

# 汶川 $M_s$ 8.0 地震对四川省水电水利工程 场地安全性评价结果的检验

马文涛 李海鸥 杨主恩 陈桂华  
陈献程 杨清源 邓志辉 孙 谦

(中国地震局地质研究所, 国家地震活动断层研究中心, 北京 100029)

**摘 要** 通过对汶川  $M_s$  8.0 地震的野外现场调查与相关资料收集, 分析了四川省水电水利工程的破坏情况。在汶川地震震中区和高烈度区内, 其危害性程度明显比当地水电水利工程场地安全性评价烈度高 I~III 度, 暴露出在当地水电水利工程场地安全性评价中存在的问题。受限于历史地震记录时间短、无法预测出超过历史地震最高震级的上限, 严重低估了龙门山断裂带的危险性, 酿成当地水电水利工程遭受很大损坏, 坝体普遍出现裂缝、渗水、局部坍塌等情况, 甚至有些水库出现溃坝险情。因此, 在水电水利工程场地安全性评价中应加强活动断裂的鉴定工作, 可以利用古地震或地震规模与最大震级关系等来弥补历史地震资料记录时间短的缺陷, 以提高水电水利工程场地安全性评价结果的可靠性。

**关键词** 汶川  $M_s$  8.0 地震 地震安全性评价 水电水利工程

**中图分类号**: P315.9

**文献标识码**: A

**文章编号**: 0253-4967(2008)03-0796-08

## 0 引言

2008年5月12日在四川汶川县境内(北纬  $31.0^\circ$ 、东经  $103.4^\circ$ )发生了  $M_s$  8.0 特大地震。在巨大灾难面前充分暴露了地震研究及地震预测预报方面尚存在着诸多问题, 四川省一些水库大坝也遭受到了因超出评估或设防烈度而造成的不同程度的破坏。本文通过汶川地震的野外调查, 对当地水电水利工程场地安全性评价结果进行分析, 提出在水电水利工程场地安全性评价中应该特别注意正确评价活动断层与震级的关系问题, 以利于提高水电水利工程场地安全性评价的可靠性, 保障水电水利工程安全。

## 1 四川省部分水库遭受的破坏情况

汶川  $M_s$  8.0 地震的发震断裂是龙门山断裂带, 地震后形成了长约 240km 的地震地表破裂带。在其中南段形成了沿北川-映秀断裂和灌县-江油断裂的 2 条地表破裂带, 从震源时间破裂过程看可以分成 2 次事件, 整体为带右旋走滑分量的逆断层型, 震中烈度达 XI 度。

[收稿日期] 2008-07-16 收稿, 2008-08-21 改回。

[基金项目] “十一五”国家科技支撑计划项目(2006BAC01B040203)资助。

在对汶川地震进行野外地质调查时,可以看到大量的水库、水电站、堤防、涵闸等水利工程出现严重震损。据水电部门统计<sup>①</sup>,四川省共有水库 6 678 座,在这次 5.12 特大地震中受损的就有 1 803 座水库,占全省水库的 27%。其中有高危溃坝风险的水库 379 座,包括大型水库 2 座(紫坪铺水库和鲁班水库),中型水库 36 座(图 1)。

在震中附近的紫坪铺水库,大坝高 159m、最大库容 11 亿  $m^3$ ,2006 年刚开始蓄水,目前仍未达到最高蓄水位。坝体结构为面板堆石坝,在紫坪铺库水区有一条沿灌县-江油断裂的地表破裂直接穿过。汶川地震使大坝背水面多处出现裂缝、垒石受挤压向外凸出、坝体整体下沉约 20cm,坝体发生了渗漏,发电系统的输出设备损坏,无法发电。紫坪铺水库四周山体出现严重滑坡、岩崩,公路涵洞内壁上出现裂缝,其地面出现上凸现象,地震烈度达到 IX 度强以上(杨主恩等,2008),远超出安全评价给出的地震烈度(VII 度)(图 2)。

