

李丹,李黎,叶建庆,2022. 小湾水库影响区地震活动性探讨. 中国地震,38(3):526~536.

小湾水库影响区地震活动性探讨

李丹¹⁾ 李黎²⁾ 叶建庆¹⁾

1) 云南省地震局,昆明 650224

2) 华能澜沧江公司,昆明 650214

摘要 利用区域构造、小湾库区水载荷变化及云南省区域地震台网 2000—2021 年的地震监测资料,对小湾水库影响区内水库蓄水前后地震活动空间、频度、强度等进行综合分析,并对区域断层性质、库水位载荷变化、震源机制解、地震应力降参数进行深入分析。结果显示:小湾水库影响区及附近第四纪断裂构造交汇,环境复杂且存在应力水平较高区域;水库蓄水对库区基底岩层及库岸岩体影响显著,地震活动明显增强;水库影响区地震空间分布明显受区域构造控制;在水载荷变化的影响下,触发了构造区的应力释放,发生了走滑断层性质破裂的 2015 年昌宁 5.1 级地震。

关键词: 小湾水库 地震活动性 震源机制 应力降

[文章编号] 1001-4683(2022)03-0526-11 [中图分类号] P315 [文献标识码] A

0 引言

澜沧江的主要支流黑惠江向南奔流,在小湾地区汇入澜沧江,在两江汇合处,小湾水电站筑起高 292m 的大坝,形成“V”字型的水库区。坝顶海拔 1245m,坝区地震基本烈度Ⅶ度,大坝枢纽工程设防烈度Ⅷ度。水库正常蓄水位 1240m,总库容 $151.32 \times 10^8 \text{ m}^3$,水库面积约 189 km^2 ,水电站装机容量 $420 \times 10^4 \text{ kW}$ 。小湾水电站为澜沧江中下游梯级电站的第二级电站,位于云南省临沧市凤庆县和大理市南涧县交界处,2002 年 1 月开工建设,2005 年 12 月大江截流,2008 年 12 月 16 日下闸蓄水。小湾水库有两个主要库区,即澜沧江主河库段和黑惠江支流库段,澜沧江段库尾至功果桥水库库首附近,库长约 180km,黑惠江段库尾至漾濞县瓦厂、顺濞一带的徐村电站,库长约 125km(毛玉平等,2004b)。水库影响区定义为水库区及其外延 10km 的范围,水库区即为水库正常蓄水位淹没的范围。

在高烈度地区,多数水库在蓄水过程中或在蓄水一段时间后,在库水的加载、渗透作用下,原区域应力场受到一定程度的影响,失去平衡引发应力场再次调整,使库区及邻近地区发生微小地震甚至中等地震活动,这是库区应力调整的一种表现形式。自 20 世纪 40 年代发现美国米德湖的蓄水与地震存在关联以来(Carder,1945),已有 140 余座水库观测到水库诱发地震(常廷改等,2018)。水库地区地震的发生、发展大多与库区蓄水及水位周期性变化

[收稿日期] 2022-07-01 [修定日期] 2022-08-05

[项目类别] “水库地震监测研究”项目资助

[作者简介] 李丹,女,1969 年生,工程师,主要从事地震监测与研究。E-mail:1156895932@qq.com

相关(Carder,1945;Simpson et al,1988;Talwani,1997),水库诱发地震在时间、空间、强度和序列特征等方面具有自身的特点,空间上,地震分布在水库区周围,一般距库边线不超过10km,位于河谷第一分水岭范围内(常廷改等,2018)。小湾水电站作为澜沧江中下游梯级电站的龙头和高坝大库,于2008年12月16日下闸蓄水,2009年12月蓄水至1167m左右,2010年10月蓄水至1210m左右,2011年11月蓄水至1218m左右,2012年10月蓄水至1239m左右,之后数年至2021年,每年的最高水位均在1240m左右。

小湾水库蓄水前后,众多研究者从不同的角度对小湾库区的地震地质、地质构造、微震精定位、水库地震成因等进行研究。毛玉平等(2004a)从大地构造环境、地球物理场、新构造运动、构造应力场、主要活动断裂、地震活动性等方面对澜沧江中段水利枢纽工程水库诱发地震进行了分析,认为构造因素是影响该地区水库诱发地震活动的主要因素,该区存在发生岩溶型、裂隙型、构造型等三种成因类型的水库诱发地震的基本条件,通过库区的澜沧江断裂带及其次级断层和无量山断裂带,是构造型水库诱发地震的主要诱发因素。姜金钟等(2016)研究认为小湾水库蓄水后地震活动明显增多,呈现随水库蓄水水体渗透发生地震“迁移”活动的现象,库区也存在着与蓄水关系不大的、属于正常的地震活动,水库蓄水引起的岩溶作用、渗透作用及断层活动可能是小湾水库触发地震的主控因素。高洋等(2016)使用双差定位法对小湾水库蓄水初期的地震进行了精确定位,结果显示小湾库区地震震源优势分布深度在5~15km,库区地震活动集中于上地壳,西部部分深入到下地壳;库区地震活动集中在无量山断裂带、澜沧江断裂带、南汀河断裂带围限的区域,无量山断裂带北端有较大规模的小震密集带;澜沧江断裂带北端有少量地震分布,澜沧江断裂带北西向段与近东西向段结合部有小规模的小震密集带;南汀河断裂带也有小震分布。曹颖等(2014)采用 b 值稳定性方法计算了小湾台网地震目录的最小完整性震级 M_c ,并对其实际监控能力进行了分析。

