

溪洛渡水库近场区蓄水前后震源机制及应力场研究^{*}

苏 珊, 韩立波[♣], 郭祥云

(中国地震局地球物理研究所, 北京 100081)

摘要: 利用国家测震台网数据备份中心提供的近震数字波形记录, 采用基于 P 波初动和 S/P 地动位移振幅比的 HASH 方法, 计算了溪洛渡水库近场区 2009 年 1 月—2018 年 12 月 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解; 从中选取质量可靠的震源机制解, 采用阻尼区域应力反演方法获得了该区的应力场图像; 基于震源机制解和应力场的时空分布, 探讨了水库蓄水对当地应力环境的影响。结果表明: 蓄水前地震类型以过渡型为主, 走滑和逆冲型地震次之, 正断型最少; 蓄水后, 过渡型地震明显减少, 其它类型地震均不同程度增多, 逆冲型地震数量与蓄水前相比增加近一倍。蓄水前后区域应力场发生了一定变化, 具体表现为最小压应力轴的仰角增大, 变化非常显著。这可能表明, 蓄水造成的应力加载与地壳中应力量级可以比拟, 对当地的应力环境提供了重要约束。

关键词: 溪洛渡水库; 震源机制解; 应力场; HASH 方法; 阻尼区域应力场反演法

中图分类号: P315.72 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0666(2020)02-0402-10

0 引言

溪洛渡水电站位于四川省雷波县和云南省永善县接壤的金沙江峡谷段, 是兼具发电、防洪、拦沙以及改善下游航运条件等综合效益的特大型水利工程, 处于高地震烈度区, 因此, 对大坝的抗震设防建设提出了很高的要求^①。

震源机制解和震源深度可以直观地反映地震破裂的几何特征和运动学特征, 是研究区域构造应力的基础数据资料。祁玉萍等 (2018) 基于 $M_L \geq 3.5$ 地震的震源机制解资料对大凉山次级块体及邻区的应力场特征进行了详细的分析, 并描述了主要断裂带的活动特征; 王晓山等 (2015) 针对南北地震带大尺度范围内震源机制解以及应力场的详细研究, 为地球动力学过程的模拟和活动断层滑动性质的厘定提供了参考。

由于受到震源机制解资料空间分布以及数量的限制, 以往的研究多着眼于较大范围内的应力场, 而未能对溪洛渡水电站坝址所在的雷波—永善三角形块体内部的应力分布做深入的研究。随

着新的震源机制解求解方法 (Zhu, Helmberger, 1996; Hardebeck, Shearer, 2002; 严川等, 2015; 潘睿等, 2019) 与构造应力场反演方法 (Hardebeck, Michael, 2006) 的发展, 本文在刁桂苓等 (2014) 的基础上, 增加研究资料, 进一步开展库区主要断裂带周边应力场分布特征的研究, 详细分析区域内地下构造应力情况及断层破裂时的力学机制。

1 研究区概况

溪洛渡工程场区地处地震地质活动强烈的青藏块体与活动不强烈的华南地块交界处、大凉山次级地块内部 (张培震等, 2003; 刁桂苓等, 2014), 近场区 20 ~ 30 km 范围内主要分布有莲峰断裂以及马边—盐津构造断裂带内的多条小型断裂, 构成了一个近三角形的小断块——雷波—永善三角形块体。三角形块体的西边界为峨边—金阳断裂, 东边界由利店、玛瑙和猓子坝 3 条小型断裂构成, 南边界为莲峰断裂。其中, 西边界峨边—金阳和东边界利店、玛瑙以及猓子坝断裂均隶

^{*} 收稿日期: 2019-04-03.

基金项目: 国家重点研发计划——坝址地震动输入研究 (2017YFC0404901) 资助.

♣ 通讯作者: 韩立波 (1979-), 研究员, 主要从事数字地震学研究. E-mail: chinakkmm@gmail.com.

^① <https://www.ctg.com.cn/sxjt/zt98/cyjsj/xwtqh/313438/index.html>.

属于 NNW 向的广义马边—盐津地震断裂带, 整体上具有左旋走滑和挤压的运动分量 (赵静等, 2014; 王晓山等, 2015), 为坝址区最主要的控震构造。该断裂带地质构造情况复杂, 地震活动性强, 工程场区 50 km 范围内曾发生过多次 6 级以上强震, 包括 1216 年马湖 $M7.0$ 地震、1936 年马边 $M6\frac{3}{4}$ 地震群和 1974 年大关北 $M7.1$ 地震等。同时, 中小地震活动也十分活跃, 特别是自 2013 年 5 月 4 日水库蓄水以来, 该区域地震活动显著增强, 库区 20 km 范围内发生 5.0 级以上地震 2 次, 分别为 2014 年 4 月 5 日永善 5.3 级地震与 2014 年 8 月 17 日永善 5.0 级地震, 均发生在坝址上游河段与峨边—金阳分支断裂交汇处, 因此, 溪洛渡工程场地的地震活动与水库蓄水之间的关系值得探讨。

2 数据和研究方法

2.1 数据选取

根据研究区的地震活动性 (图 1, 2) 可以看出, 溪洛渡水库自 2013 年 5 月 4 日蓄水后地震活动明显增强, 因此本文研究数据分为 2 部分: ①选取 2013 年 5 月—2018 年 12 月 (蓄水后) 溪洛渡水电站近场区永善—雷波三角地块内 ($27.7^{\circ} \sim 29.4^{\circ}\text{N}$, $103.2^{\circ} \sim 104^{\circ}\text{E}$) $M_L \geq 2.0$ 地震 364 个 (图 2), 用以对水库近场区进行详细研究, 地震波形数据来自中国地震局地球物理研究所国家数字测震台网数据备份中心、四川地震台网、云南地震台网 (郑秀芬等, 2009) 的共 85 个台站, 选取每个地震震中距 200 km 以内的台站, 从中挑选 P 波初动极性清晰的数据进行震源机制解反演; ②收集 2009 年 1 月—2013 年 4 月 (蓄水前) 研究区内 $M_L \geq 2.0$ 地震震源机制解 114 个 (冯向东等, 2015) (图 2), 与蓄水后所得到的震源机制解结果

