国西部地震视应力的空间分布 [J]. *地震学报*, 24(3): 293—301.
- WU Zhong-liang, HUANG Jing, LIN Bi-cang. 2002. Distribution of apparent stress in western China [J]. *Acta Seismologica Sinica*, 24(3): 293—301(in Chinese).
- 易桂喜, 闻学泽, 辛华, 等. 2011. 2008年汶川 M_s 8.0地震前龙门山-岷山构造带的地震活动性参数与地震视应力分布 [J]. *地球物理学报*, 54(6): 1490—1500.
- YI Gui-xi, WEN Xue-ze, XIN Hua, *et al.* 2011. Distributions of seismicity parameters and seismic apparent stresses on the Longmenshan-Minshan tectonic zone before the 2008 M_s 8.0 Wenchuan earthquake [J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 54(6): 1490—1500(in Chinese).

- 岳晓媛, 武安绪, 冯刚, 等. 2016. 首都圈中强震前后视应力时空演化过程研究 [J]. 地震, 36(2): 119—131.
- YUE Xiao-yuan, WU An-xu, FENG Gang, *et al.* 2016. Temporal-spatial evolution of apparent stresses before moderate-strong earthquakes in the capital circle area of China [J]. Earthquake, 36(2): 119—131 (in Chinese).
- 张丽芬, 姚运生, 李井冈, 等. 2013. 三峡库区构造和塌陷地震的拐角频率特征 [J]. 大地测量与地球动力学, 33(2): 27—30, 40.
- ZHANG Li-fen, YAO Yun-sheng, LI Jing-gang, *et al.* 2013. Corner frequency characteristic of tectonic earthquakes and collapsed ones in Three Gorges region [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 33(2): 27—30, 40 (in Chinese).
- 赵凌云, 张辉, 陈俊华, 等. 2014. 基于 CAP 方法的 2013 湖北巴东 5.1 级地震震源机制与发震构造研究 [J]. 地震工程学报, 36(4): 1014—1018.
- ZHAO Ling-yun, ZHANG Hui, CHEN Jun-hua, *et al.* 2014. Focal mechanism solutions and seismogenic structure of the Badong M_s 5.1 earthquake of 2013 using the CAP method [J]. China Earthquake Engineering Journal, 36(4): 1014—1018 (in Chinese).
- 钟羽云, 朱新运, 张震峰. 2004. 不同类型地震的地震矩: 震级标度关系研究 [J]. 西北地震学报, 26(1): 57—61.
- ZHONG Yu-yun, ZHU Xin-yun, ZHANG Zhen-feng. 2004. Study on relations between seismic moment and magnitude for various types of earthquake sequence [J]. Northwestern Seismological Journal, 26(1): 57—61 (in Chinese).
- Choy G L, Boatwright J L. 1995. Global patterns of radiated seismic energy and apparent stress [J]. Journal of Geophysical Research, 100(B9): 18205—18228.

APPARENT STRESS VARIATION CHARACTERISTICS BEFORE AND AFTER BADONG EARTHQUAKE IN THE THREE GORGES RESERVOIR AREA

DAI Miao^{1,2,3)} WU Gui-ju¹⁾ LIU Jian¹⁾ SHEN Chong-yang¹⁾
SUN Shao-an¹⁾ SHEN Xue-lin^{1,2,3)} WEI Gui-chun^{1,2,3)}

1) *Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

2) *Hubei Key Laboratory of Earthquake Early Warning, Institute of Seismology, China Earthquake Administration, Wuhan 430071, China*

3) *Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071, China*

Abstract

The causes of earthquakes in the Three Gorges reservoir area are complex. In order to study the cause of earthquakes happening in the region, we calculated the source parameters of 394 $M_L \geq 2.0$ earthquakes occurring in Three Gorges reservoir area based on waveform data observed by the regional seismic network of Hubei Province and Three Gorges, obtained the apparent stress spatial-temporal variation map of Three Gorges reservoir area, and analyzed apparent stress spatial-temporal variation characteristics before and after the main earthquakes in the Three Gorges reservoir area. The results show that: 1) Before the Badong $M_L 5.5$, Zigui $M_L 4.7$ and Zigui $M_L 5.1$ earthquake, high apparent stress of earthquakes with different magnitudes is concentrated in Xinhua-Shuitianba Fault and Gaoqiao Fault. The distribution of high value area shows the high degree of synergism before the earthquake and the scattering after the earthquake, which indicates that the area accumulated a high stress before the earthquake, and the fault was in a locked state; 2) In the study area, the apparent stress before and after the earthquake showed significant rise in the first and then decline, the earthquake occurred in the process of rising; 3) Apparent stress depth profiles show that apparent stress at different depths has a positive correlation with the size of magnitude of earthquake, and the phenomenon of "small magnitude and strong apparent stress" did not appear. The small earthquakes occurring after the major earthquakes in the study area belong to low strain release under the background of low stress release, and there are no new apparent stress anomaly concentration areas appearing, this indicates that the Badong-Gaoqiao Fault, Zhoujiashan-Niukou Fault and Zigui Xiannushan Fault have been effective in releasing after the Badong earthquake and Zigui earthquakes and the probability of destructive earthquake is small on these faults.

Key words apparent stress, spatial-temporal feature, Three Gorges, Badong earthquake

[作者简介] 戴苗,男,1982年生,2008年于中国地质大学获固体地球物理学硕士学位,工程师,主要从事测震学理论、方法和应用研究,E-mail:theocean123@163.com。