

doi:10.3969/j.issn.0253-4967.2011.01.017

紫坪铺水库与汶川地震关系的讨论

马文涛¹⁾ 徐长朋^{1,2)} 张新东³⁾
徐锡伟¹⁾ 李海鸥¹⁾ 苑京立¹⁾

1) 中国地震局地质研究所, 拉萨地球物理国家野外科学观测研究站, 北京 100029

2) 山东省地震局, 济南 250014

3) 河北省地震局邯郸中心台, 邯郸 056001

摘 要 利用紫坪铺水库专用地震台站和加密地震台站资料, 使用双差法完成了震前 930 次地震、汶川 8 级主震和 5 789 次余震的重新定位, 探讨了紫坪铺水库与汶川地震之间的关系, 获得了有利于证明它们之间密切关联的事实: 1) 紫坪铺水库 2005 年蓄水之后出现了水磨、深溪沟和都江堰震群, 地震应变能释放增加了 200%, 与库水位变化密切相关, 在汶川地震前呈现出加速释放的现象; 2) 野外调查表明存在 1 条贯穿紫坪铺水库库区、走向 NE 的同震地表破裂带, 与中滩铺断层位置一致; 3) 余震分布以中滩铺断层为界, 西北上盘多, 东南下盘少; 4) 利用 P 波初始到时重新确定出的汶川主震发震时刻为 27 分 59.5 秒, 初始破裂深度在 6~9 km 左右, 直接位于水磨震群之下; 5) 汶川主震与发生在 2008 年 4 月 5 日水磨震群中的 1 次小震的各个台站到时时差相同。

关键词 紫坪铺水库 汶川地震 水库诱发地震 同震地表破裂 初始破裂地点 震群

中图分类号: P315.2

文献标识码: A

文章编号: 0253-4967(2011)01-0175-16

0 引言

2008 年 5 月 12 日 14:28 汶川发生了 8 级地震, 瞬间造成了 69 197 人遇难, 18 209 人失踪, 374 176 人受伤; 造成直接经济损失 8 451.4 亿元, 是中国近些年遭受的第一大灾害。大多数作者从区域构造背景上解释了汶川地震的成因, 强调青藏高原隆起、高原东缘向 E 或 SE 方向运动, 导致龙门山断裂带的强烈挤压, 引发了这次 8 级地震(徐锡伟等, 2008; 王卫明等, 2008)。根据 2004 年印度尼西亚 9 级地震之后的红外增温结果(马瑾等, 2010), 龙门山断裂带上构造应力得到了进一步的增强。区域构造背景和地球动力学条件无疑是造成汶川 8 级地震发生的主要原因。但是, 紫坪铺水库在 8 级地震中的诱发因素引起了人们的特别关注, 存在着紫坪铺水库与汶川发生 8 级地震有关和无关 2 种观点。

持紫坪铺水库与汶川 8 级地震有关观点者认为: 该水库具备了诱发地震的基本条件(范晓, 2008; Richard *et al.*, 2009); 紫坪铺水库蓄水后 b 值发生改变且库水压的增加量与大震应力降同级(雷兴林等, 2008); 蓄水后的库仑应力增量足以引发地震(Shemin *et al.*, 2009); 水磨地震的震源机制与汶川 8 级地震的一致(胡先明等, 2009)等。持两者无关观点者认为: 汶川 8 级

〔收稿日期〕 2010-10-12 收稿, 2011-03-15 改回。

〔基金项目〕 “十一五”国家科技支撑计划项目(2008BAC38B04)资助。

四川省地震局、河北省地震局邯郸中心台参与了编制地震观测报告。

地震的震源深度为 14km^①,对于水库诱发地震而言深度太深;紫坪铺水库周边的 $M-T$ 图像没有增强 (Deng *et al.*, 2010); 蓄水后的库仓应力不足以引发汶川地震 (Gahalaut *et al.*, 2010); 紫坪铺水库库水区没有断层通过^②; 水磨震群和深溪沟震群属于水库诱发地震,但都江堰震群与紫坪铺水库无关 (胡先明等, 2009; 卢显等, 2010); 水库诱发地震震例中多为前震-主震-余震型,还未诱发出过 8 级地震 (陈颢, 2009); 库水不能渗透到汶川 14km 处的地震震源深度 (Deng *et al.*, 2010) 等。

在前面的研究中,人们虽然已经使用紫坪铺水库专用地震台站资料研究了紫坪铺水库的地震活动性,而汶川 8 级地震的参数是由震中距 > 20 多 km 的地震台站所提供的 (刘启元等, 2008), 缺乏使用小台距地震台站资料对汶川 8 级地震参数的进一步验证,而恰恰紫坪铺专用地震台站的小台距为地震定位提供了高精度数据。

本文除充分利用紫坪铺水库 2004 年原建的 7 个水库专用地震台站、2009 年 12 月增建的 6 个地震加密台站外,还利用周边台站的地震高精度数字资料,研究了紫坪铺水库区的地震活动性、同震地表破裂分布、汶川 8 级地震初始破裂地点深度、余震分布等问题;探讨了紫坪铺水库地震与汶川地震之间的关系;揭示了一些涉及紫坪铺水库蓄水与汶川 8 级地震关联的重要事实,供关心此问题的专家学者研究讨论。

1 紫坪铺水库的蓄水过程与研究方法

紫坪铺水库属大 I 型水库。2005 年 9 月 30 日开始蓄水,水位由 760.36m 快速升高,到 2005 年 12 月 5 日达到 835.91m,2006 年 10 月 14 日水位上升到最高值 875.18m,2007 年 12 月 12 日水位再次上升到 873.39m,在汶川 8 级地震发生前共经历了 3 次蓄水、2 次放水过程。2008 年 5 月 12 日汶川 8 级地震发生时紫坪铺水库的水位是 828.66m。紫坪铺水库达到最高水位 875.18m 时,水库蓄水造成了近 115m 的水头落差,西南库尾回水到距水磨镇约 2km,西北库尾回水到映秀镇下游,东北库水顺支流向北淹没原龙池镇镇址 (图 1)。

紫坪铺水库 2004 年原建的 7 个水库专用地震台站和 2008 年 12 月增建的 6 个地震加密台站 (表 1,图 1) 使用了 24 位数字地震仪,以 GPS 授时系统提供高精度的到时服务;港震数字地震仪的 GPS 授时系统是摩托罗拉 M12,美国 Reftak 130 型宽频记录仪的 GPS 授时系统是 Garmin VT600,时间误差 < 10 μ s。对时系统都采用 30min 对 1 次时,实现了观测系统的高精度性。

通过对地震波形的再处理,整理出紫坪铺水库的地震观测报告。结果表明,紫坪铺水库库区地震活动在空间上呈现出丛集分布的特征。由于许多地震之间的距离远小于它们到台站的距离,并小于震源区地壳速度结构不均匀的尺度,地震定位选用 Walhduaesr 等 (2000) 提出的双差定位方法。双差定位方法把地震之间的距离远小于它们到台站的距离的事件记录配对,从而避免了射线路径不确定所引起的误差,有效地提高了定位精度。本研究使用雷建设等 (2009) 获得的地壳 P 波速度模型和黄媛等 (2008) 的青藏高原地壳 P 波速度模型,先后对汶川 8 级地震前的 930 次地震、汶川 8 级主震和 2009 年 1 月至 12 月的 5 789 次余震进行了重新定位。在

