

巴东 Ms5.1 地震成因研究^{*1}

陈俊华^{1,2)} 陈正松^{1,2)} 蒋玲霞^{1,2)} 吴海波^{1,2)} 乔岳强^{1,2)} 贾治革^{1,2)}

(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) 湖北省地震局, 武汉 430071

摘要 2013年12月16日巴东县发生 Ms5.1 级地震,震中区记录到大量余震,余震的频次、强度随时间呈起伏衰减。地震在空间上近 NEE 向分布,集中于高桥断裂南端及大坪断裂附近, M_L2 级以上地震的震源深度分布在 5 ~ 7 km 之间。综合震中区的地质构造背景及时序分析、地震精定位、地震频谱分析及震源机制解等研究结果判定巴东 Ms5.1 地震为层间滑脱型水库地震。

关键词 地震序列;精定位;震源体;频谱;震源机制

中图分类号:P315.3 **文献标识码**:A

ON CAUSES OF BADONG Ms5.1 EARTHQUAKE

Chen Junhua^{1,2)}, Chen Zhengsong^{1,2)}, Jiang Lingxia^{1,2)}, Wu Haibo^{1,2)}, Qiao Yueqiang^{1,2)} and Jia Zhige^{1,2)}

(1) Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071
(2) Earthquake Administration of Hubei Province, Wuhan 430071

Abstract The Ms5.1 earthquake occurred on December 16, 2013, Badong Country. The epicentral area has recorded a large number of aftershocks. The frequency and magnitude of the aftershocks were attenuated ups and downs. The Ms5.1 earthquake event located in NEE direction near the southern tip of Gaoqiao fault and Daping fault. The depth of earthquake that greater than or equal to M_L2 were mainly distributed in 5 to 7 km. According to the geological structure background of the event and the results of earthquake time series analysis, precise positioning, the spectrum analysis and focal mechanism solutions, the Ms5.1 earthquake is interlayer slip type reservoir earthquake.

Key words: earthquake sequence; precise positioning; source body; spectrum; focal mechanism solution

巴东 Ms5.1 地震是三峡水库区湖北库段连续第 4 年成功蓄水到 175 m 水位后记录到的最大一次地震,蓄水至 175 m 之前该库段记录到的最大水库地震仅为 2005 年 $M_L3.5$ ^[1]。地震发生后,震中附近记录到大量余震,本文通过对 Ms5.1 地震序列进行时序分析、地震精定位、震源参数分析,结合该地区的地震地质背景,对地震成因进行了初步分析。

1 巴东 Ms5.1 地震序列时序特征

巴东 5.1 级地震的余震震级在 $M_L0.2 \sim M_L3.6$ 范围内,以 $M_L0.5 \sim M_L2.5$ 次数最多,最大余震 $M_L3.6$ 发生在主震后第 35 d。高水位运行期间,地震序列的强度频次较高,地震序列余震发育,地震日频次和地震强度呈起伏状衰减(图 1)。

* 收稿日期:2014-03-17

基金项目:中国长江三峡工程开发总公司专项(SXSN/3354);中国地震局地震研究所所长基金项目(IS201226108,IS201246114)。

作者简介:陈俊华,女,1973年,高级工程师,主要从事地震活动性研究及水库地震研究。E-mail: cjhmails@163.com。

通讯作者:陈正松,男,1983年,助理研究员,主要从事地震大地测量研究。E-mail: chenzs@qq.com。

根据震级-频度关系^[2-3],本次地震序列拟合的 a 值为 3.302 1,表现出地震序列的活动水平以微震、极微震为主; b 值为 0.835 8,大于一般构造地震,表现为水库地震特征。