本文利用云南省区域地震台网2000—2021年的地震监测资料,结合中国华能集团澜沧江公司小湾水电站的水位资料(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局等,2008、2015),对小湾水库影响区内地震活动进行分析,探讨了库区蓄水与地震活动的相关性以及水位变化与地震强度、频度变化的一般规律;此外,利用数字地震波形资料给出 $M_L \geq 3.0$ 地震的震源参数,并进行了相关讨论。

1 基础资料

1.1 地震监测资料

本文选取云南省区域地震台网2000—2021年地震记录资料。云南省区域地震台网自2000年数字化改扩建运行以来,对滇西的监测能力可达到1.8级左右(秦嘉政等,2012)。2000—2021年期间小湾水库影响区内共有5350次地震记录,其中, $M_L < 1.0$ 地震1486次, $1.0 \leq M_L < 2.0$ 地震3255次, $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震523次, $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震79次, $4.0 \leq M_L < 5.0$ 地震6次, $5.0 \leq M_L < 6.0$ 地震1次(图1)。

小湾水库影响区包含澜沧江段库区及两侧10km、坝址下游10km、库尾上游10km的范围,总长度约180km,影响区面积约 $200 \times 20 \text{ km}^2$;黑惠江段库长约125km,影响区面积约 $125 \times 20 \text{ km}^2$ 。小湾水库影响区2000—2021年记录到5350个地震事件。其中,2000年1月1日至

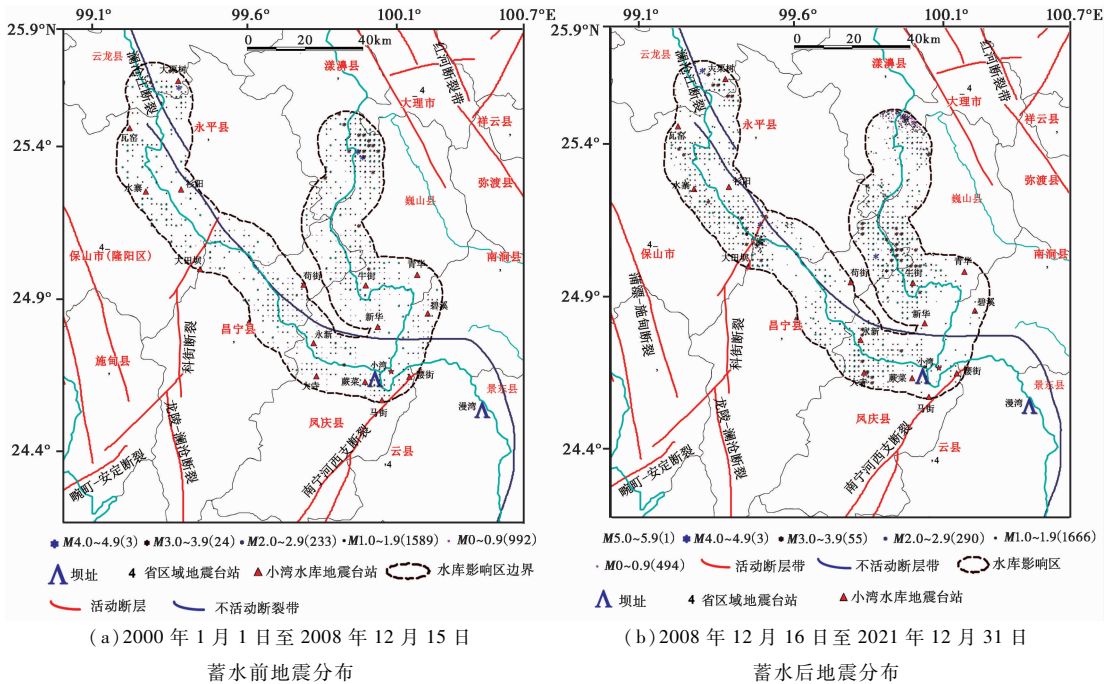


图1 小湾水库影响区 2000—2021 年蓄水前后地震分布

2008 年 12 月 15 日蓄水前的地震事件 2841 次,2008 年 12 月 16 日至 2021 年 12 月 31 日蓄水后的地震事件 2509 次。蓄水前监测到的最大震级为 $M_L4.6$,蓄水后的最大震级为 $M_L5.1$ (图 1)。

1.2 区域构造背景

小湾水电站位于澜沧江中段,大地构造上位于唐古拉—昌都—兰坪—思茅褶皱系与冈底斯—念青唐古拉褶皱系的接合部位(毛玉平等,2004b)。小湾水库及邻近地区发育的具有一定规模的主要断裂有(图 1):

(1) 澜沧江断裂带: 纵穿澜沧江中段水利枢纽区,北端起自藏北羌塘地区,自藏滇边境梅里雪山丫口附近进入云南,基本上沿澜沧江河谷延伸,南端于勐松附近延入缅甸,总体走向 NNW,省内长约 800km。历史地震记载和现代地震记录表明,澜沧江断裂带地震活动较弱,无 6 级以上地震发生,仅在云龙至凤庆之间有少数 5 级地震记载,破坏性地震活动极其微弱。总体而言,澜沧江断裂带具挤压-剪切构造性质,第四纪活动性较弱。