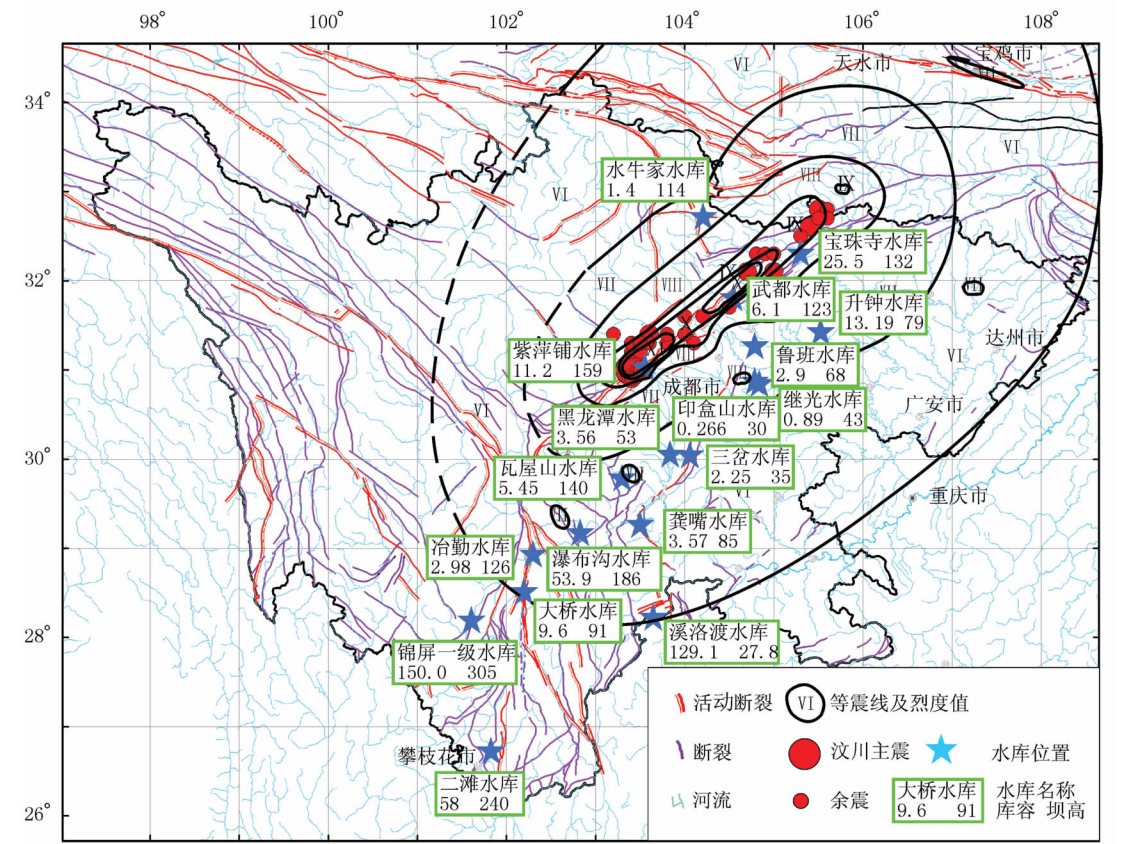


图 1 四川省部分水库分布图

Fig. 1 Distribution of some reservoirs in Sichuan Province.

四川省三台县印盒山水库库容 266 万  $m^3$ ,属小型水库,大坝为土坝,坝体直接建筑在红土层上。汶川地震使坝体出现 160m 长的纵向裂缝 6 条、横向裂缝 56 条,坝顶垂直沉降 30cm,迎

① 能源部水电开发司,1991,中国水力资源图集。

水面坝体向库心整体下陷,大坝出现了微小的波状歪曲,大坝内侧隆起了一个大包,坝底外侧多处出现来自库底深处的严重渗水现象,有溃坝危险,烈度达Ⅶ~Ⅷ度(图3),超出大坝基本烈度(Ⅵ度)。



图2 四川省紫坪铺大型水库坝体背水面出现数条裂缝、垒石受挤压向外凸出、坝体整体下沉约20cm  
Fig. 2 Fractures, upward-projecting of rocks and subsidence of 20cm in the dam of Zipingpu reservoir.