① 中国地震局, 2008, <http://www.csndmc.ac.cn/newweb/data.htm>。

② 李敏, 汪雍熙, 2008, 紫坪铺水库诱发地震预测意见回顾与蓄水后的验证。

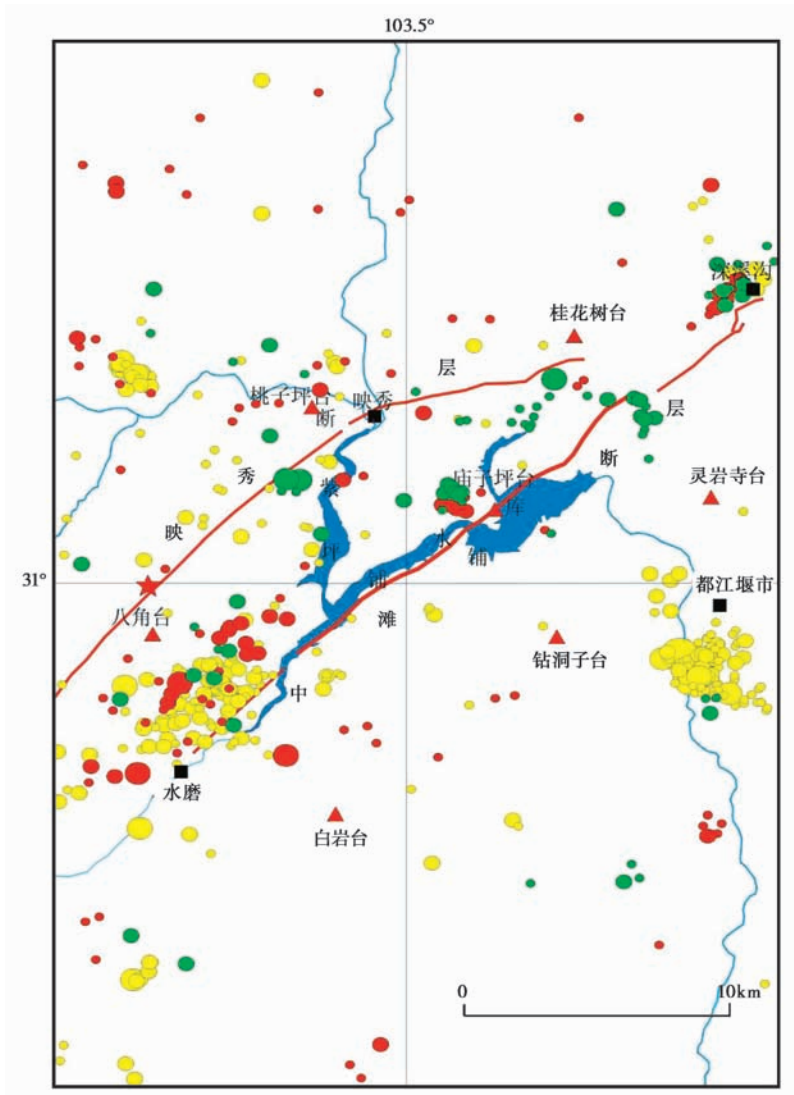


图1 紫坪铺水库区汶川8级地震前的地震分布图

Fig. 1 The seismic distribution at Zipingpu reservoir area before the M_s 8.0 Wenchuan earthquake.

绿圈为蓄水前发生的地震,红圈为2005年10月至2006年4月发生的地震,黄圈为2006年6月至2008年4月发生的地震;红三角形为紫坪铺水库专用台站,红五角星是汶川8级地震初始破裂的修正位置;圆圈从大到小分别代表3~3.9级、2~2.9级、1~1.9级和0~0.9级地震(汶川地震同震地表破裂的地质调查资料来源于徐锡伟等,2008)

东经103°~104°,北纬30.7°~31.3°的范围内,获得了高精度的地震分布图像(图1,表2),为深入研究奠定了基础。

2 汶川8级地震前的库区地震活动性

紫坪铺水库蓄水前从2004年5月至2005年9月,在距水库10km范围内存在一些地震活动(图1中的绿圈)。主要分布在水磨、庙子坪、龙池、映秀和深溪沟等地,其特征是沿着穿过库

表 1 紫坪铺水库专用地震台站和加密地震台站参数表
Table 1 The parameters of seismic stations of Zipingpu reservoir

台站 代码	台站 名称	仪器型号	建台时间	GPS 对时系统型号, 对时间隔	记录采样率 /Hz
紫坪铺水库专用地震台站	BAJ 八角	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	TZP 桃子坪	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	BAY 白岩	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	MZP 庙子坪	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	ZDZ 钻洞子	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	GHS 桂花树	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
紫坪铺水库加密地震台站	LYS 灵岩寺	港震的 EDAS-24L 数据采集器, RSFS-1A 型短周期地震计	2004 年 8 月 16 日	摩托罗拉 M12,30min	100
	WJC 望江村	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 24 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200
	DBT 大坝台	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 23 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200
	YNT 油碾台	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 27 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200
	BYD 白云顶	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 26 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200
	AZP 安子坪	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 25 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200
	XJP 谢家坪	美国 Reftak 130 型宽频记录仪, 英国 L-22E/3D 型短周期检波器	2008 年 12 月 25 日	Garmin VT600 GPS 接收器,30min	200

区的 NE 向的中滩铺断层和映秀断层的附近地区分布。地震月频次<25 次,最高震级为 3 级左右。

从 2005 年 9 月 30 日蓄水到汶川 8 级地震发生前,虽然在地震震级上没有出现明显的增大现象,但地震次数明显增多。2006 年 1 月地震月频次首次达到 33 次,之后出现了多次的 2 级地震,在 2006 年 10 月达到了月

表 2 紫坪铺水库附近在汶川 8 级地震前的地震分布情况
Table 2 The distribution of seismic magnitude in Zipingpu reservoir before M_s 8.0 Wenchuan earthquake
(东经 103°~104°,北纬 30.7°~31.3°;
时间从 2004 年 5 月至 2008 年 4 月)

震级 (M_L)	0~0.9	1~1.9	2~2.9	3~3.9
次数	502	356	43	7

频次 45 次,在 2008 年 2 月达到了汶川 8.0 级地震前的最高月频次 125 次。这些地震主要以震群形式出现,在库区周边先后出现了水磨震群、深溪沟震群和都江堰震群等(胡先明等,2009;卢显等,2010),它们都位于距紫坪铺水库 10km 的范围内。到汶川 8 级地震发生前,最大地震为 2008 年 2 月的都江堰 3.6 级地震。

水磨震群位于紫坪铺水库的西南侧,在蓄水之前就存在一些地震,大都是 1~2 级的弱震。蓄水之后,震群活动进一步增强,出现了多次 2 级多地震的震群。在 3 个蓄水年份、2 个蓄满水周期过程中都出现了地震活动,在第 1 蓄满水周期的高水位 877m 时(2006 年 10 月)达到了最大地震月频次。

深溪沟震群位于紫坪铺水库的东北侧,在蓄水之前就存在着少量的地震,大都是 1~2 级的弱震。地震主要出现在蓄水年份 2006 年,在 2006 年 3 月达到月频次最大值后震群活动减弱。

都江堰震群位于紫坪铺水库的东南侧,在蓄水之前就存在着少量的地震,2008 年 2~4 月震群活动明显加强,2 月份地震频次出现最大值 125 次,发生 3 次 3 级以上的地震,它们分别是 2008 年 2 月 28 日 23:19:28.12 的 3.6 级地震、2008 年 3 月 12 日 22:52:15.78 的 3.3 级地震和 2008 年 4 月 11 日 03:31:23.25 的 3.5 级地震。

从震群发生的时间序列来看,蓄水后初期从 2006 年 1 月起首先在水磨北发生了一系列的地震,形成水磨震群,然后在 2006 年 3 月发生了深溪沟震群,2008 年 2 月至 4 月发生都江堰震群。其中有与库水位快速上涨或高水位同步的地震,如 2006 年 10 月和 2007 年 6 月的地震,它们表现出对水位变化的快速反应;也存在着对水位滞后的地震,如 2006 年 1 月的水磨震群、2008 年 2 月的都江堰震群(图2)。