(2) 南汀河断裂带: 该断裂带规模较大,自缅甸延入我国,东北端终止于澜沧江断裂带西侧而进入水库区,该断裂带由东、西两支主干断裂及其侧旁的次级断裂组成,总体走向 NE,断裂带发育历史悠久,经历了多期构造活动。晚更新世以来,南汀河断裂带活动强烈,具张性-剪切构造性质; 与此相对应,地震活动较强,具有南西段强、北东段弱的变化特点。

(3) 无量山断裂带: 北起无量山北麓,向南东经镇源、普洱、漫汤,顺营盘山入老挝,总体走向 NNW,云南境内长 220km 以上,主要由三条活动断裂组成,分别为: ①磨黑断裂,在磨黑、整董两地分别发生过 6.8 级和 6.0 级地震; ②普洱断裂,在思茅—普洱地段多被 NE 向的横断层切错,共同构成类棋盘格式构造,1884—2006 年共发生过 9 次 6 级以上地震; ③普文断裂,在普文一带发生过 5.9 级地震,在断裂延长段上发生过景谷 6.6 级地震。

(4)柯街断裂带:北起澜沧江边,向南经新街子、柯街、湾甸,沿镇康河过永康后交于南汀河断裂带,呈波状近 SN 向展布,由两组断裂组合形成,具张性-剪切构造性质,沿线发育串珠状新生代盆地,其中新近系发生挤压、位错变形,反映了更新世初期的构造活动。柯街断裂带是一条重要的缝合线,控制盆地、水系和两侧地层,活动性北强南弱,西侧保山周围发生过四次 5 级以上地震,2015 年 10 月 30 日昌宁 M_L 5.1 地震就发生在柯街断裂带北端与澜沧江断裂带的交汇处。

(5)昌宁断裂:位于柯街断裂带以东,为一束向南撒开的断层组,主体呈 SN 向展布,被一些近 EW 向、NE 向的小断层截断、错移,北起昌宁,经小桥街、勐统街、习谦、郭大寨,在勐底、勐旨附近被南汀河断裂截断,长约 90km。断层以拉张为主,地形上呈阶梯状,断裂北部在昌宁、秀水塘等处形成新生代断陷盆地,为早-中更新世断裂,历史上未发生过中强以上地震,小震也较少。

(6)维西—乔后断裂带:北起维西西北,向南顺雪龙山东麓,经通甸、马登,沿弥沙河延至乔后,再顺黑惠江过漾濞到巍山,终止于南涧盆地,走向 NW,全长大于 300km。该段断裂带历史上曾发生过 $6\frac{1}{4}$ 级地震,维西—乔后断裂南段为晚更新世活动断裂。

2 蓄水前后水库影响区地震活动

2.1 地震活动及其时间变化

水库蓄水对库区基底岩层及库岸岩体的影响显著。依据云南省地震监测台网 2000—2021 年地震目录,在小湾水库影响区内共发生 5350 次地震。2008 年 12 月 16 日小湾水库蓄水前有 2841 次地震,其中, $M_L < 1.0$ 地震 992 次、 $1.0 \leq M_L < 2.0$ 地震 1589 次、 $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震 233 次、 $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震 24 次、 $4.0 \leq M_L < 5.0$ 地震 3 次,最大地震 4.6 级,影响区内两个库区均有不同程度的活动。蓄水后有 2509 次地震,其中, $M_L < 1.0$ 地震 494 次、 $1.0 \leq M_L < 2.0$ 地震 1666 次、 $2.0 \leq M_L < 3.0$ 地震 290 次、 $3.0 \leq M_L < 4.0$ 地震 55 次、 $4.0 \leq M_L < 5.0$ 地震 3 次、 $5.0 \leq M_L \leq 5.1$ 地震 1 次(图 1)。

苏有锦等(2003)基于 G-R 关系的 FMD 方法,利用川滇地震台网地震目录给出了川滇地区地震监测资料的最小完整性震级 M_c ,小湾水库所在的滇西地区的最小完整性震级为 1.9。随着时代变迁,川滇地区地震监测台网有了较大变化。本文采用 FMD 方法,得到小湾水库影响区 2000—2021 年地震监测资料的最小完整性震级为 1.1, b 值为 0.9623,相关系数为 0.9941,均方差为 0.0427。图 2 为小湾水库影响区 2000—2021 年地震目录 G-R 关系图。

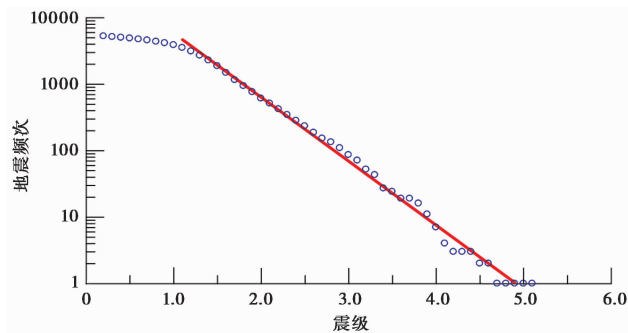


图2 小湾水库影响区 2000—2021 年地震目录 G-R 关系

在区域构造应力作用下,2000年以来小湾水库影响区内3级左右的地震活动时有发生,尤其是2007年澜沧江主库尾段的云龙发生4.6级小震群活动,黑惠江支库中尾段的漾濞、巍山一带发生4.4级小震群活动,蓄水前的9年间发生3级以上地震27次,平均每年发生3次。2008年12月16日小湾水库开始蓄水。蓄水后,地震活动显著增强,主要发生在澜沧江主库柯街段、凤庆段和黑惠江支库巍山段,13年间小湾水库影响区内发生3级以上地震59次,平均每年发生4.5次。蓄水接近最高设计水位后,2015年发生了昌宁5.1级地震。