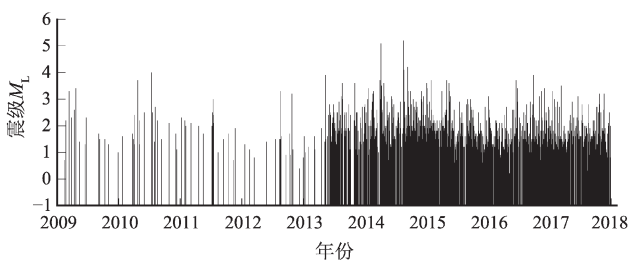


图 1 溪洛渡坝址近场区 $M-t$ 图

Fig. 1 $M-t$ diagram in the vicinity of the Xiluodu Reservoir

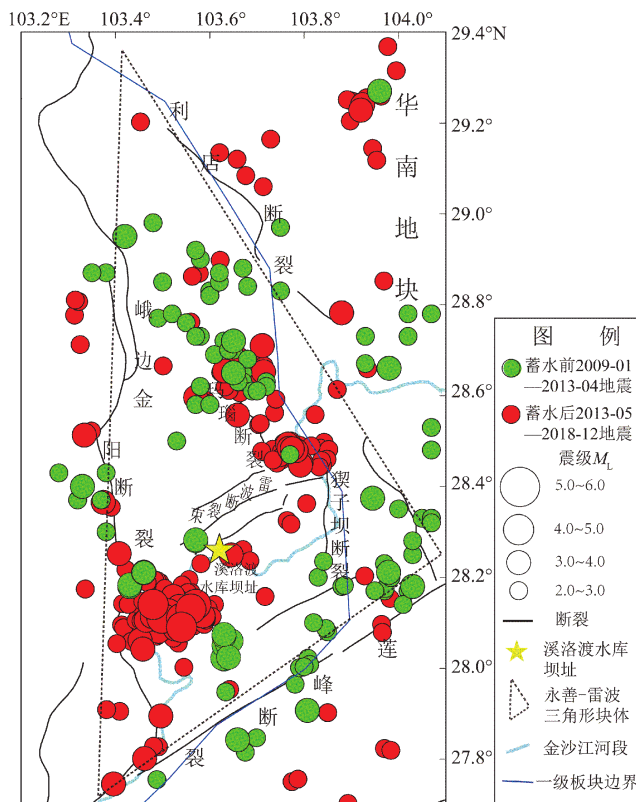


图 2 溪洛渡水库近场区蓄水前后地震分布

Fig. 2 Seismicity in the vicinity of the Xiluodu Reservoir before and after reservoir impoundment

进行对比, 从而研究水库蓄水对区域构造环境的影响。

2.2 震源机制解反演方法

由于研究区内地震震级普遍较小, 能量较小, 其高频成分丰富, 波形反演时受速度结构影响更为显著。而所选择台站震中距均在 200 km 以内, 属于近震或地方震, 观测条件和噪声对地震波形影响较大, 利用传统的波形反演方法难度大 (Hardebeck, Shearer, 2002), 因此本文选用基于 P 波初动极性和 S/P 地动位移振幅比的 HASH 方法 (Hardebeck, Shearer, 2002, 2003) 反演其震源机制解。采用 HSAH 方法反演时, P 波初动极性拾取操作相对更简单, 近似认为仪器对直达 P 波和 S 波的频率响应相同, 振幅比可在一定程度上消除仪器影响, 可以保证反演结果的可靠性。

HASH 方法的基本原理是基于不同方位、不同震中距的台站的地震波形记录, 利用直达 P 波和直达 S 波引起的地动位移振幅比对节面位置进行约束, 再利用从震源向上射出的直达 P 波的初动极

性确定象限力轴性质，从而获取震源机制解。利用 P 波初动极性和 S/P 的地动位移振幅比，通过假定震源模型参数，计算给定速度结构下各观测台站所产生的地震波特征，并与实际观测地震波资料进行对比，拟合最好的模型参数作为震源机制解。该方法可在一定程度上克服震源位置、速度模型和极性观测误差的影响，对于中小地震有良好的适用性，得到了广泛应用（郭祥云等，2014；王晓山等，2015；孙贵成等，2015）。

2.3 应力场反演方法

本文采用阻尼区域应力反演方法（SATSI）进行应力场研究，实际计算过程主要利用 MSATSI 软件包（Martínez – Garzón *et al*，2014）对应力场进行反演。这种方法基于线性反演技术，与网格搜索方法相比反演速度更快，能够最大程度上拟合数据，消除人为影响。该方法主要原理是首先将震源机制解按照分布区域划分到若干个网格中，再采用阻尼最小二乘法（线性反演方法）反演得到每个网格内的应力张量，并进行平滑。反演过程中无需人为划分地震，所获得的应力时空变化效果较好，同时利用阻尼 e 控制数据的拟合残差和模型长度的相关权重。本文采用 2D（应力表面分布）应力反演结果表示研究区内的应力分布情况，方法原理详见 Hardeback 和 Michael（2006）的研究。

3 研究结果











3.1 震源机制解结果可靠性分析

本文主要使用 HASH 方法，反演得到溪洛渡水库蓄水后库区近场范围内 $M_L \geq 2.0$ 地震的 364 个震源机制解。为验证结果的可靠性，选取研究区内 4 个 $M_L \geq 4.0$ 地震，采用“裁剪 – 粘贴”方法（简称 CAP）（Zhao，Helmberger，1994；Zhu，Helmberger，1996）反演其震源机制解，并与 HASH 方法得到的结果进行对比。

采用 CAP 方法时，本文选取每个地震震中距 300 km 内约 10 个台站的数据，尽量保证台站体波和面波的理论波形与实际波形的拟合相关系数在 75% 以上，带通滤波范围为 0.02 ~ 0.15 Hz。使用 HASH 方法时，为了保证结果的可靠性，选取震中距 150 km 以内，同时信噪比大于 3 的记录清晰的地震波形，参与反演的台站记录不少于 6 个。2 种方法均采用 CRUST2.0 一维水平分层的地下速度模型。由表 1 可知，对于同一地震，2 种方法及不同机构给出的节面解走向、倾角、滑动角参数以及应力轴方位角、仰角之间差异均较小。2 种方法获得的结果基本一致，说明本文利用 HASH 方法获得的震源机制解反演结果是较为可靠的。