图3 加固后的四川省三台县印盒山水库大坝  
Fig. 3 Reinforced Yinhexhan reservoir dam where 6 lengthwise and 56 breadthwise fissures appeared.  
受汶川地震影响,坝体出现160m长的纵向裂缝6条、横向裂缝56条,坝顶垂直沉降30cm,迎水面坝体向库心整体下陷,坝底外侧多处出现严重的渗水现象,烈度达Ⅶ~Ⅷ度;照片为抢险加固后的景象

四川省中江县继光水库建于1980年,库容8千万 $\text{m}^3$ ,为中型水库,大坝坝体为石垒坝,坝高40余米,坝基岩性为细粒长石石英砂岩。受汶川地震影响,大坝背水面外侧出现多条纵向裂缝,坝顶垂直下沉27cm,坝体向下游突出变形30cm,坝体有渗水现象发生,烈度达Ⅶ~Ⅷ度(图4),超过大坝基本烈度(Ⅵ度)。

宝珠寺水电站位于四川省广元市、嘉陵江支流白龙江下游,混凝土重力坝,最大坝高132m,水库总库容25.5亿 $\text{m}^3$ ,1998年竣工。坝址基岩为奥陶系钙质粉砂岩,区域地震基本烈度为Ⅵ度。大坝在地震后无破坏痕迹,只是因地震损坏部分发电零部件。而宝珠寺水电站附近的四川省广安市三堆镇受到地震破坏(杨主恩等,2008),民房出现X裂缝,破坏烈度达Ⅷ度,超过安评给出的基本烈度(Ⅵ度)。

鲁班水库大坝为石垒坝,1981年建成,水库总库容2.9亿 $\text{m}^3$ ,坝高68.0m,坝基为砂岩、黏土岩。受汶川地震的破坏,鲁班水库主坝出现裂缝,6座附坝也遭受不同程度的损坏,水库主坝廊道渗漏量达到28.3L/h,鲁联干渠小方垭渡槽一分为二,烈度达Ⅶ度,超出给出的大坝基本烈度(Ⅵ度)。

武都水库为在建工程,预计2009年建成。大坝为碾压砼重力坝,最大坝高120m,坝顶长720多米,设计总库容为6.1亿 $\text{m}^3$ ,原基本烈度为Ⅶ度。汶川地震造成当地破坏程度达X度(杨主恩等,2008),但并未造成武都水库大坝本身的破坏。



## 2 大型水电水利工程场地安全性评价值得注意的主要问题

通过汶川地震的野外调查和对四川省大型水电水利工程相关资料的比较(表1),破坏比较严重的水电水利工程都是位于汶川地震的极震区和高烈度区内,水电水利工程所遭受到的汶川地震的破坏程度高于当地烈度区划图值和水电水利工程场地安全性评定结果。特别是在震中区附近的紫坪铺水库,基本烈度定为Ⅶ,实际的地震烈度达Ⅸ度强以上,高出Ⅱ度多。按照地震等震线来看(杨主恩等,2008),四川省的升钟、宝珠寺、紫坪铺、三岔、鲁班、武都、继光、印盒山等大型水库及部分中小型水库实际的地震烈度比当地工程场地安全性评价结果高出Ⅰ~Ⅲ度(表1)。

为了给各类工程提出合理的抗震设防标准,在工程场地地震安全性评价之前,应当根据地震历史数据和地质构造资料,估计出其地震活动性(胡聿贤,1999)。在成都平原以西存在着逆断层型的龙门山断裂带,它由茂县-汶川、北川-映秀和灌县-江油3条活断裂组成(邓起东等,2004)。

在当地紫坪铺等大型水电水利工程场地安全性评价时,根据已有的川西历史地震资料,认为它们分别是7级、6.5级和6.0级潜在震源区(胡先明,2007)。在汶川  $M_s8.0$  地震发生前,由于历史地震存在着记录时间短等缺陷,当地没有8级地震的历史记录,所以,在紫坪铺水库等大型工程场地安全评价时,烈度复核分别考虑了茂县-汶川断裂7级和北川-映秀、灌县-江油断裂6.5级历史地震的破坏情况及波及范围,将该水库区域烈度定为Ⅶ度区,该水库工程施工按Ⅷ度标准抗震设防。