图3显示了2000—2021年小湾水库影响区地震 $M-T$ 图、日频度、月频度、年频度与水位时序变化。不考虑2007年震群活动,蓄水后地震活动明显密集增强。

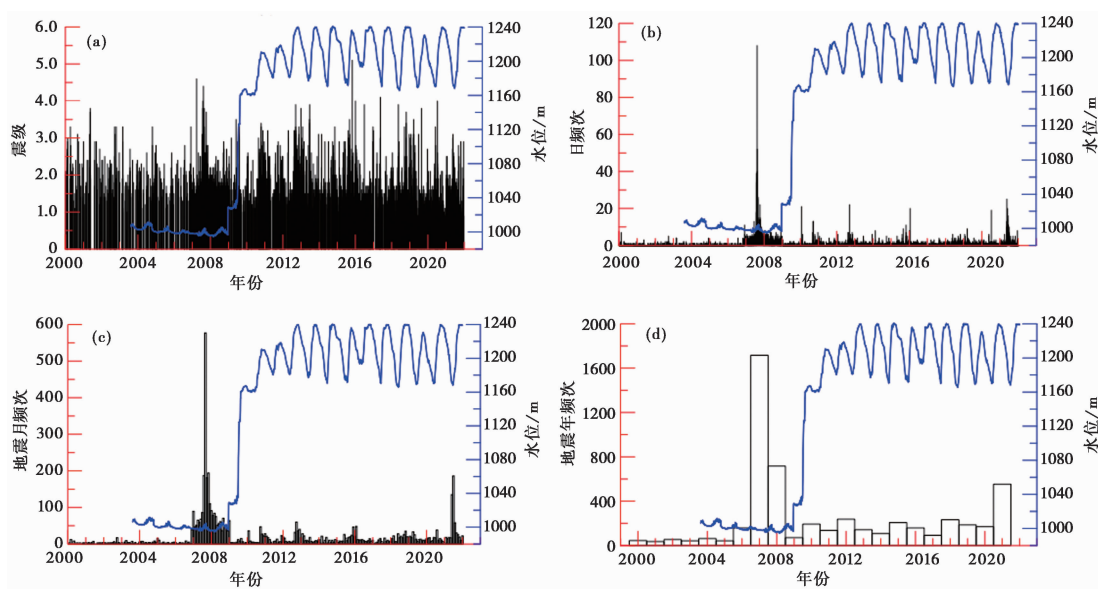


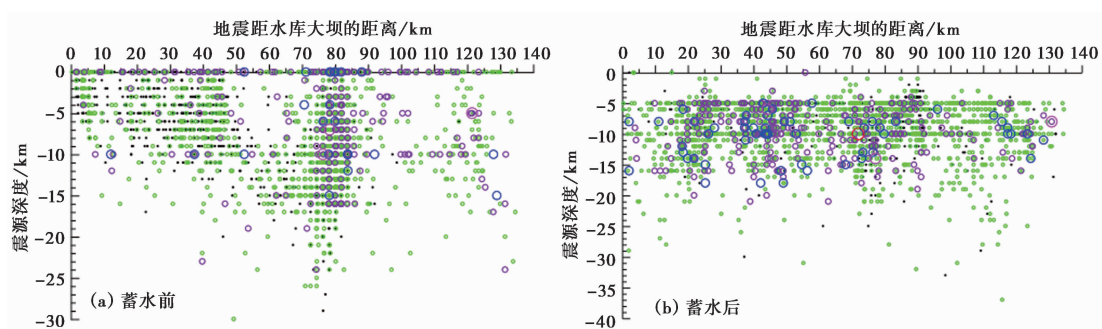
图3 2000—2021年小湾水库影响区地震 $M-T$ 图(a)、日频度(b)、月频度(c)、年频度(d)与水位时序变化

2.2 地震活动的空间分布与变化

图1给出了小湾水库影响区蓄水前后的地震活动图像。由图可见,地震主要分布于澜沧江主库云龙—永平段、昌宁(柯街)段、凤庆段,以及黑惠江支库漾濞段、巍山段,密集区域基本一致;蓄水后地震明显增多,柯街段、凤庆段、巍山段密集增强,漾濞段相对减弱。

本文以水库大坝位置为参考零点,将地震震中位置相对水库大坝的距离作为讨论小湾水库影响区内蓄水前后地震的空间分布与变化规律(图4)。由图可见:蓄水前,库坝区30km范围内有1次 $M_L 3.0 \sim 4.0$ 地震,震源深度约10km,震中距坝区约12.1km;其他区段的地震主要发生在巍山、昌宁、永平、云龙等中远库段,震源深度0~15km。蓄水后,库坝区30km范围内有13次 $M_L 3.0$ 以上地震,震源深度6~18km,其中,10km范围内有2次 $M_L 3.0$ 以上地震;其他区段的地震主要发生在黑惠江支库尾段、巍山县的牛街、昌宁县的大田坝、永平县的衫阳、凤庆县的大寺、保山市隆阳区的瓦窑、云龙县的大栗树等库段,震源深度无明显变化。