表 1 采用 HASH 和 CAP 方法反演部分地震震源机制解及其与其他机构结果对比

Tab. 1 Comparison of the focal mechanism solutions between HASH method and CAP method are used this study and other studies

发震时间	λ_E / (°)	φ_N / (°)	震源深度 / km	M_w	节面 I / (°)			节面 II / (°)			P 轴 / (°)		T 轴 / (°)		B 轴 / (°)		震源机制解	方法	研究机构
					走向	倾角	滑动角	走向	倾角	滑动角	方位角	倾角	方位角	倾角	方位角	倾角			
2014-08-17 06:07:59	103.51	28.12	7	5	222	80	164	315	74	10	269	4	178	18	11	71		HASH	本文
	103.51	28.12			227	90	162	317	72	0	273	13	181	13	47	72		CAP	
	103.55	28.12			226	86	168	317	78	5	272	6	181	11	28	77			GCMT(2014)
	103.5	28.1			229	90	152	319	62	0	278	19	180	19	49	62			CEA – IGP (韩立波, 2014)
2014-08-17 16:45:53	103.54	28.11	7	4.1	239	76	155	335	66	15	289	7	195	27	32	62		HASH	本文
	103.54	28.11			253	90	173	343	83	0	298	5	208	5	73	83		CAP	
2014-08-17 17:11:47	103.56	28.13	5	4.2	235	84	170	326	80	6	281	3	190	11	24	78		HASH	本文
	103.56	28.13			258	90	168	348	78	0	304	8	212	8	78	78		CAP	
2014-08-20 18:20:55	103.54	28.09	6	4.3	62	87	-172	332	82	-3	287	8	197	4	82	81		HASH	本文
	103.54	28.09			77	81	-170	345	80	-9	301	13	211	1	119	77		CAP	

3.2 蓄水前后震源机制解特征

利用 HASH 方法获得 2013 年 5 月—2018 年 1 月（水库蓄水后）近场范围内 364 个 $M_L \geq 2.0$ 地震和 2009 年 1 月—2013 年 4 月（蓄水前）研究区内 114 个 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解共计 478 个（冯向东等，2015）进行对比研究。依据 Zoback（1992）的断层类型划分原则，根据震源机制解 3 个应力轴 P，T，B 的倾角大小，将震源机制分为 6 种类型（表 2），并得到蓄水前后各个类型地震空间分布情况（图 3）和数量分布（表 3）。

由表 3 可见，蓄水前地震类型以过渡型为主，走滑和逆冲型地震次之，正断型最少。蓄水后，过渡型地震明显减少，其他类型地震均不同程度增多，逆冲型地震数量与蓄水前比较增加近一倍，正断型地震增加较少。从图 3 可看出，蓄水前地震主要分布在玛瑙断裂北段以及莲峰断裂一线，峨边—金阳断裂有少量分布，而坝址所在地以及水库的金沙江上下游河段地震稀少。蓄水后出现了

表 2 震源机制解类型划分

Tab. 2 Categories of tectonic stress regime for focal mechanism.

类型	P 轴倾角	B 轴倾角	T 轴倾角
正断型 NF	$\geq 52^\circ$	—	$\leq 35^\circ$
正走滑型 NS	$40^\circ \leq \text{倾角} < 52^\circ$	—	$\leq 20^\circ$
	$< 40^\circ$	$\geq 45^\circ$	$\leq 20^\circ$
走滑型 SS	$\leq 20^\circ$	$\geq 45^\circ$	$< 40^\circ$
逆走滑型 TS	$\leq 20^\circ$	—	$40^\circ \leq \text{倾角} < 52^\circ$
逆断型 TF	$\leq 35^\circ$	—	$\geq 52^\circ$
过渡型 UN	上述类型之外的震源机制解		

表 3 蓄水前后不同类型地震数量分布

Tab. 3 Percentage of earthquakes with different focal mechanism before and after reservoir impoundment

地震类型	蓄水前	蓄水后
正断型 NF/正走滑型 NS	7.9%	9.7%
逆断型 TF/逆走滑型 TS	17.5%	35.7%
走滑型 SS	28.1%	33.9%
过渡型 UN	46.5%	20.7%