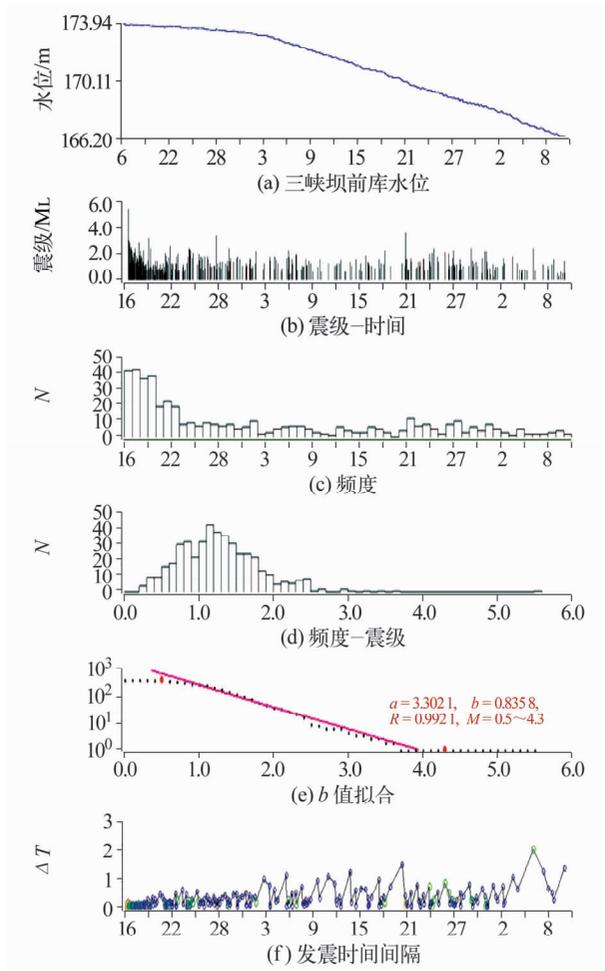


图1 三峡坝前库水位与地震参数图

Fig.1 Map of the Three Gorges reservoir water level and earthquake parameters

2 震源体及 $M_L 2.0$ 以上地震迁移过程

根据三峡数字遥测地震台网茅山岭、淹水塘、梅花山、百佛寺及郑家坪等 5 个台站的震相数据,采用单纯形法对 Ms5.1 地震序列的 $M_L 2.0$ 以上地震进行精确定位,精度为 I 类,地震震中在平面上的展布方向为 NEE 向,长度约 13 km,宽度约 3 km,主要位于大坪断裂的上盘及高桥断裂的下盘,主震距大坪断裂不到 2 km,距高桥断裂约 8 km,震中区出露地层主要为巴东组 T_2b 和侏罗系 J_1 。 $M_L 2.0$ 以上地震的深度分布在 5 km 至 7 km 之间,平均震源深度约 5.8 km(图 2)。

地震序列的能量主要于主震发生的当天在近 EW 向、长度约 9.9 km、宽度约 1.4 km、深度在 5~7 km 的范围内释放,随后的 1 个月地震还是在这个范

围活动,之后 5 d 略向东北方向迁移,最后又回到原震源体范围内释放后续的区域应力调整的能量。

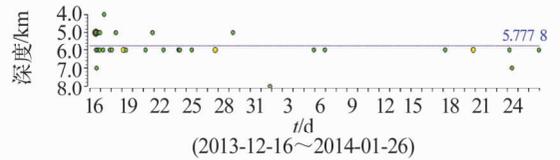


图2 地震深度分布图

Fig.2 Map of focal depth

3 主震类型分析

根据三峡库区构造型和塌陷型地震波形统计特征,库区构造型地震的 P 波垂直向初动有向上也有向下,塌陷型地震在所有的方位上 P 波垂直向初动基本向下;构造型地震事件的 P 波和 S 波拐角频率绝大多数在 5.0 Hz 以上,塌陷型地震 P 波、S 波拐角频率主要在 3.0~5.0 Hz 之间,巴东地区地震的拐角频率更低^[4-5]。

三峡遥测地震台网和湖北省数字台网对主震 Ms5.1 有 44 个 P 波初动的清晰记录,其中初动向上的有 25 次,初动向下的有 19 次,近台以初动向下居多,远台以初动向上居多。

选用湖北省遥测地震台网的兴山台记录的 Ms5.1 地震波形进行频谱分析,兴山台位于 Ms5.1 的 NE 方向,震中距 49 km。其记录波形的水平向和垂直向优势频率分别为 1.9 和 0.4 Hz,两方向的频率在 0.1~10 Hz 之间,高频成分不发育,衰减较快,峰值频率分别为 0.4 和 0.6 Hz,拐角频率分别为 1.4 和 1.2 Hz(图 3)。