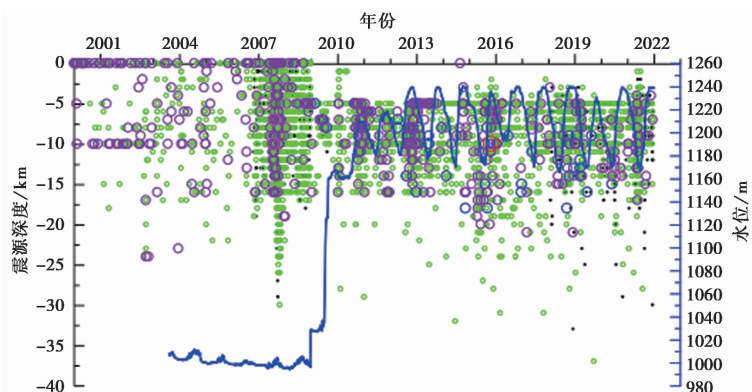
值得指出的特征是,蓄水后大坝附近及几个特定地方的地震活动明显增强,5km以浅的地震活动受到抑制,活动强度和频次均显著降低。



注:彩色空心圆圈表示地震强度,黑色为 $M_L 0 \sim 1.0$,绿色为 $M_L 1.0 \sim 2.0$,棕色为 $M_L 2.0 \sim 3.0$,蓝色为 $M_L 3.0 \sim 4.0$,粉色为 $M_L 4.0 \sim 5.0$,红色为 $M_L 5.0 \sim 6.0$

图4 蓄水前后水库影响区内地震深度分布

水库影响区内地震的震源深度较浅,一般在 5km 左右(陈厚群等,2009)。小湾水库影响区蓄水前地震震源深度多在 0~15km,其中,震源深度在 10km 以浅的地震占比 71.13%;蓄水后地震震源深度集中在 5~18km。图 5 显示小湾水库影响区 2000—2021 年地震震源深度及水位时序变化。



注:彩色空心圆圈表示地震强度,黑色为 $M_L 0 \sim 1.0$,绿色为 $M_L 1.0 \sim 2.0$,棕色为 $M_L 2.0 \sim 3.0$,蓝色为 $M_L 3.0 \sim 4.0$,粉色为 $M_L 4.0 \sim 5.0$

图5 小湾水库影响区地震震源深度与水位时序变化

3 震源机制与震源参数

3.1 震源机制

刁桂苓等(2014)利用溪洛渡水库地震台网记录的微小地震资料对水库坝区蓄水前后微小地震震源机制进行了综合分析,蓄水前少量微震的震源机制显示存在正断、逆断倾滑和走滑等多种破裂方式,蓄水后大量微小地震的震源机制也显示了多种破裂方式并存的现象。本文收集了 2000 年以来小湾水库影响区内 3.0 级以上地震震源机制解(表 1;徐彦,2013),蓄水前 8 次地震的震源机制解多数显示为走滑兼正断,少数显示为逆断倾滑(图 6);蓄水后 14 次地震的震源机制解均显示为走滑兼正断(图 7)。

表 1 小湾水库影响区 3.0 级以上地震震源机制解(据徐彦 (2013))

地震事件 (年-月-日 T 时:分:秒)		震级 深度 /km		节面Ⅰ/(°)			节面Ⅱ/(°)			P 轴/(°)		T 轴/(°)		震中
				走 向	倾 角	滑 动 角	走 向	倾 角	滑 动 角	方 位	仰 角	方 位	仰 角	
蓄 水 前	2001-05-14T02:29:29	3.8	13	346	72	-174	254	84	-18	208	16	301	8	巍山
	2001-05-14T02:52:40	3.7	13	315	32	115	106	61	75	206	15	344	69	巍山
	2007-03-28T10:57:41	4.6	1	94	85	29	1	61	174	224	16	321	23	云龙
	2007-07-28T11:19:22	3.8	4	110	90	155	200	65	0	157	17	62	17	巍山
	2007-07-29T22:29:25	4.0	1	353	72	-2	83	88	-161	309	14	216	11	巍山
	2007-08-12T02:39:10	4.4	7	356	55	-1	86	89	-145	317	24	215	23	巍山
	2007-08-30T03:51:10	3.8	5	216	38	-90	36	52	-90	306	83	126	7	巍山
	2007-10-08T14:54:15	3.7	4	240	61	-178	149	88	-29	100	21	198	18	巍山
蓄 水 后	2009-06-01T21:51:58	3.5	13	132	76	-150	34	60	-16	356	30	260	9	昌宁
	2012-04-20T09:11:30	3.2	11	60	75	-20	155	71	-164					隆阳
	2012-04-22T14:13:11	3.0	9	185	90	-40	275	50	-180					巍山
	2012-08-16T01:13:21	3.2	12	152	74	-143	50	55	-20					云龙
	2012-09-16T02:25:50	3.9	7	119	65	-177	28	87	-25	341	19	76	15	昌宁
	2012-11-16T20:25:48	3.3	5	260	85	35	166	55	174					凤庆
	2012-12-30T06:51:23	3.8	10	313	40	151	66	71	53	182	18	295	49	巍山
	2013-06-21T01:48:51	3.5	10	181	66	-161	83	72	-25	40	29	133	4	永平
	2013-06-24T01:54:09	3.9	10	69	64	-18	167	73	-152	30	30	296	6	永平
	2015-09-05T02:45:30	3.5	7	135	74	160	231	71	17	183	2	92	25	永平
	2015-10-30T19:26:39	5.1	8	46	60	-56	173	44	-134	7	59	112	9	昌宁
	2016-01-04T01:27:24	4.0	6	74	65	-24	67	62	163	22	28	114	5	昌宁
	2016-06-28T19:26:43	3.9	9	289	80	-174	198	84	-10	153	11	244	3	凤庆
	2017-05-20T00:02:16	4.1	6	24	37	-51	159	62	-115	26	64	267	14	云龙