库区地震月频次和地震蠕变(傅淑芳等,1991)能释放在蓄水前后有一个明显的变化。蓄水前比较接近线性释放,月频次<25 次,每年蠕变能释放在 $1.2 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$ 左右。蓄水后地震蠕变能释放量明显变化,从 2006 年 1 月至 10 月持续增长,在 2007 年 5 月至 7 月和 2008 年 2 月又 2 次阶跃,导致在 2 年半多的时间内由地震引起的蠕变能多释放了 $2.4 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,释放增加了 200%。每次蠕变能释放的加速与库水位变化密切相关,并在主震前形成了一个逐渐加速释放的过程。

3 同震地表破裂分布

紫坪铺水库地处青藏高原东边的南北地震带上,属高烈度区,天然地震频发。特别是 NE 向的龙门山断裂带是一条大规模活动断裂带,它由后山断裂、中央断裂、前山断裂和山前隐伏断裂等组成(徐锡伟等,2008)。紫坪铺水库正好坐落在中央断裂带南段上。中央断裂带南段由 2 条地表断裂组成,一条为映秀断裂,另一条就是穿过紫坪铺水库库区的中滩铺断裂。

汶川地震同震地表破裂的地质调查结果表明,在龙门山中央断裂带南段地表形成了 2 条同震地表破裂带(徐锡伟等,2008),走向 $\text{N}60^\circ \sim 70^\circ \text{E}$,其中一条与映秀断裂带相重叠,另一条穿过紫坪铺水库库区与中滩铺断层相重合。地表可见纯逆冲倾滑型破裂。穿过紫坪铺水库库区的中滩铺断层的东北端始于深溪沟西南,向西南方向经龙池南山坡、庙子坪后,横穿紫坪铺水库库区,在水库南岸边一直延伸到水磨西南,总长度在 20km 左右,走向 $\text{N}60^\circ \text{E}$ 左右(图3)。

野外库区地质调查中,我们也在穿过紫坪铺水库库区的同震地表破裂带上见到 2 个同震破裂点,并进行了同震地表破裂的测量,获得了测量点位置的经纬度、海拔高程、位错量等数据。

第 1 个点在紫坪铺水库北岸的庙子坪附近、都汶高速路至汶川方向 9km 处,据中铁二十一局都汶高速路项目部胡经理介绍,汶川 8 级地震将新建的都汶高速路路面错断(位置:东经 $103^{\circ}32'7.7''$,北纬 $31^{\circ}01'49.7''$,海拔高程 913m),形成了落差 1m、西南盘下降、西北盘向 E 水平右旋位移 1m 的同震地表破裂。从图 4 中的照片可见同震地表破裂形成的公路破损带已修复,路边还存在着断裂错动的遗迹。第 2 个点在龙池隧道内,我们在龙池隧道内见到了错动现象(隧道南端洞口位置为东经 $103^{\circ}33'55.0''$,北纬 $31^{\circ}02'51.5''$;海拔高程 1 038m),在距龙池隧道南端洞口北 20m 处形成了 20cm 的垂直落差、西北盘向 E 水平右旋位移 20cm 的同震地表破裂,将龙池隧道错断(图4)。这些资料说明有 1 条位移量不太大的汶川地震同震地表破裂分支穿过了紫坪铺水库库水区。

紫坪铺水库区观测的汶川地震余震结果表明(图3),余震分布主要局限在穿过库区的 NEE 向同震地表破裂——中滩铺断层的西北地带,说明穿过库区的 NEE 向的中滩铺断层是一个重要的断层面。

4 汶川 8 级地震初始破裂点深度的重新确定

震源深度往往被认为是区分水库诱发地震与天然地震的最重要的指标之一(胡毓良等,1979),也成为紫坪铺水库与汶川发生 8 级地震无关的重要根据。现由不同部门测定出的汶川 8 级地震的深度分别为 $14\text{km}^{\text{①}}$ 、 $19\text{km}^{\text{②}}$ 、 $12\text{km}^{\text{③}}$ 和 18.8km (陈九辉等,2009)(表 3)。但由于所使用的地震台站的震中距都在 20 多 km 以上(刘启元等,2008),需要得到近距离地震台站资料的验证。

紫坪铺水库专用台站分布于库区附近,最小台距 <10km,可以根据小台网来限定汶川 8 级地震初始破裂的位置和深度。我们读取了汶川 8 级地震在

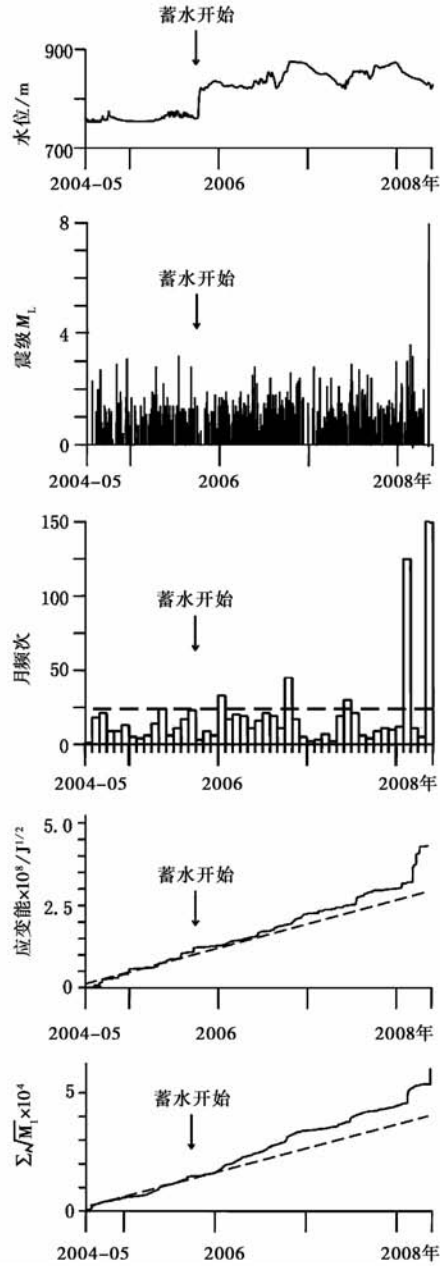


图 2 紫坪铺水库水位变化、地震 $M-T$ 图、月频次和蠕变能图

Fig. 2 The water level, $M-T$ plot, monthly frequency and creep deformation at Zipingpu reservoir.

① 同 176 页 ①。
② PDE,2008, <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/eqinthenews/2008/us2008ryan/>。
③ Harvard,2008, <http://www.globalcmt.org/cgi-bin/globalcmt-cgi-bin/CMT4/>。