波形和频谱特征分析表明巴东 Ms5.1 主震的近台记录以 P 波初动向下居多,优势频率偏低,频率较单一,高频成分不发育,拐角频率低于 1.5 Hz,与塌陷型水库地震接近。

4 主震震源机制解分析

依据三峡遥测地震台网及湖北省地震台网近台 P 波初动求解震源机制解如图 4。巴东 Ms5.1 地震的断层节面 1 走向 117° ,倾角 28° ,滑动角 -136° ;断层节面 2 走向 347° ,倾角 71° ,滑动角 -68° 。在 NNE 向的主张应力和 NNW 向的主压应力作用下,具有正断倾滑性质,2 条节理面与震中区域最近的 NE 向高桥断裂及近 EW 向大坪断裂的断层走向不一致,推断其与塌陷诱发地震常有的拉张型正断错动性质相似。

三峡水库蓄水之前,根据文献^[6-7]的研究,巴东地区的现代地壳构造应力场主要受黄陵背斜

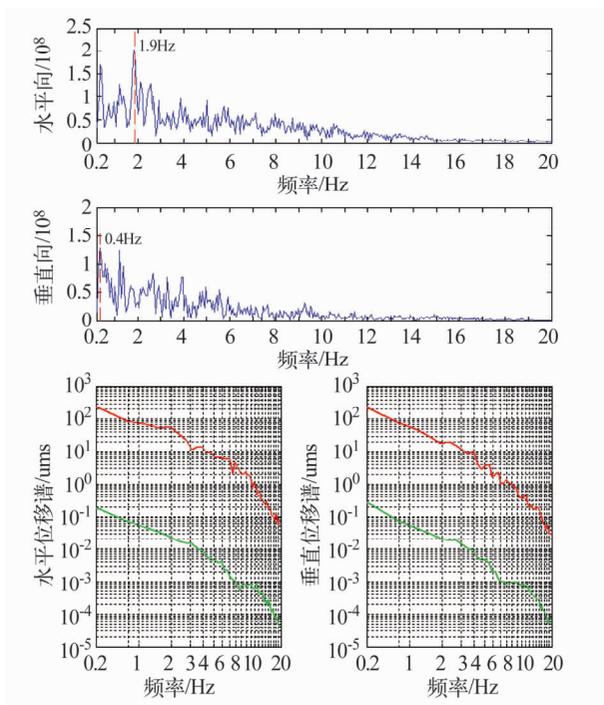


图3 兴山台记录的 Ms5.1 地震频谱

Fig. 3 The spectrum of Ms5.1 earthquake recorded by Xingshan station



图4 巴东 Ms5.1 地震震源机制解结果

Fig. 4 Focal mechanism solution of Badong Ms5.1 earthquake

的影响,在黄陵背斜以西地区,主压应力为 NNW-SSE 方向,主张应力为 NE-SW 方向;NNW 和 NNE 走向的两组断裂分别显示为右旋走滑和左旋走滑活动。震源错动性质为:NNW 向的节面以右旋走滑为主;NE 向的节面则以左旋走滑为主。巴东 Ms5.1 地震震源机制解的主张应力走向及主压应力走向与蓄水之前巴东区域的构造应力场背景有近似性。

5 成因讨论

巴东 Ms5.1 地震等震线长轴呈近 EW-NWW 向展布,长轴约 3.9 km,短轴约 2.4 km,面积约 7.7 km²[8]。地震位于长江左岸,距长江干流约 4.3 km,距三峡大坝约 66 km。主震之后,截至 2014-02-10,共记录到 M_L0 以上余震 481 次,其中, M_L0 ~ 1.9 地

震 436 次, M_L2 ~ 2.9 地震 41 次, M_L3 ~ 3.9 地震 4 次,最大余震为 2014-01-20 巴东东瀼口 M_L3.6 地震,位于 Ms5.1 主震的 NW 向 2.4 km 处,另外 3 次 M_L3 以上余震均发生在主震西部。