3.2 震源参数

利用云南省地震台网记录的地震波形数据,采用布伦圆位错模式(Brune,1970) 计算了小湾水库影响区内蓄水前后大部分 $M_L \geq 3.0$ 地震震源参数。图 8 为小湾水库影响区蓄水前后 3.0 级以上地震应力降与震级的关系,除昌宁 5.1 级地震外,显示出蓄水前地震应力降值普遍大于蓄水后相应震级的地震应力降值,此结果与华卫等(2012)在广西龙滩水库的观测研究结果一致。

4 讨论与结论

水库影响区是水库蓄水诱发地震研究的重点区域。区内活动构造的性质、是否存在发震构造、发震构造在蓄水前是否已接近临界状态、库区岩体的强度、透水性等性态和水文地质背景条件等,是水库蓄水后是否会触发(诱发) 水库地震的关键因素(陈厚群等,2009)。小湾水库及邻区地质构造极为复杂,展布有澜沧江断裂带、南汀河断裂带、无量山断裂带、柯街断裂带等具有控震和发震能力的深大断裂及其分支断裂,这些断裂带及其分支断裂均穿

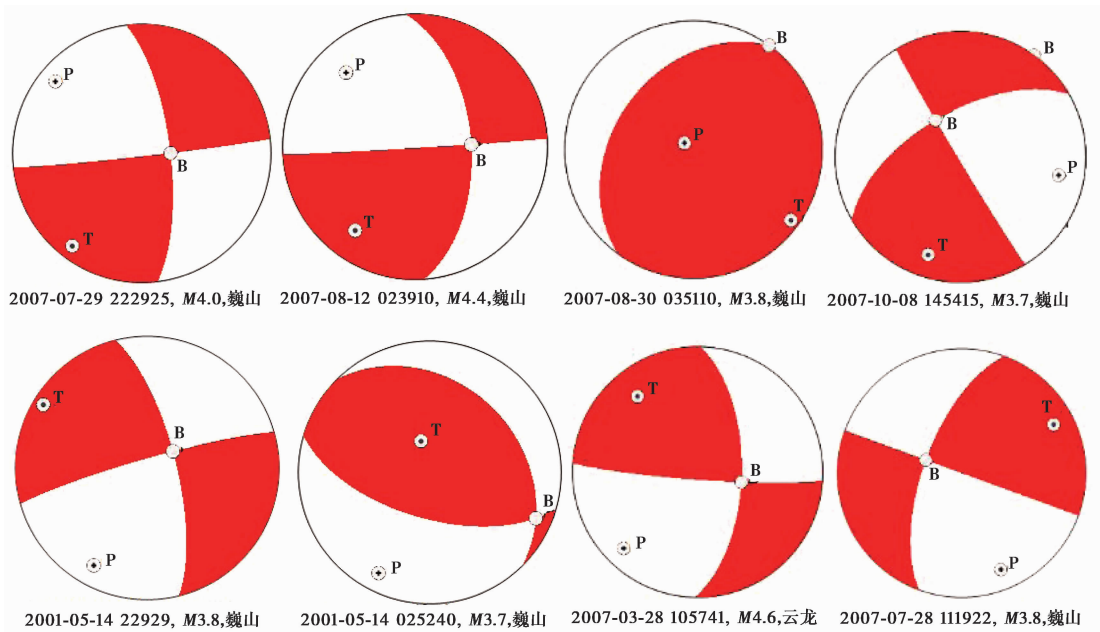


图6 蓄水前小湾水库影响区 3.0 级以上地震震源机制解

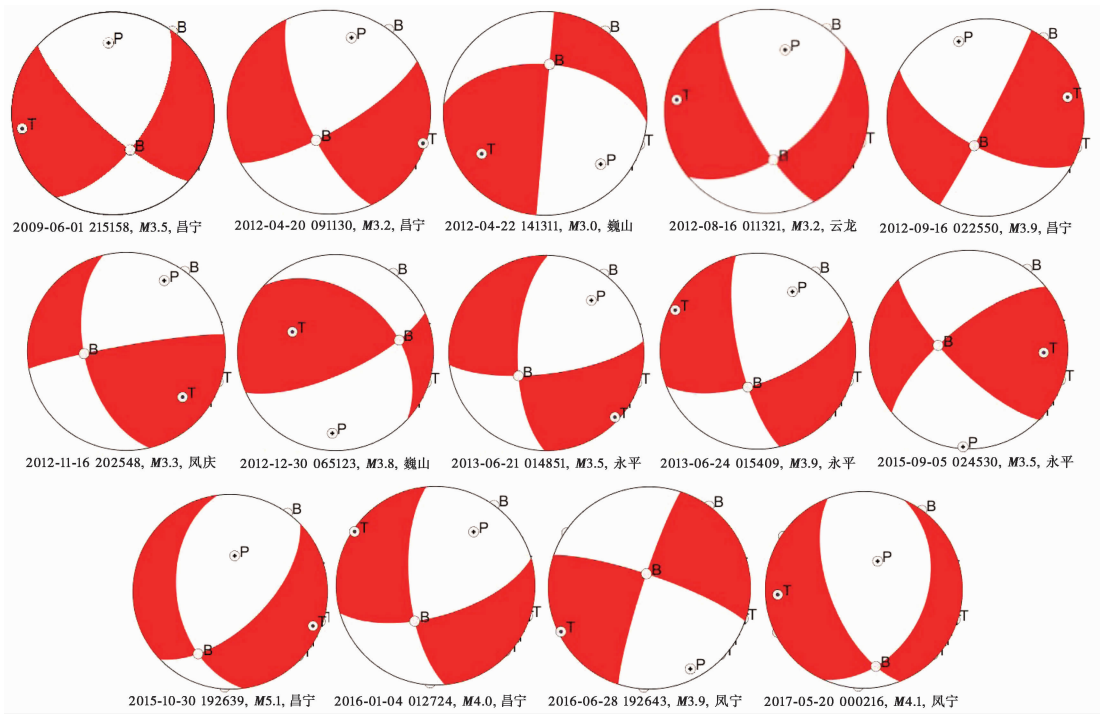


图7 蓄水后小湾水库影响区 3.0 级以上地震震源机制解

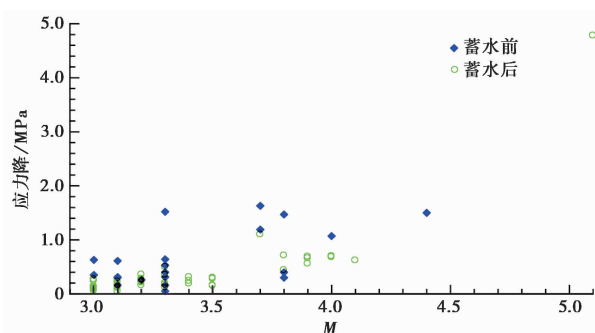


图8 小湾水库影响区蓄水前后 3.0 级以上地震应力降与震级的关系

过或终止于库区及附近,此外,在巍山与凤庆之间、澜沧江与黑惠江汇合处上游附近还发育一系列规模较小、大致成带的 NE 向断裂。这些断裂晚更新世以来大多具有一定的活动性,有的甚至是全新世活动断裂。

众所周知,水库诱发地震机制有:①水的物理化学效应,其使岩体裂面及充填物软化和泥化,从而降低其抗剪强度,特别是岩体脆性破裂中能起很强的应力腐蚀作用(蓄水后水压力增大,可导致库水进入干燥的微裂隙,从而产生应力腐蚀作用);②水库荷载效应,水库对其下岩石的垂直荷载能在岩体内造成