龙门山断裂带长度在300km左右,属全新世活动断层(邓起东等,2004)。按照发震断层长度与震级大小的关系,震级最高可达8级,而8级地震的原地复发周期数千年。这就严重低估了龙门山断裂带的活动强度,由此造成极震区内及高烈度区附近的水电水利工程抗震设防低于汶川地震的影响程度。

除了大型水库以外,大量属于地方管辖的中小型水库也存在严重的安全隐患,这些大坝坝体大都属于无设防工程。当汶川地震发生后,酿成当地水电水利工程普遍遭受很大损坏,坝体普遍出现裂缝、渗水、局部坍塌等情况,甚至出现了大量的溃坝、高危险的险情。因此,汶川地震

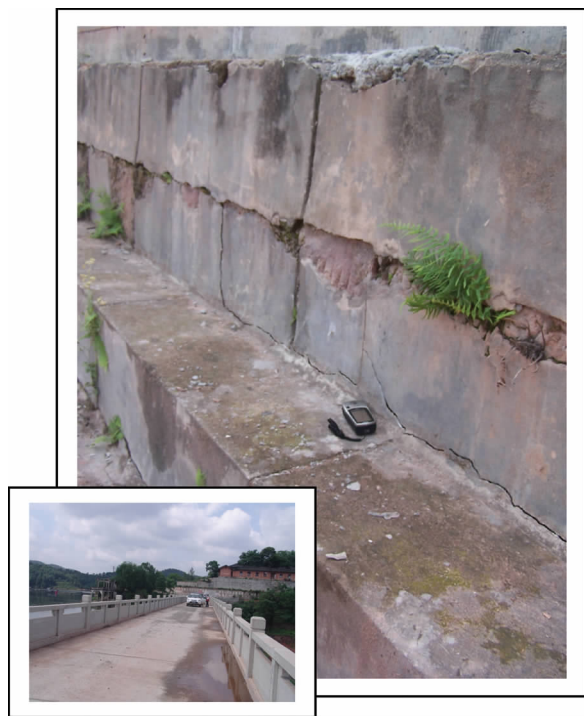


图4 四川省中江县继光水库

Fig. 4 Lengthwise fissures and a subsidence of 27cm of top of Jiguang reservoir dam.