震中区的地震主要呈 NEE 向带状分布穿越神农溪和东瀼河,绝大部分地震位于长江左岸(图 5)。震中区及其周边区域地质构造复杂,主要分布以 NE 向的高桥断裂及 NEE 向的周家山-牛口断裂为主,其次为近 EW 向的大坪断裂及马鹿池断裂。

高桥断裂全长 40 km,断裂总体走向 NE 45° ~ 60°,倾向 SE,倾角 50° ~ 65°;断裂破碎带一般宽 50 ~ 100 m,局部可达 650 m,由主断面和多条分支断面组成,破碎带内部主要为次级褶皱带、碎裂岩带、断层角砾岩带及断层泥;断裂带已深切至结晶基底,两盘断差 1 500 m,构造变形强烈,各类构造岩均较发育;断裂活动兼有左旋走滑和逆冲运动的性质[7]。

大坪断裂长约 7 km,走向东西,倾向南,倾角 60° ~ 70°,地表切割三叠系巴东组地层,东段和西段相对落差约 700 m。该断裂具有清晰的线性影像,但断层两侧(上下盘)山原地貌面没有明显差异,因此判断断裂线性影像属构造岩和破裂带被侵蚀、溶蚀所致,属前第四纪断裂[8]。

以上断裂构造总地来说产状较陡,破碎带较宽并切割不同时代的地层和构造单元。

巴东库段及其周边区域地表出露岩层主要为三叠系下统嘉陵江组、中统巴东组,为弱透水和不透水地层,但地层破碎、裂隙发育,地层厚度一般有几 km,整个沉积盖层厚 5 ~ 7 km^[1,8-9]。Ms5.1 级主震位于三叠系中统(T₂)巴东组与侏罗系下统(J₁)地层交界处,主要岩性为紫红色泥岩、砂岩、微晶灰岩、页岩夹煤线;余震主要分布在三叠系中统巴东组紫红色砂岩、泥岩以及上统嘉陵江组的灰岩区内。依据奉节-秭归复向斜两翼古生界至新元古界地层调查资料,震中区地层自上而下为:中三叠统-石炭系(T₂-C),厚约 3.25 km,碳酸盐建造为主;泥盆系-志留系(D-S),厚约 1.5 km,泥砂质建造为主;奥陶系-震旦系(O-Z),厚约 1.5 km,碳酸盐建造为主;再其下则为川中式结晶基底。神农溪和东瀼河两岸近 EW 向和 NE 向褶曲构成走向近 EW 向的背斜、向斜相间构造。区域多见各种岩溶地貌,沿着背斜轴部发育有近 EW 向和 NEE 向的地下暗河。牛口以上往西至东瀼口一带地层层面与长江谷坡一致向南倾,利于库水沿岩溶裂隙、断层层面向纵深渗透并积蓄应力^[8,10-11]。