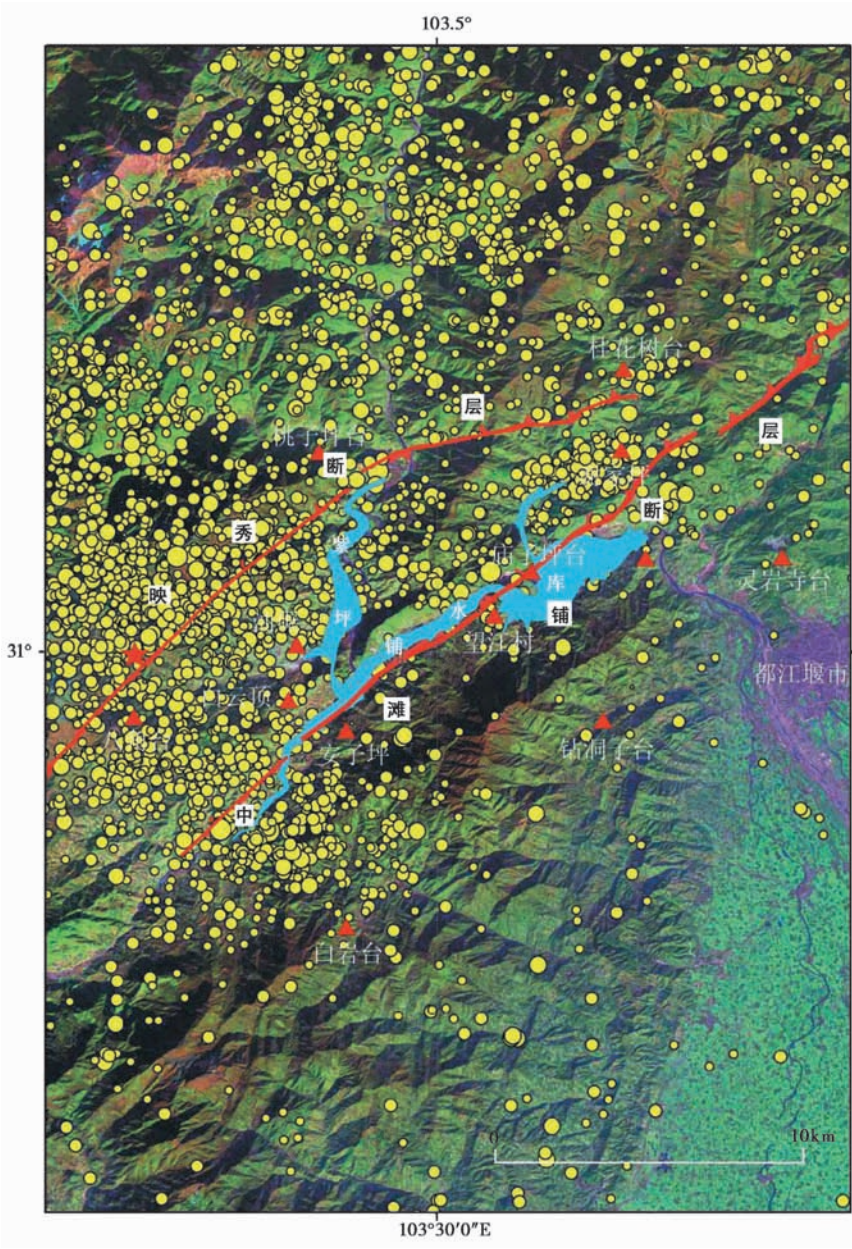


图 3 紫坪铺水库区汶川 8 级地震余震分布图

Fig. 3 The aftershock distribution of M_s 8.0 Wenchuan earthquake at Zipingpu reservoir area.

黄色圆圈为余震；红三角形为紫坪铺水库专用台站和加密台站；红五角星是汶川 8 级地震初始破裂修正位置（汶川地震同震地表破裂的地质调查资料来源于徐锡伟等,2008）

紫坪铺水库各地震台站的原始记录（图7a,表4）,它的 P 波初动震相和到时非常清楚,以八角地震台站到时最早。但由于汶川 8 级地震为多次破裂,除了 P 波初动较易辨认外,后续波包含了 S 波和其它破裂的 P 波后续波震相,非常复杂。

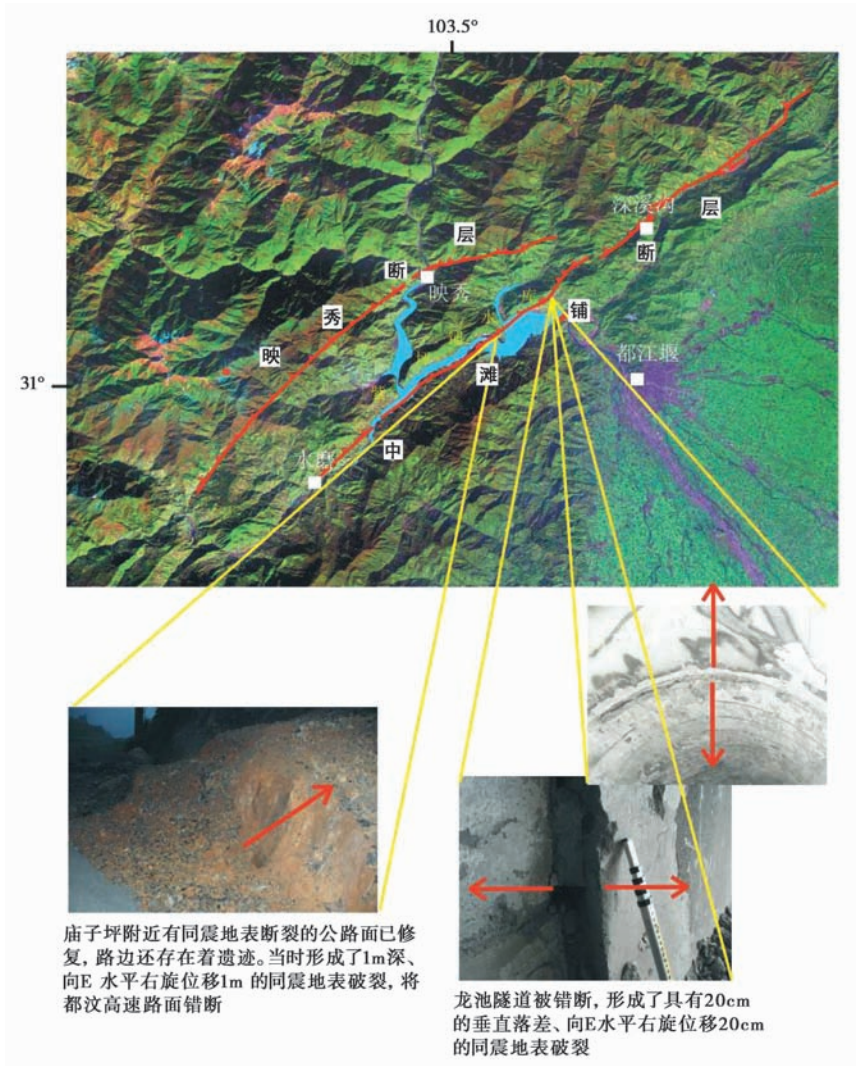


图 4 紫坪铺水库附近汶川 8 级地震同震地表破裂分布图

Fig. 4 The coseismic surface ruptures of 2008 Wenchuan earthquake near Zipingpu reservoir.

汶川地震同震地表破裂的地质调查资料来源于徐锡伟等,2008

表 3 已确定出的汶川 8 级地震基本参数

Table 3 The basic parameters of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake

日期	时间	纬度/(°)	经度/(°)	震源深度/km	数据来源
2008-05-12	14: 28: 01.5	31.002	103.322	19	PDE ^①
2008-05-12	14: 28: 04.0	31.0	103.4	14	中国地震局 ^②
2008-05-12	14: 28: 0.39	30.960 7	103.352 5	18.8	陈九辉等,2009

① 同 180 页 ②; ② 同 176 页 ①。

为了了解双差法分别使用 S-P 波到时差和 P 波到时的定位差异,我们特意分别使用 S-P 波到时差和初始 P 波到时数据计算了紫坪铺水库的地震分布,两者之间的定位精度<2km (图 5)。所以,我们可以使用初始 P 波震相进行汶川 8 级地震初始破裂点的重新定位。