大坝坝体为石垒坝,坝高40余米;受汶川地震影响,大坝背水面外侧出现多条纵向裂缝,坝顶垂直下沉27cm,坝体向下游突出变形30cm,有渗水现象发生,烈度达Ⅶ~Ⅷ度

表 1 四川省大型水库和部分其它水库基本情况

Table 1 Basic data of large reservoirs and other damaged reservoirs

水库名称	水库位置		河流	总库容 /亿 m <sup>3</sup>	坝高 /m	大坝类型	建成时间	坝址岩性	基本烈度	资料来源	汶川地震影响烈度
	经度 λ <sub>E</sub> /(°)	纬度 φ <sub>N</sub> /(°)									
二滩	101. 83	26. 73	雅龙江	58. 0	240. 0	混凝土双曲拱坝	1999 年	正长岩玄武岩	Ⅷ	谢蓉华, 2000	V +
升钟	105. 53	31. 43	西河	13. 19	79. 0	黏土心墙石渣坝	1987 年	砂岩、泥岩	Ⅵ +	隆文非, 2000	Ⅶ
宝珠寺	105. 3	32. 31	白龙江	25. 5	132. 0	混凝土重力坝	1998 年	奥陶系钙质粉砂岩	Ⅵ	戴松晨, 2001	Ⅷ
紫坪铺	103. 56	31. 03	岷江	11. 20	159. 0	面板堆石坝	2006 年	砂岩、页岩	Ⅶ	胡先明, 2007	Ⅸ
溪洛渡	103. 65	28. 23	金沙江	129. 1	278. 0	混凝土双曲拱坝	2010 年	二叠纪阳新灰岩、	Ⅷ	彭云金等, 2007	Ⅵ
锦屏一级	101. 61	28. 2	雅龙江	150. 0	305. 0	混凝土抛物线双曲拱坝	2014 年	大理岩	Ⅶ	余天堂等, 2007	V +
瀑布沟	102. 83	29. 18	尼日河	53. 9	186. 0	直心墙土石坝	2009 年	花岗岩	Ⅶ	段斌等, 2005	Ⅵ
冶勒	102. 3	28. 94	南桠河	2. 98	126. 0	沥青混凝土防渗心墙堆石坝	2006	第四系冲积物	Ⅷ	谭恺炎等, 2005	Ⅵ
瓦屋山	103. 3	29. 79	周公河	5. 45	140. 0	混凝土面板堆石坝	2007	砂岩泥质砂岩	Ⅶ	张文甫等, 1996	Ⅶ
水牛家	104. 21	32. 72	火溪河	1. 40	114. 0	心墙堆石坝	2006	变质砂岩夹花岗岩脉	Ⅶ	王玲玲等, 2004	Ⅶ
龚嘴	103. 5	29. 27	大渡河	3. 57	85. 0	混凝土重力坝	1979	花岗岩	Ⅶ	钱兆礼, 1995	Ⅵ
黑龙滩	103. 84	30. 06	岷江河	3. 56	53. 0	浆砌条石重力坝	1971	细粒砂岩	Ⅵ	刘鸿儒, 1994	Ⅵ
三岔	104. 06	30. 05	绛溪河	2. 25	35. 0	土石垒坝	1978	细粒砂岩	Ⅵ	①	Ⅶ
鲁班	104. 79	30. 88	绿豆河	2. 9	68. 0	石垒坝	1981	砂岩、黏土岩	Ⅵ	①	Ⅶ
武都	104. 55	31. 81	涪江	6. 1	123. 0	碾压混凝土重力坝	2009	灰岩白云岩介壳灰岩	Ⅶ	唐成建等, 2007	X
继光	104. 84	30. 85	涪江	0. 89	43	为混凝土斜墙浆砌石坝	1979	细粒长石石英砂岩	Ⅵ	金永堂, 1997	Ⅶ +
印盒山	104. 79	31. 27	涪江	0. 266	30	土坝	1979	红土层	Ⅵ	谭恺炎等, 2005	Ⅶ +
大桥	102. 19	28. 51	安宁河	9. 6	91	混凝土面板堆石坝	2000	印支期中酸性混染岩	Ⅷ	辜明清, 2003	Ⅵ

注 ①能源部水电开发司,1991,中国水力资源图集。

发生后国家不得不先后拿出 5 千万元和 10 亿元对四川等省出险水库进行临时性的抗震加固,以除后患。

在水库等大型工程的地震危险性评价工作中如何避免再次出现现象汶川  $M_s8.0$  地震这样特震对水利水电等大型工程所造成的危害?在缺少长时间的地震历史记录资料情况下,可以开展古地震研究,弥补缺少较长时间的地震资料;也可以从断裂带的规模及长度的统计关系入手(马瑾,1987),利用断裂规模来估计断裂带的地震上限,提高水库等大型工程地震危险性评价结果的准确性、可靠性和科学性,保障国家经济发展和人民生命财产安全。

此外,应该及时对已建或在建大型水库的抗震设防进行一次认真普查和地震复核,重新核定所在地区的基本烈度,对低于该地区新核定的基本烈度的大坝应提高抗震设防标准,及时加固,特别注意未设防土坝水库的安全。同时,还应考虑水库诱发地震、滑坡、泥石流和堰塞湖对已建或在建大型水库的影响,并针对这些地质灾害,做出相应的处置预案,防患于未然。