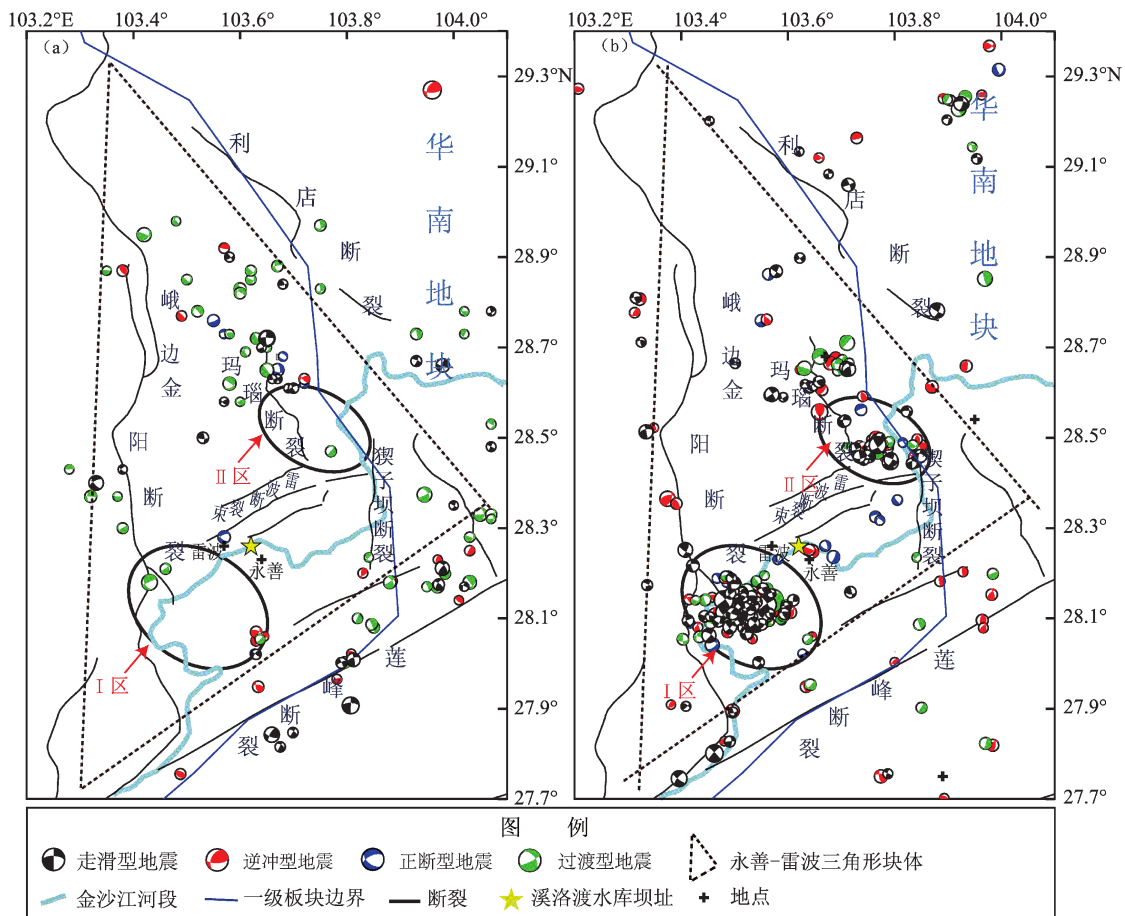


图 3 溪洛渡水库近场区蓄水前 (a)、后 (b) 震源机制空间分布

Fig. 3 The spatial distribution of focal mechanisms before (a) and after (b) reservoir impoundment

2 个明显地震集中区域, I 区为峨边—金阳断裂的 NW 向小型分支断裂构造及其向 ES 方向延伸的位置, 与库区上游河段交汇; II 区为玛瑙断裂东南端及楔子坝断裂北段, 邻近向家坝水库, 认为是由向家坝水库蓄水诱发所致 (冯向东等, 2015)。

I 区所在的峨边—金阳断裂总长度约为 180 km, 属于逆冲型断裂, 走向 NNW。蓄水前后, 该断裂附近地震活动有分段特征, 其北段地震活动性很弱, 其南段地震活动强。I 区内震源机制解共 198 个, 其中蓄水前 9 个, 蓄水后 189 个。蓄水前峨边—金阳断裂主要分布有极少量具有逆冲走滑分量的过渡型地震; 蓄水后该区域内地震活动性增强, 主要表现为发生了 2014 年 4 月 5 日永善 5.3 级地震和 2014 年 8 月 17 日永善 5.0 级地震及其余震, 以走滑和逆冲型地震为主, 占地震总数的 73.5%。

为详细研究 I 区地震的震源机制解的分布特征, 选取 2014 年永善 5.3, 5.0 级地震主震及其 $M_L \geq 4.0$ 余震做进一步研究。从图 4 可以看出, ①和②号震源球为主震, 震源机制类型分别为逆冲型和左旋走滑型, 其余③~⑦为②号 (编号按发

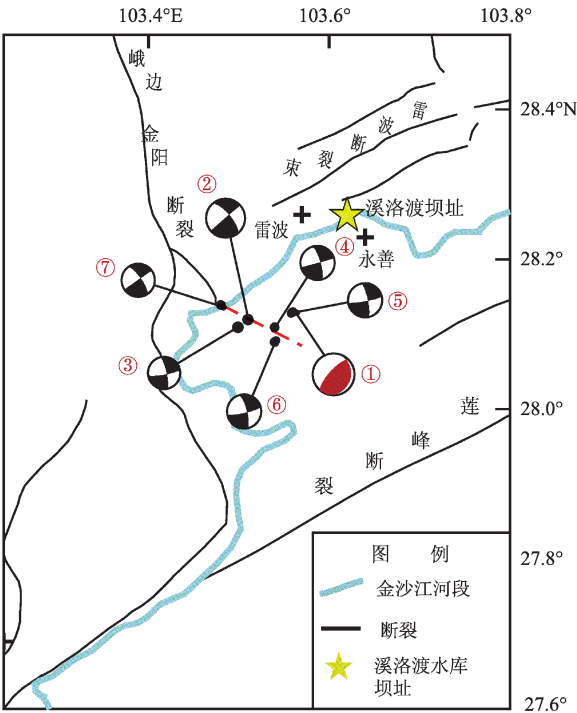


图 4 I 区 2014 年永善 5.3, 5.0 级地震主震及其 $M_L \geq 4.0$ 余震分布情况

Fig. 4 Focal mechanisms solution distribution of the earthquakes with $M_L \geq 4.0$ for Yongshan $M5.3$ and $M5.0$ earthquake in region I in 2014

震时刻排列) 主震的余震, 其震源机制解与主震高度一致。使用 CAP 方法得到①~⑦号地震震源深度均为 5~7 km, 分布较为集中。根据主震和余震的空间展布方向, 可以看出图 4 中 7 个地震均位于峨边—金阳断裂的 NW 向小型分支断裂向 EN 方向延伸的位置, 基本呈线性分布, 因而推测这 2 个地震震中位于峨边—金阳断裂 NW 向分支向 EN 延伸的隐伏断裂上, 且与库区内的金沙江上游河段相交。

从图 5 可看出, 水库蓄水前后, I 区震源机制解 P 轴方位角优势分布均为 NW—SE 向, 蓄水后优势方向更加明显趋于 EW 向; T 轴方位角在蓄水前集中于 NS 向, 蓄水后优势方向明显趋向于 NE—SW 向; P 轴倾角由蓄水前分布在 45° 左右变为蓄水后集中于 30° 以内, 更加水平; 而 T 轴倾角在