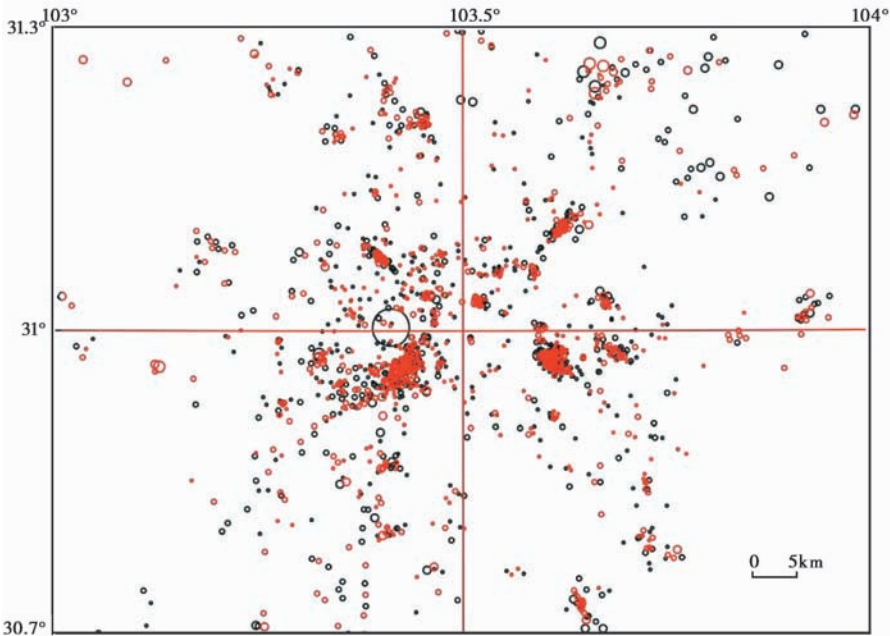


图 5 使用 S-P 波(红圈表示)和 P 波(黑圈表示)到时确定出的地震定位结果比较
Fig. 5 Comparison between the locations of earthquakes using S-P wave arrival time(red line) and P wave arrival time(black line) near Zippingpu reservoir.

考虑到紫坪铺水库地处川西过渡带上,分别使用平均地壳 P 波速度分层模型(雷建设等,2009)(表 5)和青藏高原地壳 P 波速度分层模型(黄媛等,2008)(表 6)。

如果将汶川 8 级地震的发震时刻、震中位置和深度按照(14: 28: 00.39; 北纬 30.961, 东经 103.353; 18.8km)(陈九辉等,2009)设置为初始值(图 6 中的 A),使用初始 P 波震相和青藏高原地壳 P 波速度分层模型(黄媛等,2009),按照双差法计算得到汶川地震的发震时刻、震中位置和深度分别是(14:27:59.450; 北纬 31.000 046, 东经 103.380 116; 8.548km),见图 6 中的 A'。

如果将汶川 8 级地震的发震时刻、震中位置和深度按照(14: 28: 00.39; 北纬 30.984, 东经 103.450; 10.2km)假设为初始值(图 6 中的 B),使用初始 P 波震相和雷建设等(2009)的地壳 P 波

表 4 紫坪铺水库地震台站汶川 8 级地震初始波到时
Table 4 The arrive time of initial P wave of M_s 8.0 Wen-chuan earthquake at the seismic stations in Zippingpu reservoir

台站名称	台站代码	震相	波到时			
			年-月-日	时	分	秒
八角	BAJ	P	2008-05-12	14	28	0.59
桃子坪	TZP	P	2008-05-12	14	28	1.34
白岩	BAY	P	2008-05-12	14	28	1.51
庙子坪	MZP	P	2008-05-12	14	28	1.77
钻洞子	ZDZ	P	2008-05-12	14	28	2.37
桂花树	GHS	P	2008-05-12	14	28	2.71
灵岩寺	LYS	P	2008-05-12	14	28	3.42

速度分层模型,使用双差法计算得到汶川地震的发震时刻、震中位置和深度分别是(14: 27: 59.93; 北纬 30.995 432,东经 103.406 859; 6.154km),见图 6 中的 B'。

所以,汶川 8 级地震的发震时刻为 14: 27: 59.450,震中位置为北纬 31.000 046,东经 103.380 116;考虑到紫坪铺水库附近的地壳 P 波速度模型的不确定性,初始破裂深度应该在 6 ~ 9km 范围内。

5 库区小震与汶川主震的到时差对比分析

修正后的汶川 8 级地震发生初始破裂的地点位于八角地震台站北,初始破裂深度在 6 ~ 9km 范围内,与水磨震群非常接近。汶川地震与水磨震群的关系成为紫坪铺水库与汶川地震关联的纽带。在 2005 年 9 月 30 日蓄水前水磨附近已经有小震存在,紫坪铺水库的 3 次蓄水、2 次放水过程中水磨都发生了地震(距最高库水位 2 ~ 3km),其大部分震源深度在 3 ~ 8km 之间。

表 5 P 波地壳速度分布(雷建设等,2009)
Table 5 The distribution of P-wave velocity in Sichuan Province(after LEI Jian-she *et al.*,2009)

深度/km	0.0	5.0	12.0	20.0	35.0
速度/km·s ⁻¹	4.80	5.80	6.20	6.40	6.60

表 6 青藏高原地壳 P 波速度
分层模型(黄媛等,2008)
Table 6 The distribution of crustal P-wave velocity in Tibet Plateau(after HUANG Yuan *et al.*,2009)

深度/km	0.0	2.0	28.0	64.0	75.0
速度/km·s ⁻¹	5.20	6.03	7.25	7.90	8.10

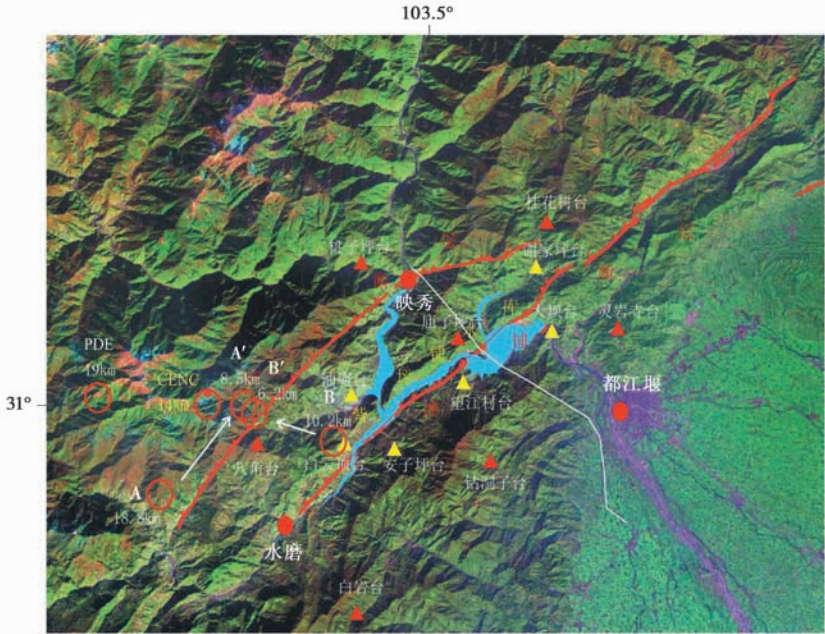


图 6 汶川 8 级地震初始破裂位置和深度的重新定位结果
Fig. 6 The relocation result of the initial rupture location and depth of M_s 8.0 Wenchuan earthquake near Zipingpu reservoir.