震中区位于地层较为破碎的岩溶发育地区,地

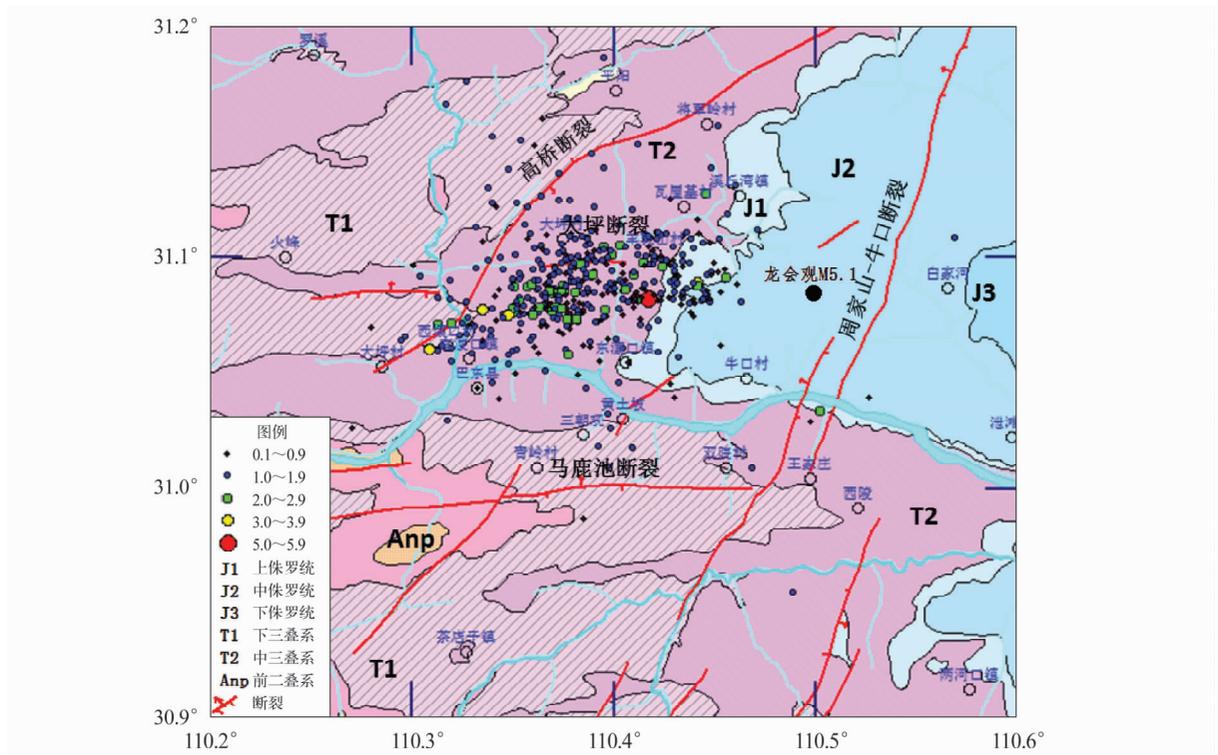


图5 巴东 Ms5.1 地震序列震中分布图

Fig. 5 Distribution map of Badong Ms5.1 earthquake sequence

下暗河发育。大坪断裂在研究区中的产状较陡,破碎带较宽并切割不同时代地层和构造单元,地下水通过断裂带附近或岩溶区已有的岩石裂隙流动或渗入,并直接与岩石发生作用。地下岩体内的裂隙水对石膏层、软弱岩层、岩溶带进行溶蚀(软化)或腐蚀,使其强度降低,裂隙层面失稳或滑脱,形成临空面。在重力荷载作用下,断裂上盘下端应力集中,向下滑垮(塌)而地震。

6 结论

1) 巴东 Ms5.1 级地震及其余震主要分布在巴东组灰岩区内。主震是在 175 m 高水位运行期发生的,距离长江干流 4.3 km,与水库蓄水相关。震中区断裂构造多为张性,为库水向纵深渗透提供了条件。

2) 巴东 Ms5.1 地震余震频繁,频度和强度呈起伏状衰减; b 值约为 0.835 8,具有水库诱发地震的特征; $M_L 2.0$ 以上地震的震源深度多数在 5~7 km 的结晶基底附近。

3) 从波形和频谱特征上,巴东 Ms5.1 主震的近台记录以 P 波初动向下居多,优势频率偏低,频率较单一,高频成分不发育,拐角频率低于 1.5 Hz,与塌陷型水库地震接近。

4) 巴东 Ms5.1 地震的震源机制解显示本次地震主张应力方向为 NNE 方向,主压应力方向为

NNW,近台 P 波初动震源机制解结果为正断倾滑型,与塌陷诱发地震常有的拉张型正断错动性质相似。

5) 通过地震学参数结合震中区的地质构造条件综合分析认为,巴东 Ms5.1 级地震是层间滑脱型水库地震。

致谢 感谢姚运生研究员和甘家思研究员提出的宝贵意见和建议!

参考文献

- 1 陈俊华,等. 湖北巴东东壤口地区地震活动特征研究[J]. 大地测量与地球动力学,2006(3):97-104. (Chen Junhua, et al. Seismic activity characteristics in Dongrangkou area, Badong country of Hubei Province[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006(3):97-104)
- 2 焦远碧. 地震序列类型、地震序列 b 值与地震大形势关系初探[J]. 地震,1998,18(1):33-40. (Jiao Yuanbi. Study on types of earthquake sequences and relation between b -value of earthquake sequences and long-term tendency of strong earthquakes[J]. Earthquake, 1998,18(1):33-40)
- 3 国家地震局震害防御司. 地震工作手册[Z]. 北京:地震出版社,1992. (State Seismological Bureau of Earthquake Defense Department. Seismic work manual[Z]. Beijing: Seismological Press, 1992)
- 4 张丽芬,等. 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,2013(2):27-30. (Zhang