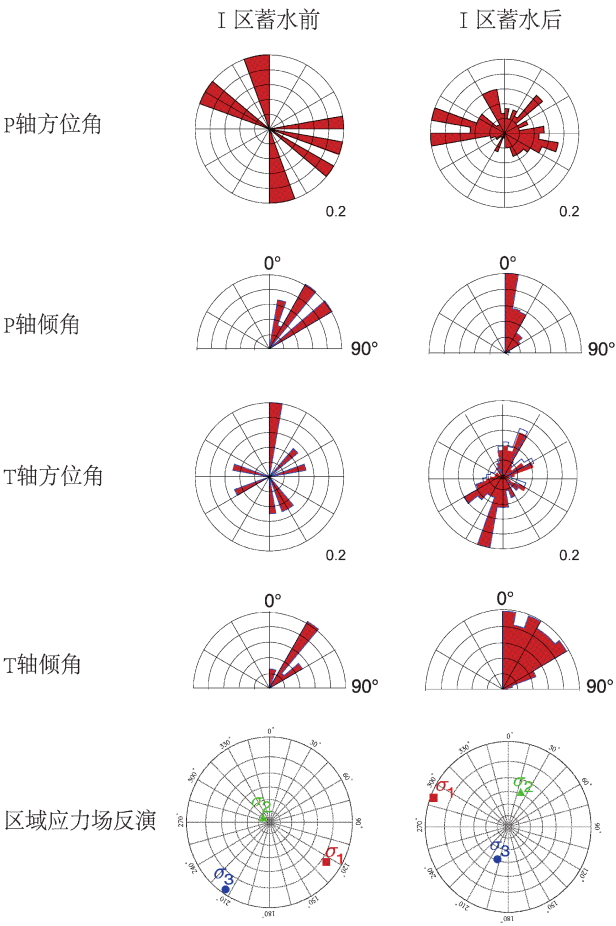


图 5 I 区蓄水前后 P 轴、T 轴方位角和倾角对比图及一维应力场反演图

Fig. 5 Rose diagrams of P - axis T - axis and azimuth and plunge, the inversed stress field for Region I before and after reservoir impoundment

蓄水前集中于 40° 左右，蓄水后趋向离散，分布于 $0\sim 90^\circ$ 范围。

Ⅱ区地处玛瑙地震南段，反演得到 $M_L \geq 2.0$ 地震震源机制解61个。玛瑙断裂南段邻近向家坝水库，该区域内蓄水后地震是向家坝水库蓄水诱发所致（冯向东等，2015），震源机制解以左旋走滑和逆冲型为主，占Ⅱ区地震总数的80%。同时，地质调查表明，玛瑙断裂是一条左旋走滑兼逆冲型断裂构造，断面倾向W，倾角 65° 左右（侯治华等，2004；张世民等，2005），震源机制解结果与断裂构造特征一致。

3.3 蓄水前后应力场分布

利用SATS方法对溪洛渡近场区内蓄水前后应力场进行了反演。在反演过程中，利用阻尼参数 e 控制理论值与观测数据之间拟合残差和应力反演模型长度的相对权重，起到折中调节作用，简化模型则拟合残差升高，反演误差增大；反之提高拟合残差的相对权重，反演误差减小，模型逐渐变得复杂，甚至失去了阻尼约束的意义（Martínez-Garzón *et al.*, 2014）。取拐点处为最佳阻尼系数（图6a, b），低于该相对权重值，因此提高模型复杂程度对反演误差的改善作用不大；提高相对权重后，随着模型的简化，反演误差会增大。本文选取0.9和1.0分别作为蓄水前和蓄水后应力场反演的最佳阻尼系数。

在反演过程中，将溪洛渡近场区（ $103.2^\circ \sim 104^\circ\text{E}$ ， $27.7^\circ \sim 29.4^\circ\text{N}$ ）以 $0.2^\circ \times 0.2^\circ$ 的网格进行网格化，网格内参与反演的震源机制解数量不少于6个，在95%的置信区间内对原始数据进行600次bootstrap重采样，选用2D阻尼区域应力反演技术计算每个网格的最佳构造应力张量，最终得到每个网格的水平最大主应力方向（图6c, d）。

由于地震数量较少，应力反演不能覆盖整个区域，但总体上可以看出研究区应力方向在水库蓄水前后没有发生明显变化，最大主应力优势方向以NW-SE为主，与大尺度范围内的背景构造应力场方向基本一致（郭祥云等，2014；王晓山等，2015；祁玉萍等，2018）。Ⅰ区内水库蓄水前后地震活动性变化较大，可进行一维应力场反演对比（图5）。Ⅱ区蓄水前地震较少，无法进行区域应力反演对比。

区域应力场反演结果显示（图5）：①蓄水前最大主应力轴 Q_1 （红色方块）方位为 124° 、倾角为 14° ；中间主应力轴 Q_2 （绿色三角形）方位为 296° 、倾角为 85° ；最小主应力轴 Q_3 （蓝色圆点）方位为 214° 、倾角为 5° 。②蓄水后最大主应力轴 Q_1 方位为 283° 、倾角为 3° ；中间主应力轴 Q_2 方位为 17° 、倾角为 45° ；最小主应力轴 Q_3 方位为 197° 、倾角为 45° 。以上可见，蓄水前区域内应力场最大主应力轴趋于水平，优势方向均为NWW-SEE向，蓄水后最大、中等和最小主应力轴方位角略微发生变化，大致保持不变，最小主应力轴倾角增大相对显著，更有利于逆冲型地震发生（图5）。结合Ⅰ区内峨边—金阳分支断裂与区域内金沙江河道成流向相交成近 90° 直角的构造分布（图4）情况分析认为，水库蓄水导致水位升高，对库岸进行推挤，进而加剧了区域内NW-SE向的近水平挤压作用，导致蓄水后研究区内逆冲型地震数量增多。

4 讨论

水库地震的发生时间与水库蓄水过程密切相关，一般水库蓄水后或蓄水数月后开始出现微震，一年或几年后发生主震（常廷改，胡晓，2018）。Ⅰ区内自2013年5月水库蓄水后即开始发生小震，2014年永善5.3，5.0级地震发生于蓄水后一年，之后余震频繁，这与其它地区的水库地震活动特征相吻合。Ⅰ区内发生的2次中强地震分别为5.3和5.0级，通常水库地震震级一般较小，以中小震为主，但考虑水库蓄水也曾诱发例如1967年12月印度Koyana 6.4级地震这样的中强地震（陈颢，2009），因此，该地区水库蓄水所引发的地震活动危险性仍需关注。

Ⅰ区内地震类型统计结果显示，左旋走滑型和逆冲型地震共139个，占区域内地震总数的73.7%，与具有走滑逆冲性质的峨边—金阳分支断裂性质吻合。有研究表明，水库诱发地震震源机制类型主要为走滑型和正断型2种，逆冲型极少（徐光宇，2006；Gupta，1992）。但也有研究认为，水库区的地下构造应力条件等也会对诱发地震的类型和大小产生影响（胡毓良，陈现程，1979；