A 和 A'分别按照(14: 28: 00.39; 北纬 30.961,东经 103.353; 18.8km)(陈九辉等,2009)设置为初始值和重新定位; B 和 B'分别按照(14: 28: 00.39; 北纬 30.984,东经 103.450; 10.2km)设置为初始值和重新定位

而从紫坪铺水库的震源机制结果看,水磨震群与汶川 8 级地震的逆冲断层型震源机制一致(胡先明等,2009)。

在 2008 年 4 月 5 日 04:01:16.54 的水磨震群中有 1 个 $M_L 1.3$ 地震,该地震在各台站的初动到时差与汶川 8 级地震惊人地相同,位置在未来主震的初始破裂位置上(图7),而该小震震源深度在 7.8km 左右,这意味着汶川地震的初始破裂点的位置在当时已经开始出现破裂。

6 结论

以上列举了 4 个重要事实:水库蓄水与应变能释放加速在时间上同步;贯穿库区存在 1 条中滩铺断层,而蓄水后出现的水磨、深溪沟震群恰好位于该断层的两端;震后又发现了同震位移;利用库区专用台站对汶川主震进行了重新定位,结果显示:汶川 8 级地震的发震时刻为 14:27:59.450,初始破裂点位于八角地震台北 1km 处(北纬 31.000 046,东经 103.380 116),震源深度在 6~9km 之间,说明主震位置更接近库区,深度较浅;对比汶川 8 级地震前水磨震群中的小震和汶川主震的到时差记录,发现两者在各个台站的到时差惊人地相同,说明 2 个地震的震源位置非常接近。这些事实从时间上和空间上说明汶川地震与紫坪铺水库有一定的联系。

7 讨论

紫坪铺水库地处高烈度区,在蓄水前存在着较为频繁的小震或弱震活动,最大地震震级为 3 级左右,年地震应变释放约为 $1.2 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,根据 2004 年印度尼西亚 9 级地震之后的红外增温结果(马瑾等,2010),龙门山断裂带上的构造应力得到了进一步的增强,正进行着孕震过程。

而在紫坪铺水库西南的水磨地区,浅部分布着易发生水库诱发地震的灰岩。再加上该地蓄水之前不断发生的小震活动,在其地壳浅部形成了许多裂缝,并且中滩铺断层穿过了紫坪铺库区。所以,紫坪铺水库具备了水库诱发地震的渗漏条件。

在已往的大多数水库诱发地震震例中(胡毓良等,1979;丁原章等,1989;杨清源等,1996),往往存在着不小的前震或越来越多的微震,仅从 $M-T$ 图上能够很明显地显示出地震活动增强的现象,成为了水库诱发地震震例的重要标志之一。例如,中国新丰江水库在 6.1 级地震前的最大前震为 4 级,并伴有地震频次不断增强的现象。印度的柯依那 6.5 级水库地震前存在着 5 级地震。而汶川 8 级地震的前震只有 3.6 级,即使对 1 次 8 级天然地震来说前震震级都偏低。有一种可能是因为诱发的主要是断层的重新活动,其前震数量比较少,可以从含已知断层面的岩石力学实验中的声发射活动特征得到验证(马瑾,1987)。

在汶川 8 级地震发生后,我们根据哈佛大学的矩心矩张量解目录,在 1977 年 1 月至 2010 年 6 月期间内在川滇及邻近地区总共收集了大于 $M_s 4.5$ 的中强震级以上的地震 124 次,大多数地震震级为 $5 < M_s \leq 6$,其中最大地震为 2008 年 5 月 12 日的 $M_s 8.0$ 汶川地震,该构造应力场方向为 245° ,倾角为 9° (马文涛等,2010),而汶川地震发生前原构造应力场的最大应力 σ_1 的方位角为 257° ,倾角为 16° ;中间应力 σ_2 的方位角为 87° ,倾角 74° ;最小应力 σ_3 的方位角为 348° ,倾角 3° (许忠淮等,1987;崔效锋等,1999,2006),说明汶川地震的发生没有引起构造应力场的变化。由于汶川 8 级地震主震破裂起始点的震源机制解以逆冲为主(王勤彩等,2009),逐步由以逆冲断层型为主转变成走滑型为主(王卫明等,2008),倾角 60° ,与构造应力场的最大应力 σ_1 夹角 56° ,其摩擦系数等于 0.75,非常不利于产生滑动,因此,我们断定区域构造应力场不

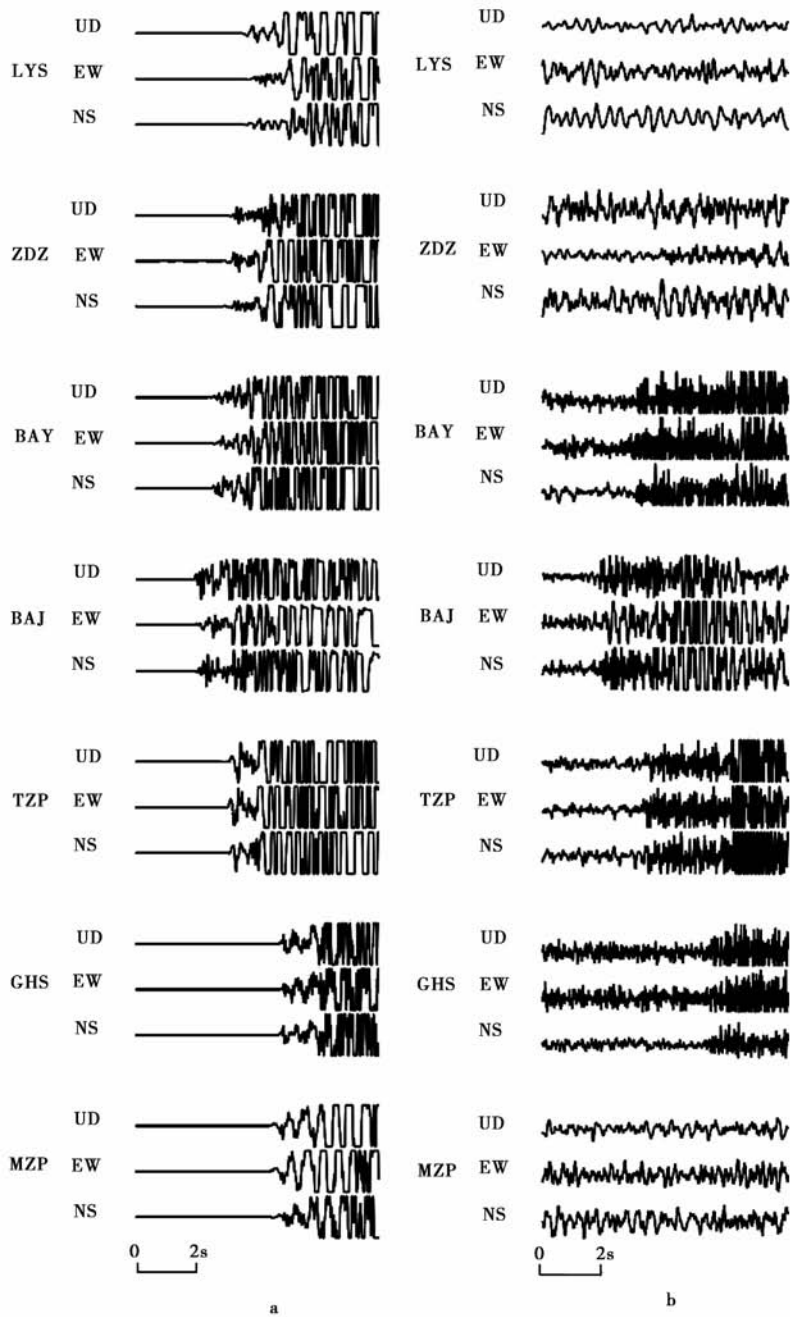


图 7 汶川 8 级地震(a)与水磨震群中 2008 年 4 月 5 日 04:01:16.54 的 $M_L 1.3$ 地震(b)波形比较
Fig. 7 The comparison between the waveform of the $M_s 8.0$ Wenchuan earthquake(a)and the $M_L 1.3$ earthquake(b) near Shuimo area at Zipingpu reservoir at 04: 01: 16.54 on April 5,2008.