附加应力,与构造应力叠加,能在诱发地震中起到一定作用(对正断层增加最大主压应力,莫尔圆变大,易于达到破裂极限而发生地震;逆断层则相反,不易发生地震);③孔隙压力效应,库水渗入岩体裂隙,使孔隙压力增大,相应降低了作用在裂隙面上的有效正应力,降低了抗剪强度而发生地震(该效应与岩体性质尤其是透水性有关)。

小湾水库与水有接触的岸地层主要为花岗片麻岩、云母片岩、角闪斜长片岩和变质砂岩等,局部有碳酸盐类岩石或以碎屑岩为主的上覆沉积岩,反映该地区动力变质作用强烈,岩石破碎,裂隙、节理发育,具备一定的水渗透条件。公元 886 年至小湾水库蓄水前,小湾水库影响区内发生 4 次 4.7 级以上地震,最大震级 5.8 级。地震活动背景是研究蓄水后水库地震活动的参照系。云南省内地震监控能力基本达到 2.5 级左右(秦嘉政等,2012),随着近几个五年计划的实施,台网监测台站密度增加,地震监控能力日益增强。2000 年至 2008 年 12 月 15 日小湾水库影响区的地震资料表明,小湾影响区的最小完整性震级达到 1.1 级,小湾大坝 30km 范围内存在 3 级左右地震活动背景,澜沧江主库段和黑惠江支库段均存在小地震活动,相对集中于黑惠江支库区中尾段的牛街、巍山、漾濞一带,澜沧江主库区中尾段的昌宁、保山、凤庆、永平和云龙大多以小震群形式出现,频度高,强度弱。蓄水后,小湾库坝区 30km 范围内有 13 次 3 级以上地震,地震活动明显增强,主要分布在澜沧江主库段的坝址区附近、库中段的柯街断裂附近、黑惠江支库段中段的牛街一带。

综合分析小湾水库影响区 2000—2021 年地震活动性,可以得到如下几点认识:

(1)小湾水库影响区及附近活动构造发育,不同性质和方向的断裂交汇,存在应力水平较高的区域,地震分布受构造控制明显。水库蓄水前,澜沧江断裂带与南汀河断裂带、柯街断裂带、昌宁断裂交汇区及其他地区存在 3、4 级左右地震活动背景,3 级左右的地震在澜沧江和黑惠江两库区均有不同程度的活动;水库蓄水后,地震分布与之前基本一致,但小震数