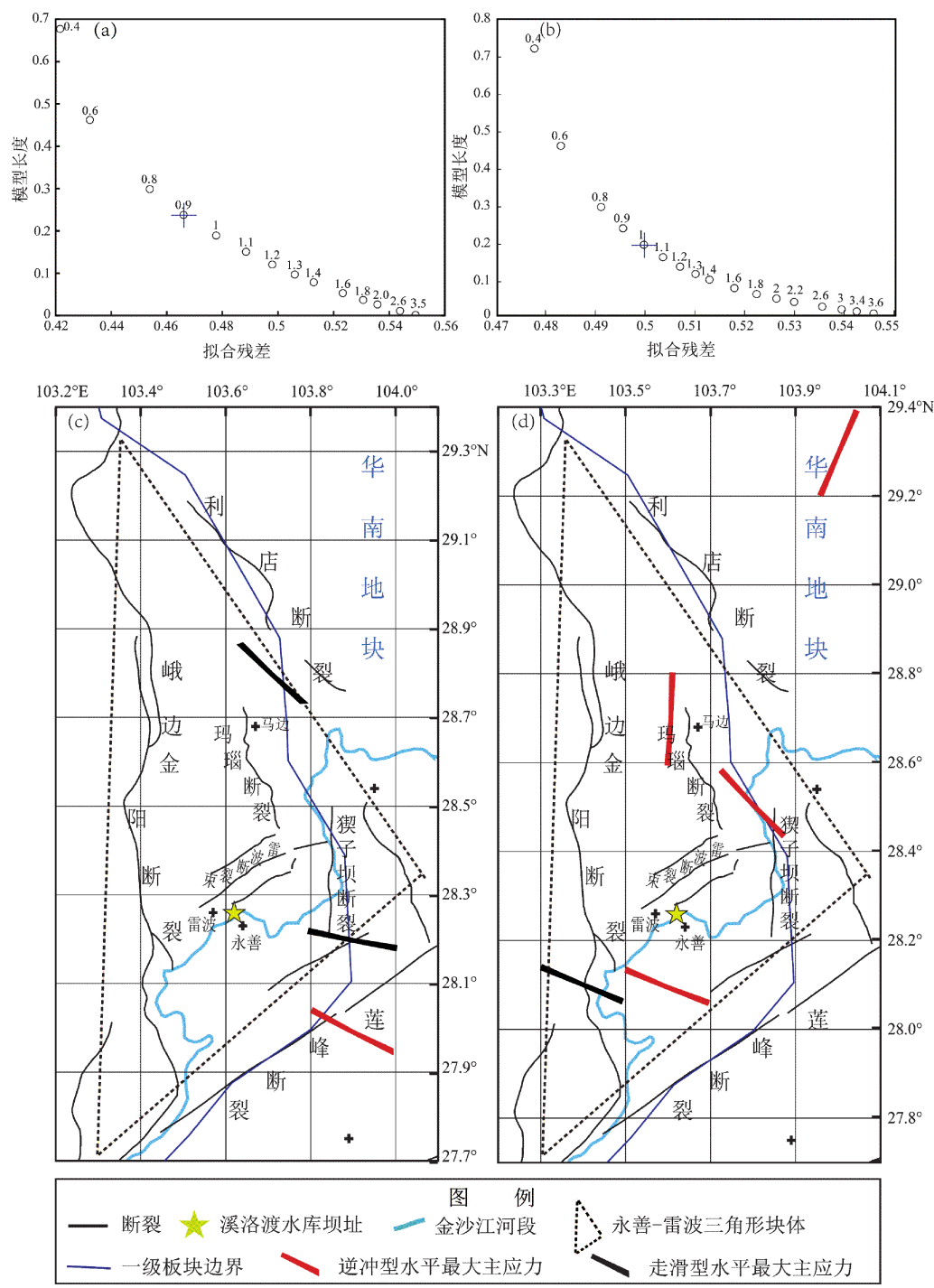


图6 蓄水前 (a) 和蓄水后 (b) 模型长度与数据拟合误差之间的拟合曲线图及蓄水前 (c)、后 (d) 区域应力场分布图

Fig. 6 Trade - off curves between data misfit and model length before reservoir impoundment (a) and after reservoir impoundment (b) ; Bottom: The inverted stress field before reservoir impoundment (c) and after reservoir impoundment (d) .

丁原章, 1980; 华卫等, 2012)。刁桂苓等 (2014) 利用溪洛渡水库库区较为密集的台网资料反演区域应力场, 发现较小地震的震源机制复杂, 没有受到区域应力场的严格控制。本文区域应力反演结果表明, 尽管蓄水后区域应力场发生一定变化, 但大致仍与背景区域应力场较为一致, 特别是永

善地震序列中 $M_L \geq 4.0$ 地震的震源机制解均呈现以走滑为主的特性。造成这种差异的原因可能是因为较小的地震破裂尺度有限,发生在微小断层上,震源机制更容易受控于局部构造应力场。

前人研究认为水库地震的诱发机理主要有水体重力造成的载荷作用以及流体孔隙压力使得地下岩石介质条件和应力发生变化(高士钧等, 1990; 梁青槐等, 1995; Talwani, Acree, 1985; Talwani, 1997; 易立新等, 2003)。I 区内地震主要位于坝址上游, 蓄水后水位升高, 同时区域下方构造比较发育, 位于峨边—金阳断裂的分支及其延长线上, 沿断层有温泉出露, 说明断层具有向深层导水的能力和地下水深循环水文地质条件(刁桂苓等, 2014), 具备发生水库诱发地震的构造背景。根据水库地震的发震时间, 存在快速响应型和滞后响应型地震(Simpson *et al.*, 1988)。快速响应型地震是地壳在水压力作用下产生弹性形变而诱发的, 而滞后响应型地震是在水的渗透过程中, 孔隙压力增加, 有效应力降低而诱发的(Talwani, 1997; 刁桂苓等, 2014), 研究区内永善 5.3, 5.0 级地震均在水库蓄水一年后发生, 不能排除与水库的水渗透过程相关。