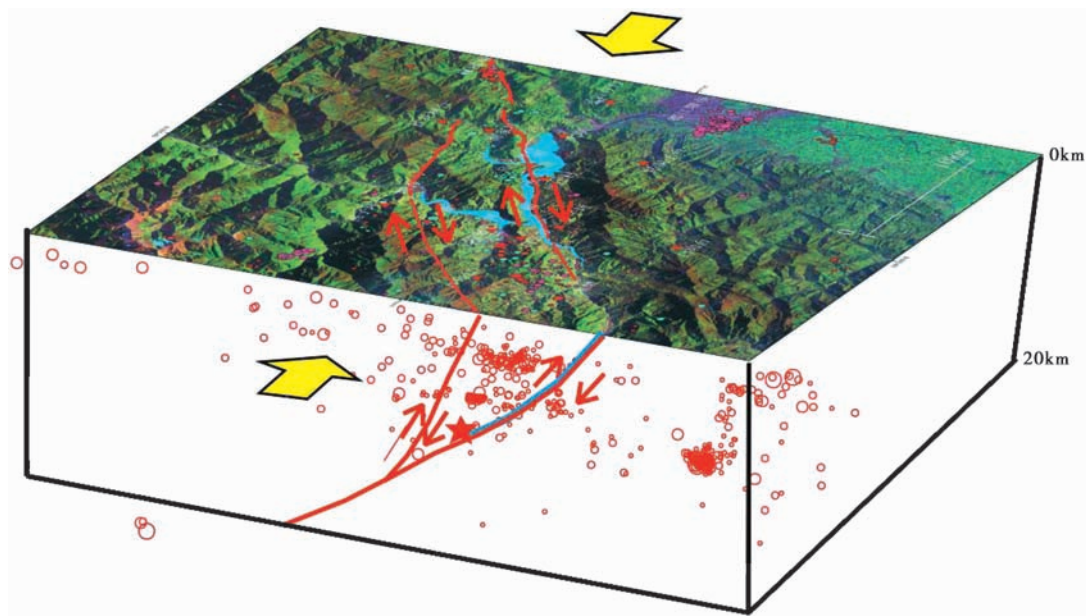


图 8 紫坪铺水库诱发汶川 8 级地震的过程示意图

Fig. 8 The diagrammatic sketch of the process of Zipingpu reservoir inducing the M_s 8.0 Wenchuan earthquake.

红圈为汶川 8 级地震之前的地震；红五角星是汶川 8 级地震初始破裂的修正位置

是汶川 8 级地震的初始发震力。

从紫坪铺水库的震源机制结果看,水磨震群与汶川 8 级地震的逆冲断层型震源机制一致(胡先明等,2009)。中央断裂带南段由 2 条地表断裂带组成,其中一条为映秀断裂,另一条就是穿过紫坪铺水库库区的中滩铺断层,在整个龙门山断裂带的中央断裂带中形成向 NW 凸出的形状。因此,这种凸凹体形成的局部应力场是汶川 8 级地震的初始发震力。

在紫坪铺水库蓄水前存在着较为频繁的小震或弱震活动,最大地震震级为 3 级左右,年蠕变能释放约为 $1.2 \times 10^8 \text{ J}^{1/2}$,可能正在进行着孕震过程。紫坪铺水库 2005 年蓄水之后,在一定的水压和水渗透作用下,在距库水 10 余 km 范围内先后发生了水磨震群与深溪沟震群,地震震源深度大都在 3 ~ 8 km 之间,在 2 年半的时间内多释放了 200% 的蠕变能,并且在汶川地震前呈现出加速释放的现象,引发中滩铺断层局部右旋的小错动,明显加速了局部应力场改变的步伐,进一步引起断裂两侧的都江堰等地的应力集中。在都江堰震群发生后,相当于将顶在中央断裂带南段中滩铺断层下的“塞子”去掉,引发了中滩铺断层的整体逆冲错动,带动破裂沿中央断裂逐步错动,在区域构造应力场的作用下,汶川 8 级地震的震源机制逐步由以逆冲断层型为主转变成以走滑型为主(图 8)。

致谢 四川省地震局提供了紫坪铺水库专用台站资料,马瑾院士对本项工作进行了指导,闻学泽研究员提供了活动断裂资料,在此一并表示谢意。

参 考 文 献

陈九辉,刘启元,李顺成,等. 2009. 汶川 M_s 8.0 地震余震序列重新定位及其地震构造研究 [J]. 地球物理学报,

52(2): 390—397.

CHEN Jiu-hui, LIU Qing-yuan, LI Shun-cheng, *et al.*, 2009. Seismotectonic study by relocation of the Wenchuan M_s 8.0 earthquake sequence [J]. Chinese J Geophys, 52(2): 390—397 (in Chinese).

陈颙. 2009. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? [J]. 中国科学(D辑), 39(3): 257—259.

CHEN Yong. 2009. Did the reservoir impoundment trigger the Wenchuan earthquake? [J]. Science in China(Ser D), 52(4): 431—433.

崔效峰, 谢富仁. 1999. 利用震源机制解对中国西南及邻区进行应力分区的初步研究 [J]. 地震学报, 21(5): 513—522.

CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren. 1999. Preliminary research to determine stress districts from focal mechanism solutions in Southwest China and its adjacent area [J]. Acta Seismologica Sinica, 21(5): 513—522 (in Chinese).

崔效峰, 谢富仁, 张红艳. 2006. 川滇地区现代构造应力场分区及动力学意义 [J]. 地震学报, 28(5): 451—461.

CUI Xiao-feng, XIE Fu-ren, ZHANG Hong-yan. 2006. Recent tectonic stress field zoning in Sichuan-Yunnan region and its dynamic interest [J]. Acta Seismologica Sinica, 19(5): 485—496.

丁原章. 1989. 水库诱发地震 [M]. 北京: 地震出版社.

DING Yuan-zhang. 1989. The Reservoir Induced Earthquake [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

范晓. 2008. 汶川大地震地下的奥秘 [J]. 中国国家地理, (6): 101—139.

FAN Xiao. 2008. Wenchuan earthquake: Underground mysteries [J]. Chinese National Geography, (6): 101—139 (in Chinese).

傅淑芳, 刘宝程. 1991. 地震学基础 [M]. 北京: 地震出版社.

FU Shu-fang, LIU Bao-cheng. 1991. An Introduction to Seismology [M]. Seismological Press, Beijing (in Chinese).

胡先明, 张永久, 谢蓉华, 等. 2009. 紫坪铺水库区小地震震源机制研究 [J]. 地震地质, 31(4): 676—685.

HU Xian-ming, ZHANG Yong-jiu, XIE Rong-hua, *et al.* 2009. Research on focal mechanism of small earthquakes in Zipingpu reservoir area [J]. Seismology and Geology, 31(4): 676—685 (in Chinese).

胡毓良, 陈献程. 1979. 中国的水库地震及有关成因的讨论 [J]. 地震地质, 1(4): 45—57.

HU Yu-liang, CHEN Xian-cheng. 1979. Discussion on the reservoir-induced earthquakes in China and some problems related to their origin [J]. Seismology and Geology, 1(4): 45—57 (in Chinese).

黄媛, 吴建平, 张天中, 等. 2008. 汶川 8.0 级大地震及其余震序列重定位研究 [J]. 中国科学(D辑), 38(10): 1242—1249.

HUANG Yuan, WU Jian-ping, ZHANG Tian-zhong, *et al.* 2008. The relocation of Wenchuan M_s 8.0 earthquake and its aftershock sequence [J]. Science in China(Ser D), 38(10): 1242—1249 (in Chinese).

雷建设, 赵大鹏, 苏金蓉, 等. 2009. 龙门山断裂带地壳精细结构与汶川地震发震机理 [J]. 地球物理学报, 52(2): 339—345.

LEI Jian-she, ZHAO Da-peng, SU Jin-rong, *et al.* 2009. Fine seismic structure under the Longmenshan Fault zone and the mechanism of the large Wenchuan earthquake [J]. Chinese Journal of Geophysics, 52(2): 339—345 (in Chinese).