量明显增多,密集程度较高,主要集中在澜沧江主库大寺—永新库段、昌宁—永平段以及黑惠江支库的新华—牛街一带,与所在处发育的张剪性断裂相关。

2015 年 10 月 30 日昌宁 5.1 级地震是小湾水库蓄水后发生在水库影响区内唯一的 5 级以上地震,地震序列属主余型中的孤立型,距库岸约 6km。该地震震源机制为正走滑型,与其西侧 5km 的柯街断裂的正走滑断错类型吻合,且余震分布与柯街断裂走向大致相符,表明昌宁地震的发震断层为柯街断裂。

(2) 比较小湾水库蓄水前后 3 级以上地震的应力降,发现蓄水前同等量级的地震应力降普遍大于蓄水后,可能是由于蓄水造成地下介质孔隙压力增大或者水的润滑作用,从而导致在一个比较低的构造应力情况下发生水库诱发地震。

(3) 蓄水前后大小地震比例表明,小湾水库影响区存在高应力构造背景,在水载荷变化波动影响下,触发了构造应力释放,且蓄水高水位作用使该区域构造应力以孤立型地震的形式得以释放。通过对震区断层性质、库水位变化、震源机制解、地震应力降参数的分析,认为 2015 年昌宁 5.1 级地震走滑断层破裂主要受区域构造应力作用,在水载荷波动影响下,触发了构造应力释放。因此,库区加卸载作用不可忽视,尤其是对于正断层和走滑断层,其明显起到了触发区域构造应力加速释放的作用。

参考文献

- 曹颖,徐彦,叶建庆,等,2014. 澜沧江流域小湾、糯扎渡水库地震台网震级完备性初探. 地震研究, **37**(3):406~411.
- 常廷改,胡晓,2018. 水库诱发地震研究进展. 水利学报, **49**(9):1109~1122.
- 陈厚群,徐泽平,李敏,2009. 关于高坝大库与水库地震的问题. 水力发电学报, **28**(5):1~7.
- 刁桂苓,王曰凤,冯向东,等,2014. 溪洛渡库首区蓄水后震源机制分析. 地震地质, **36**(3):644~657.
- 高洋,闵照旭,叶建庆,等,2016. 双差定位法在小湾水库库区地震精确定位中的应用. 防灾减灾学报, **32**(4):75~80.
- 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. 地球物理学进展, **27**(3):924~935.
- 姜金钟,付虹,陈棋福,2016. 位于构造活跃区的小湾水库地震活动特征——基于地震精定位的分析. 地球物理学报, **59**(7):2468~2485.
- 毛玉平,王洋龙,李朝才,2004a. 澜沧江中段水利枢纽工程水库诱发地震的地震地质环境分析. 地震研究, **27**(增刊 I):63~69.
- 毛玉平,王洋龙,李朝才,2004b. 小湾库区水库诱发地震的地质环境分析. 地震研究, **27**(4):339~343.
- 秦嘉政,钱晓东,叶建庆,2012. 云南地震活动与数字地震台网. 云南大学学报(自然科学版), **34**(增刊 II):1~7.
- 苏有锦,李永莉,李忠华,等,2003. 川滇地区区域地震目录完整性最小震级分析. 地震研究, **26**(增刊 I):10~16.
- 徐彦,2013. 云南地区 $M_L 3.0$ 级以上中小地震震源机制解汇编(2008~2012). 昆明:云南科技出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2008. GB/T 21075-2007 水库诱发地震危险性评价. 北京:中国标准出版社.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会,2015. GB/T 31077-2014 水库地震监测技术要求. 北京:中国标准出版社.
- Brune J N, 1970. Tectonic stress and the spectra of seismic shear waves from earthquakes. J Geophys Res, **75**(26):4997~5009.
- Carder D S, 1945. Seismic investigations in the Boulder Dam area, 1940~1944, and the influence of reservoir loading on local earthquake activity. Bull Seismol Soc Am, **35**(4):175~192.
- Simpson D W, Leith W S, Scholz C H, 1988. Two types of reservoir-induced seismicity. Bull Seismol Soc Am, **78**(6):2025~2040.
- Talwani P, 1997. On the nature of reservoir-induced seismicity. Pure Appl Geophys, **150**(3):473~492.

Preliminary Study of the Seismicity around Xiaowan Reservoir, Yunnan, China

Li Dan¹⁾, Li Li²⁾, Ye Jianqing¹⁾

1) Yunnan Earthquake Agency, Kunming 650224, China

2) Lancangjiang Company, China Huaneng Group Co. Ltd., Kunming 650214, China

Abstract By using of the data of regional tectonics, reservoir loading variation, regional seismicity from 2000 to 2021, we synthetically analyzed the regional seismic spatial distribution, frequency and intensity around Xiaowan Reservoir before and after retain water, including the regional fault character, focal mechanism and seismic stress drop. The main results are as follows: ① The Xiaowan reservoir locates in the cross area of Quaternary faults with complicated tectonic environment and local higher stress; ② The seismicity increases obviously with the process of retain water which may make impact the bed and bank rock mass; ③ The seismic spatial distribution around the reservoir was controlled by regional tectonics; ④ The mechanism of the *M*5.1 earthquake is strike-slip which was mainly cause by the tectonic stress release with the water loading variation of Xiaowan reservoir.

Keywords: Xiaowan reservoir; Seismicity; Focal mechanism; Seismic stress drop