从大尺度背景构造情况来看, 溪洛渡水库位于青藏地块与华南地块交界地带的大凉山地块内部, 很多研究认为伴随着青藏高原内部中下地壳物质持续向外流展, 高原东部边界继续向东扩张, 使得马边—盐津地震构造带表现为一条新生的地震构造带(何宏林等, 2008; 韩竹军等, 2009; Su *et al.*, 2016), 这可能进一步导致了峨边—金阳断裂向东南方向的进一步发育, 不排除是造成 I 区内地震活动增强的原因之一。

地震破裂过程中释放了累积应力, 从而改变岩石圈的应力场分布, 导致地下应力重新分配。一些巨大地震后可观测到显著的应力场变化, 具体表现为应力场主应力轴的旋转。这种同震之后应力场发生变化的现象, 对于理解地震物理具有重要意义, 可以对地壳的强度提供有力约束。例如, 如果地震发生之后应力主轴发生旋转, 通常认为地壳中应力的强度与同震应力降相当(Hardebeck, Okada, 2018)。本文研究过程发现, 溪洛渡水库蓄水后, 应力场方向也发生了一定变化, 特

别是最小压应力轴的仰角, 变化非常显著。这可能表明蓄水造成的应力加载与地壳中应力量级可以比拟, 对当地的应力环境提供了重要约束。

5 结论

本文使用国家测震台网数据备份中心提供的近震数字波形记录, 采用 HASH 方法, 计算了溪洛渡水库近场区 2009 年 1 月—2018 年 12 月 $M_L \geq 2.0$ 地震的震源机制解, 并利用阻尼区域应力反演方法获得了该区的应力场图像, 得出以下主要结论:

(1) 利用 HASH 和 CAP 法对研究区部分地震震源机制解进行反演验证, 并与不同机构给出结果进行对比, 最终结果相互印证, 可靠性较高。

(2) 研究区水库蓄水前地震类型以过渡型为主, 走滑和逆冲型地震次之, 正断型最少; 蓄水后, 过渡型地震明显减少, 其它类型地震均不同程度增多, 逆冲型地震数量与蓄水前比较增加近一倍。

(3) 蓄水前后区域应力场发生了一定变化, 具体表现为最小压应力轴的仰角增大, 变化非常显著。这可能表明, 蓄水造成的应力加载与地壳中应力量级可以比拟, 对当地的应力环境提供了重要约束。

本文仅仅定性讨论了溪洛渡水库蓄水前后的应力场变化, 若想进一步确定溪洛渡水库区地震成因, 还需要借助数值模拟计算手段, 开展更多定量计算工作。2008 年汶川 8.0 级地震后, 一些研究人员借助于数值模拟手段, 定量计算了紫坪铺水库蓄水对汶川地震所在断层的影响(Ge *et al.*, 2009; 杨戩等, 2015), 由于计算结果依赖诸多元素, 如地下岩石的渗透率等, 结果存在争议, 但水库蓄水与地震之间的关系已经得到了广泛重视, 需要继续开展定量计算, 进一步理解水库蓄水与地震之间的作用方式。

中国地震局地球物理研究所“国家数字测震台网数据备份中心”(doi: 10.7914/SN/CB) 为本研究提供地震波形数据; 文中图件利用 Generic Mapping Tools (GMT) 绘制, 冯向东副研究员为本研究提供部分震源机制解结果, 在此一并表示感谢。

参考文献:

- 常廷改,胡晓. 2018. 水库诱发地震研究进展[J]. 水利学报, 49(9): 1109 – 1122.
- 陈颢. 2009. 汶川地震是由水库蓄水引起的吗? [J]. 中国科学, 39(3): 257 – 259.
- 刁桂苓,王曰风,冯向东,等. 2014. 溪洛渡库首区蓄水后震源机制分析[J]. 地震地质, 36(3): 644 – 657.
- 丁原章. 1980. 中国的水库诱发地震[J]. 华南地震, 9(1): 64 – 72.
- 冯向东,岳秀霞,王曰风,等. 2015. 由向家坝水库震源机制探讨诱发地震的成因[J]. 地震地质, 37(2): 565 – 575.
- 高士钧,曾心传,陈永成,等. 1990. 水库诱生的空压变化及应力特征[J]. 西北地震学报, 12(1): 87 – 95.
- 郭祥云,陈学忠,王生文,等. 2014. 川滇地区中小地震震源机制解及构造应力场的研究[J]. 地震工程学报, 36(3): 599 – 607.
- 韩立波. 2014. 中国地震局地球物理研究所[EB/OL]. (2014 – 08 – 17) [2019 – 04 – 03]. <http://www.cea-igp.ac.cn/tpxw/270763.html>
- 韩竹军,何玉林,安艳芳,等. 2009. 新生地震构造带——马边地震构造带最新构造变形样式的初步研究[J]. 地质学报, 83(2): 218 – 229.
- 何宏林,池田隆安,何玉林,等. 2008. 新生的大凉山断裂带——鲜水河—小江断裂系中段的裁弯取直[J]. 中国科学: 地球科学, 38(5): 564 – 574.
- 侯治华,钟南才,赵健荣. 2004. 马边—永善地震带及邻区新构造应力场和现代构造应力场的探讨[C]//中国地震学会,中国岩石力学与工程学会. 地壳构造与地壳应力文集, 16 – 23.
- 胡毓良,陈献程. 1979. 我国的水库地震及有关成因问题的讨论[J]. 地震地质, 1(4): 45 – 57.
- 华卫,陈章立,郑斯华,等. 2012. 水库诱发地震与构造地震震源参数特征差异性研究——以龙滩水库为例[J]. 地球物理学进展, 27(3): 924 – 935.
- 梁青槐,高士钧,曾心传. 1995. 水库诱发地震机制研究[J]. 华南地震, 15(1): 74 – 77.
- 潘睿,姜金钟,付虹,等. 2019. 2017 年云南漾濞 $M_s 5.1$ 及 $M_s 4.8$ 地震震源机制解和震源深度测定[J]. 地震研究, 42(3): 338 – 384.
- 祁玉萍,张致伟,龙锋,等. 2018. 大凉山次级块体及邻区震源机制解与区域应力场特征分析[J]. 地震地质, 40(2): 377 – 395.
- 孙贵成,郭祥云,马利军. 2015. 山西带中北部地区中小地震震源机制解特征[J]. 华北地震科学, 33(1): 52 – 56.
- 王晓山,吕坚,谢祖军,等. 2015. 南北地震带震源机制解与构造应力场特征[J]. 地球物理学报, 58(11): 4149 – 4162.
- 徐光宇. 2006. 世界水库诱发地震研究文集[M]. 昆明: 云南科技出版社.
- 严川,许力生,张旭,等. 2015. 一种地方与区域地震震源机制反演技术: 广义极性振幅技术(二)——对实际震例的应用[J]. 地球物理学报, 58(10): 3601 – 3614.
- 杨彧,杨晓松,段庆宝. 2015. 水库蓄水与断层带流体孔隙压时 – 空分布的数值模拟[J]. 地震地质, 37(5): 510 – 523.
- 易立新,车用太,王广才. 2003. 水库诱发地震研究的历史、现状与发展趋势[J]. 华南地震, 23(1): 28 – 37.
- 张世民,聂众高,刘旭东,等. 2005. 荣经—马边—盐津逆冲构造带断裂运动组合及地震分段特征[J]. 地震地质, 27(2): 221 – 232.
- 赵静,刘杰,牛安福,等. 2014. 大凉山次级块体周边断层的闭锁特征[J]. 地震地质, 36(4): 1135 – 1144.
- 郑秀芬,欧阳飏,张东宁,等. 2009. “国家数字测震台网数据备份中心”技术系统建设及其对汶川大地震研究的数据支撑[J]. 地球物理学报, 52(5): 1412 – 1417.
- GCMT. 2014. Global Centroid Moment Tensor Project[EB/OL]. (2014 – 08 – 16) [2019 – 04 – 03]. <https://www.globalcmt.org/CMT-search.html>.
- Ge S, Liu M, Lu N *et al.* 2009. Did the Zipingpu Reservoir trigger the 2008 Wenchuan earthquake? [J]. *Geophys Res Lett*, 36(20): 1 – 5.
- Gupta H K. 1992. Reservoir – induced earthquakes[J]. *Elsevier Scientific*, 62(1): 183 – 198.
- Hardebeck J L, Michael A J. 2006. Damped regional – scale stress inversions: Methodology and examples for southern California and the Coalinga aftershock sequence [J]. *J Geophys Res*, 111 (B11): B11310.
- Hardebeck J L, Okada T. 2018. Temporal Stress Changes Caused by Earthquakes: A Review[J]. *J Geophys Res*, 123(2): 1350 – 1365.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2002. A new method for determining first-motion focal mechanisms [J]. *Bull Seismol Soc Am*, 92(6): 2264 – 2276.
- Hardebeck J L, Shearer P M. 2003. Using S/P Amplitude Ratios to Constrain the Focal Mechanisms of Small Earthquakes[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 93(6): 2434 – 2444.
- Martínez – Garzón P, Kwiatak G, Ickrath M, *et al.* 2014. MSATSI: A MATLAB Package for Stress Inversion Combining Solid Classic Methodology, a New Simplified User – Handling, and a Visualization Tool [J]. *Seism Res Lett*, 85(4): 1 – 9.
- Simpson D W, Leith W S, Scholz C H. 1988. Two types of reservoir – induced seismicity[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 78(6): 2025 – 2040.
- Su Z, Wang E, Wang G, *et al.* 2016. GPS Strain Rate and Seismic Activity Before the Ludian Earthquake ($M_s 6.5$), Northeast Yunnan, China: New Implications for Eastward Chuan – Dian Block Extrusion [J]. *Terr Atmos Ocean Sci*, 27(6): 837 – 851.
- Talwani P, Acree S. 1985. Pore Pressure Diffusion and the Mechanism of Reservoir – Induced Seismicity[J]. *Earthquake Prediction*, 122(6): 947 – 965.
- Talwani P. 1997. On the nature of reservoir – induced seismicity[J]. *Pure and Applied Geophysics*, 150(3): 473 – 492.
- Zhao L S, Helmberger D V. 1994. Source Estimation from Broadband Regional Seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 84(1): 91 – 104.
- Zhu L P, Helmberger D V. 1996. Advancement in Source Estimation Techniques Using Broadband Regional Seismograms[J]. *Bull Seismol Soc Am*, 86(5): 1634 – 1641.
- Zoback M L. 1992. First – and Second – Order Patterns of Stress in the Lithosphere: The World Stress Map Project [J]. *J Geophys Res*, 97 (B8): 11703 – 11728.

Study on Focal Mechanism and Stress Field Before and After the Impoundment in the Vicinity of the Xiluodu Reservoir

SU Shan, HAN Libo, GUO Xiangyun

(*Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China*)

Abstract

The impoundment of water reservoirs may induce significant seismicity and increase regional seismic hazard, thus has attracted more attention in recent years. Here we focused on the Xiluodu Reservoir, one of the biggest hydropower stations worldwide. We collected digital waveform data during 01/2009 ~ 01/2018 recorded by regional seismic network from the Data Management Centre of China National Seismic Network at Institute of Geophysics, China Earthquake Administration. We first adopted the HASH method to determine the focal mechanism solutions of $M_L \geq 2.0$ seismic events using their P wave first – motion polarities and S/P amplitude – ratios. Comparisons between different methods or agencies confirmed these solutions were well constrained. Then the source mechanism solutions with high quality were inverted to obtain the local stress field utilizing the spatial and temporal stress inversion (SATSI) method. The effect of reservoir impoundment on the changes in local stress was assessed by analyzing these focal mechanism solutions and the spatio – temporal distribution of the stress field. Most of earthquakes showed oblique focal mechanisms prior to the impoundment of reservoir while were dominated by the thrust or strike – slip focal mechanisms after that. In addition, the inversion of local stress field revealed relatively significant change in the plunge angle of the minimum stress axis after the impoundment. We suggest that the stress changes due to the impoundment of reservoir may have affected the stress state in the crust and therefore provide some constraints on the local stress field.

Keywords: Xiluodu Reservoir; focal mechanism solutions; stress field; HASH method; Spatial and temporal stress inversion (SATSI)