**致谢** 本项研究得到徐锡伟研究员、胡毓良研究员的指正,李陈侠博士提供了断裂底图,在此一并表示谢意。

## 参 考 文 献

- 戴松晨. 2001. 宝珠寺水库蓄水前后水温、水质变化回顾分析 [J]. 水电站设计, 17(4): 58—76.
- DAI Song-chen. 2001. The analysis of the changes of water temperature and water quality in Baozhusi reservoir before and after storing water [J]. Design of Hydroelectric Power Station, 17(4): 58—76(in Chinese).
- 邓起东(主编). 2004. 中国活动构造图 [M]. 北京: 地震出版社.
- DENG Qi-dong (ed). 2004. Map of Active Tectonics in China [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 段斌, 何江达, 李莉, 等. 2005. 瀑布沟水电站尾水隧洞出口高边坡地震作用效应及稳定性 [J]. 东北水利水电, 22(5): 1—6.
- DUAN Bin, HE Jiang-da, LI Li, *et al.* 2005. Earthquake response and stability of high slope in tailrace tunnel exit of Pubugou hydropower station [J]. Water Resources & Hydropower of Northeast China, 22(5): 1—6(in Chinese).
- 辜明清. 2003. 大桥水库主要工程地质问题的分析与评价 [J]. 四川水力发电, 22(2): 1—8.
- GU Ming-qing. 2003. Analysis and evaluation on main question of geological engineering at Daqiao Reservoir [J]. Sichuan Water Power, 22(2): 1—8(in Chinese).
- 胡先明. 2007. 紫坪铺水库蓄水前天然地震活动 [J]. 四川地震, (2): 16—21.
- HU Xian-ming. 2007. Seismicity background around Zipingpu Dam before impounding [J]. Earthquake Research in Sichuan, (2): 16—21(in Chinese).
- 胡聿贤. 1999. 地震安全性评价技术教程 [M]. 北京: 地震出版社.
- HU Yu-xian. 1999. The Technical Course of Seismic Safety Evaluation [M]. Seismological Press, Beijing(in Chinese).
- 金永堂. 1997. 继光水库原型观测成果分析 [J]. 中国农村水利水电(农田水利与小水电), (3): 18—20.
- JIN Yong-tang. 1997. The analysis on observation results of Jinguang Reservoir prototype [J]. China Rural Water and Hydropower, (3): 18—20(in Chinese).
- 刘鸿儒. 1994. 对黑龙潭水库灌区内小型工程问题的建议 [J]. 四川水利, 15(6): 36—37.
- LIU Hong-ru. 1994. The suggestions for the small engineering in Heilongtan Reservoir [J]. Sichuan Water Conservancy, 15(6): 36—37(in Chinese).