雷兴林, 马胜利, 闻学泽, 等. 2008. 地表水体对断层应力与地震时空分布影响的综合分析: 以紫坪铺水库为例 [J]. 地震地质, 30(4): 1046—1064.

LEI Xing-lin, MA Sheng-li, WEN Xue-ze, *et al.* 2008. Integrated analysis of stress and regional seismicity by surface loading: A case study of Zipingpu reservoir [J]. Seismology and Geology, 30(4): 1046—1064 (in Chinese).

刘启元, 陈九辉, 李顺成, 等. 2008. 汶川 M_s 8.0 地震: 川西流动地震台阵观测数据的初步分析 [J]. 地震地质, 30(3): 584—596.

LIU Qi-yuan, CHEN Jiu-hui, LI Shun-cheng, *et al.* 2008. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake: Preliminary results from the western Sichuan mobile seismic array observations [J]. Seismology and Geology, 30(3): 584—596 (in Chi-

- nese).
- 卢显,张晓东,周龙泉,等.2010.紫坪铺水库库区地震精定位研究及分析[J].地震,30(2):10—30.
- LU Xian,ZHANG Xiao-dong,ZHOU Long-quan,*et al.*2010. Accurate relocation and analysis of earthquakes in the Zipingpu reservoir area,Sichuan,China [J]. Earthquake,30(2):10—30(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).
- 马瑾,陈顺云,扈小燕,等.2010.大陆地表温度场的时空变化与现今构造活动[J].地学前缘,17(4):1—14.
- MA Jin,CHEN Shun-yun,HU Xiao-yan,*et al.*2010. Spatial-temporal variation of the land surface temperature field and present-day tectonic activity [J]. Earth Science Frontiers,17(4):1—14(in Chinese).
- 马文涛,徐锡伟,于贵华,等.2010.汶川地震发震构造应力场分析(摘要)[J].国际地震动态,6:18.
- MA Wen-tao,XU Xi-wei,YU Gui-hua,*et al.*2010. Analysis on the tectonic stress field of Wenchuan earthquake (Abstract) [J]. Recent Developments in World Seismology,6:18.
- 王勤彩,陈章立,郑斯华.2009.汶川大地震余震序列震源机制的空间分段特征[J].科学通报,54(16):2348—2354.
- WANG Qin-cai,CHEN Zhang-li,ZHENG Si-hua.2009. Spatial segmentation characteristic of focal mechanism of after-shock sequence of Wenchuan earthquake [J]. Chinese Sci Bull,54(16):2348—2354(in Chinese).
- 王卫明,赵连峰,李娟,等.2008.四川汶川8.0地震震源过程[J].地球物理学报,51(5):1403—1410.
- WANG Wei-ming,ZHAO Lian-feng,LI Juan,*et al.*2008. Rupture process of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake of Sichuan,China [J]. Chinese J Geophys,51(5):1403—1410(in Chinese).
- 徐锡伟,闻学泽,叶建青,等.2008.汶川 M_s 8.0 地震地表破裂带及其发震构造[J].地震地质,30(3):597—629.
- XU Xi-wei,WEN Xue-ze,YEI Jian-qing,*et al.*2008. The M_s 8.0 Wenchuan earthquake surface ruptures and its seismogenic structure [J]. Seismology and Geology,30(3):597—629(in Chinese).
- 许忠淮,汪素云,黄雨蕊,等.1987.由多个小震推断的青甘和川滇地区地壳应力场的方向特征[J].地球物理学报,30(5):476—486.
- XU Zhong-huai,WANG Su-yun,HUANG Yu-rui,*et al.*1987. Directions of mean stress axes in Southwestern China deduced from micro earthquake data [J]. Chinese Journal of Geophysics,30(5):476—486(in Chinese).
- 杨清源,胡毓良,陈献程.1996.国内外水库诱发地震目录[J].地震地质,18(4):453—461.
- YANG Qing-yuan,HU Yu-liang,CHEN Xian-cheng.1996. Catalogue of the reservoir-induced seismic events in the world [J]. Seismology and Geology,18(4):453—461(in Chinese).
- Gahalaut K, Gahalaut V K.2010. Effect of the Zipingpu reservoir impoundment on the occurrence of the 2008 Wenchuan earthquake and local seismicity [J]. Geophysical Journal International,183:277—285.
- Kai Deng,Shiyong Zhou,Rui Wang,*et al.*2010. Evidence that the 2008 M_w 7.9 Wenchuan earthquake could not have been induced by the Zipingpu reservoir [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,100(5B):2805—2814.
- Shemin Ge,Mian Liu,Ning Lu,*et al.*2009. Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? [J]. Geophysical Research Letters,36,L20315. doi: 10.1029/2009GL040349.
- Richard A K, Richard S. 2009. A human trigger for the great quake of Sichuan? [J]. Science,323:322.
- Waldhauser F, Ellsworth W L.2000. A double-difference earthquake location algorithm: Method and application to the northern Hayward Fault,California [J]. Bulletin of the Seismological Society of America,90(6):1353—1368.

STUDY ON THE RELATIONSHIP BETWEEN THE RESERVOIR-INDUCED SEISMICITY AT ZIPINGPU RESERVOIR AND THE M_s 8.0 WENCHUAN EARTHQUAKE

MA Wen-tao¹⁾ XU Chang-peng^{1,2)} ZHANG Xin-dong³⁾
XU Xi-wei¹⁾ LI Hai-ou¹⁾ YUAN Jing-li¹⁾

1) *National Geophysical Field Observatory at Lhasa, Institute of Geology,
China Earthquake Administration, Beijing 100029, China*

2) *Earthquake Administration of Shandong Province, Jinan 250014, China*

3) *Handan Seismic Station of Earthquake Administration of Hebei Province,
Handan 056001, China*

Abstract

Using the observations of the Zipingpu reservoir seismic network (including seven short-period seismic stations, with an average station distance of 10km) of the period from July 2004 to 2009, and the data from January-December 2009 recorded by the intensive seismic observation network (six short-period seismic stations with the station spacing of 3km), 930 foreshocks near Zipingpu reservoir, the main shock, and 5789 aftershocks, as well as the initial rupture of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake were relocated with double difference location algorithm. Combined with the geological field investigations, the analysis of seismic activity in Zipingpu reservoir area, the distribution of coseismic surface rupture, the depth of initial rupture location of Wenchuan M_s 8.0 earthquake, and the after-shock distribution, we find that the occurrence of M_s 8.0 Wenchuan earthquake has close relation with Zipingpu reservoir: 1) The seismic swarms at the Shuimo, and Dujiangyan and Shengxigou area are 10 kilometers away from the reservoir, the seismic strain release caused by Zipingpu reservoir increased by 200%, and the release was closely related to water level changes and accelerated before the Wenchuan earthquake; 2) There are two northeast directed coseismic surface rupture zones with 1m displacement along Zhongtanpu Fault; 3) the aftershocks of Wenchuan earthquakes are mainly distributed on northwestern wall of the Zhongtanpu Fault; 4) The relocation revealed that the Wenchuan earthquake occurred at 27 minutes, 59.5 seconds, the depth is between 6 ~ 9km; and 5) by comparison, the focal depths of the fore-shocks occurring on 2008-04-05 are about 7.8km, and the initial time of waveforms of this swarm is same as that of the M_s 8.0 Wenchuan earthquake.

Key words Zipingpu reservoir, Wenchuan earthquake, reservoir-induced seismicity, coseismic surface rupture, initial rupture, earthquake swarm

〔作者简介〕 马文涛,男,1958年出生,1996年毕业于中国地震局地质研究所地球物理学专业,获博士学位,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:010-62009029 或 13651308114, E-mail: wentaoma@sina.com 或 wentaoma_1@126.com。