- Lifen, et al. Corner frequency characteristic of tectonic earthquakes and collapsed ones in Three Gorges region[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2013(2):27-30)
- 5 姚立珣,等. 岩体裂隙充水后对拐角频率的影响[J]. *西北地震学报*, 2004, 26(4):315-321. (Yao Lixun, et al. Influence of impregnated rock mass on the corner frequency[J]. *Northwestern Seismological Journal*, 2004, 26(4):315-321)
 - 6 刘锁旺,甘家思,薛宏交. 长江三峡地区的构造应力场与地震活动[J]. *地震地质*, 1983, 5(1):29-41. (Liu Suowang, Gan Jiashi, Xue Hongjiao. Tectonic stress field and seismicity in the Three Gorge region on the Changjiang river [J]. *Seismology and Geology*, 1983, 5(1):29-41)
 - 7 夏金梧,等. 三峡工程库首区高桥断裂特征与地震活动性研究[J]. *大地测量与地球动力学*, 2008(2):8-15. (Xia Jinwu, et al. Study on characteristics and seismic activity of Gaoqiao fault in head area of Three Gorges Reservoir[J]. *Journal of Geodesy and Geodynamics*, 2008(2):8-15)
 - 8 湖北省地震局. 巴东 Ms5.1 地震现场考察报告[R]. 2014. (Earthquake Administration of Hubei Province. The field investigation report of the Ms5.1 Earthquake in Badong area[R]. 2014)
 - 9 陈俊华,等. 水库断层岩溶带地震波波速比研究[J]. *人民长江*, 2011, 42(3):23-26. (Chen Junhua, et al. Study on wave velocity ratio of fault Karst zone of reservoir[J]. *Yangtze River*. 2011, 42(3):23-26)
 - 10 许崇宝,钱进,孙立新. 岩溶裂隙发育带地震解释方法研究[J]. *工程地球物理学报*, 2008, 5(2):148-151. (Xu Chongbao, Qian Jin, Sun Lixin. Research on seismic interpretation method of Karst-fractured zone[J]. *Chinese Journal of Engineering Geophysics*, 2008, 5(2):148-151)
 - 11 程万正. 高烈度区的水库地震问题[J]. *国际地震动态*, 2013, 412(4):10-18. (Cheng Wanzheng. The reservoir induced earthquake problem in the high intensity area[J]. *Recent Developments in World Seismology*, 2013, 412(4):10-18)

(上接第 9 页)

- 11 陈永成. 秭归龙会观 5.1 级震区及其邻区新生代以来的地壳应力场特征[J]. *地壳形变与地震*, 2000(2):61-65. (Chen Yongcheng. The characteristic of crustal stress field of the M5.1 in Longhuiguan, Zigui since the Cenozoic era[J]. *Crustal Deformation and Earthquake*, 2000(2):61-65)
- 12 卢寿德. 工程场地地震安全性评价[M]. 北京:中国标准出版社, 2006. (Lu Shoude. Evaluation of seismic safety for engineering sites [M]. Beijing: China Standard Publishing House, 2006)
- 13 向宏发,等. 中国东部中强地震发生的地震地质标志初探[J]. *地震地质*, 2008, 30(1):202-208. (Xiang Hongfa, et al. A preliminary study on seismogeological evidence for moderate earthquakes in east China[J]. *Seismology and Geology*, 2008, 30(1):202-208)
- 14 李珩,李愿军,杨美娥. 长江三峡库区水库诱发地震的研究[J] *中国工程科学*, 2005, 7(6):14-20. (Li Pin, Li Yuanjun, Yang Meie. A study of reservoir-induced earthquake in the Three Gorges area[J]. *Engineering Science*, 2005, 7(6):14-20)
- 15 Chen Junhua, et al. Study on the mechanism of the M5.1 Badong earthquake in Hubei[J]. *Geodesy and Geodynamics*, 2014, 5(1):47-54.