- 隆文非. 2000. 升钟水库大坝安全监测管理系统的更新改造 [J]. 四川水利, 21(1): 30—33.
- LONG Wen-fei. 2000. Renovation of dam safety monitoring management system in Shengzhong Reservoir [J]. Sichuan Water Conservancy, 21(1): 30—33 (in Chinese).
- 马瑾. 1987. 构造物理学概论 [M]. 北京: 地震出版社.
- MA Jin. 1987. An Introduction to Tectonophysics [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).
- 彭云金, 吕贵选, 吕加蓉, 等. 2007. 溪洛渡和向家坝电站水库蓄水后对乐山市中南部地震活动的影响及对策 [J]. 高原地震, 19(1): 21—26.
- PENG Yun-jin, LÜ Gui-xuan, LÜ Jia-rong, *et al.* 2007. The influence of impoundment of Xilongdu Reservoir and Xiangjiaba Reservoir on the seismic activity of the central and south area of Leshan City and the countermove [J]. Plateau Earthquake Research, 19(1): 21—26 (in Chinese).
- 钱兆礼. 1995. 龚嘴水电站工程概况 [J]. 四川水力发电, (3): 18—23.
- QIAN Zhao-li. 1995. General description of Gongzui Hydropower Project [J]. Sichuan Water Power, (3): 18—23 (in Chinese).
- 余天堂, 任青文. 2007. 锦屏高拱坝整体安全度评估 [J]. 岩石力学与工程学报, 21(1): 30—33.
- SHE Tian-tang, REN Qing-wen. 2007. Evaluation of global safety degree of Jinping high arch dam. [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 26(4): 787—794.
- 谭恺炎, 李战备, 徐小坤. 2005. 冶勒水电站首次蓄水期间大坝防渗系统应力与变形分析 [J]. 葛洲坝集团科技, 75(3): 53—60.
- TAN Kai-yan, LI Zhan-bei, XU Xiao-kun. 2005. Analysis on the stress and deformation of the seepage-proof system of the dam of Yeqin reservoir during the first storing up [J]. Gezhouba Group Science & Technology, 75(3): 53—60 (in Chinese).
- 唐成建, 张全, 潘杰, 等. 2007. 武都水库大坝河床坝基深层抗滑稳定分析 [J]. 四川水利, (6): 34—38.
- TANG Cheng-jian, ZHANG Quan, PAN Jie, *et al.* 2007. The anti-slide stability analysis of the dam at depth in Wudu Reservoir [J]. Sichuan Water Conservancy, (6): 34—38 (in Chinese).
- 王玲玲, 何蕴龙, 费文平. 2004. 水牛家心墙堆石坝地震永久变形及液化分析 [J]. 岩土力学, 25(1): 165—168.
- WANG Ling-ling, HE Yun-long, FEI Wen-ping. 2004. Analysis of earthquake induced liquefaction and permanent deformation of Shuiniujia Central Core Rock-fill Dam [J]. Rock and Soil Mechanics, 25(1): 165—168 (in Chinese).
- 杨主恩, 邓志辉, 马文涛, 等. 2008. 汶川 8 级强震极震区破坏情况与烈度 [J]. 地震地质, 30(2): 349—354.
- YANG Zhu-en, DENG Zhi-hui, MA Wen-tao, *et al.* 2008. Some destruction and its seismic intensity in meizoseismal region of Wenchuan Earthquake with magnitude 8, Sichuan, China [J]. Seismology and Geology, 30(2): 349—354 (in Chinese).
- 谢蓉华. 2000. 二滩水库蓄水 1 年的地震活动 [J]. 地震地磁观测与研究, 21(1): 12—21.
- XIE Rong-hua. 2000. The earthquake activities around the Ertan Reservoir 1 year after the impoundment [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 21(1): 12—21 (in Chinese).
- 张文甫, 陈农, 胡先明. 1996. 瓦屋山水电站水库诱发地震危险性研究 [J]. 地震地磁观测与研究, 17(2): 35—43.
- ZHANG Wen-fu, CHEN Nong, HU Xian-ming. 1996. Risk analysis of reservoir induced earthquake at Wawushan hydroelectric station [J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 17(2): 35—43 (in Chinese).

# VERIFYING THE RESERVOIR SEISMIC SAFETY ASSESSMENTS IN SICHUAN PROVINCE WITH THE $M_s8.0$ WENCHUAN EARTHQUAKE

MA Wen-tao LI Hai-ou YANG Zhu-en CHEN Gui-hua  
CHEN Xian-cheng YANG Qing-yuan DENG Zhi-hui SUN Qian

(*National Center for Active Fault Studies, Institute of Geology,  
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*)

## Abstract

In the paper, the seismic damage to reservoirs in Sichuan Province has been analyzed by field investigation and data collection of the damages of the  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake. The results show that the damage of the  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake is 1 or 3 degrees higher than the seismic intensities provided by the reservoir seismic safety assessments in Sichuan Province. This reveals certain questions behind the reservoir seismic safety assessment in this region. Because of the short earthquake record history, there has been no predicting of earthquake larger than the largest magnitude of historical earthquake, and thus, the risk of the Lomeshan active fault was greatly underestimated, resulting that fissures, seepage and partial collapse occurred widely on the dams of many reservoirs. The paleoearthquake method is an important means of distinguishing active fault in reservoir seismic risk assessment and improving the accuracy and reliability of the assessment results.

**Key words**  $M_s8.0$  Wenchuan earthquake, seismic safety assessment, reservoir

---

[作者简介] 马文涛,男,1958年生,1996年毕业于中国地震局地质研究所地球物理学专业,获得博士学位,副研究员,现主要从事地震学、地震动力学、诱发地震研究工作,电话:010-62009170(办)或13651308114, E-mail: wentaoma@sina.com 或 wentaoma\_1@126.com。