

# 长江三峡库区水库诱发地震的研究

李 珏<sup>1</sup>, 李愿军<sup>2</sup>, 杨美娥<sup>1</sup>

(1. 中国地震局地质研究所, 北京 100029; 2. 武汉大学土木建筑工程学院, 武汉 430072)

**[摘要]** 中国长江三峡工程于2003年6月1日正式下闸蓄水, 6月7日起突然在湖北省巴东县城北信陵镇沿江一线发生了2 000多次密集的小震群, 引起了大家的严重关切, 在未来的几年内随着二期和三期工程的完工, 水位将提高到156 m和175 m, 是否会诱发更大更强的地震? 根据地震构造的观点分析了库区东段几条活动断裂的分布、交汇关系和孕震能力, 认为巴东和秭归可能为两个潜在震源区, 蓄水后有引发5.5级左右的地震可能, 地震烈度可达Ⅶ°~Ⅷ°; 并可能诱发库区内众多滑坡体的复活, 导致严重的地质灾害。

**[关键词]** 长江三峡水库; 水库诱发地震; 地质灾害

**[中图分类号]** V475; V476 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)06-0014-07

## 0 引言

长江三峡水库蓄水后, 2003年6月10日晚22时坝前水位达到一期预计高程135 m。在水位上升过程中, 6月7日下午3点36分起突然发生了2 000多次的小地震<sup>[1]</sup>。此次地震群集活动与水库蓄水时间相吻合, 引起了人们的严重关注: 今后水位还要增高40 m, 是否会引起更大的地震?

作为三峡地区的地震地质工作者, 我们从地震构造的角度提出以下几点认识。

## 1 地震构造背景

### 1.1 有两条强震发生带通过库区<sup>[2]</sup>

1.1.1 黔江—恩施—巴东强震发生带 该带的总体走向为北东45°, 纵贯鄂、川二省, 全长超过450 km。该带具显著的分段性, 南段黔江—德江及北段兴山—马桥为单一断裂, 而中段呈现为斜列迭错构造。沿断裂带新近纪到第四纪的山间盆地呈串珠状分布, 如黔江金溪盆地, 恩施盆地, 建始盆地等(图1)。

断裂带中段的南端大路坝1856年6月10日曾

发生6  $\frac{1}{4}$ 级地震<sup>[3,4]</sup>, 此次地震波及湖北、四川、湖南三省, 震中区有17处大规模山崩和滑坡并形成小南海、汪大海和小叉塘三个地震湖, 其最大者小南海的天然堆石坝长达1 500余 m, 高达70余 m, 坝体体积 $420 \times 10^6 \text{ m}^3$ 。关于小南海地震湖的形成, 清光绪20年(公元1894年)《黔江县志》记载:

“咸丰六年夏五月壬子地大震, 后坝乡山崩。先数日, 日光黯淡, 地气蒸郁异常, 是日弥甚, 辰、巳间忽大声如雷震, 室宇晃摇, 势欲倾倒, 屋瓦皆飞, 池波涌立, 民惊号走出, 仆地不能起立, 后坝许家湾溪口有山矗起, 倏中断如截, 响若雷霆, 地中石亦迸出, 横飞旁击, ……”。据“屋瓦皆飞”的描述, 估计当时的地震加速度超过1 g, 震级可能达到7级或更大。

断裂中段的南端距大路坝地震东北方向40 km处, 利川清坪1931年7月1日发生5级地震, 震中位置在北纬30°06', 东经108°58', VI°区面积达181 km<sup>2</sup>, 等震线长轴方向与郁江—建始断裂带相一致。

[收稿日期] 2004-10-13

[作者简介] 李 珏(1924-), 男, 湖北大悟县人, 中国工程院院士, 中国地震局地质研究所研究员

断裂带的中段北端，1979 年 5 月 22 日在长江北岸的龙会观发生 5.1 级地震<sup>[5]</sup>，震中位于北纬 31°06′，东经 110°28′，震中破坏达到 VII° (0.1~0.15 g)，VII°区长轴 15 km，短轴 6 km。巴东县城位于 V°区的边界，但已引起巴东大坪古滑坡体的复活。

据地震仪器记录，近、现代地震和现代活动的大滑坡体均沿该断裂带分布。滑坡体的形成时代同地震活跃期一致，大约始于晚更新世<sup>[6]</sup>。

1.1.2 仙女山—香溪—兴山强震发生带 该断裂南起五峰渔洋关，向北经周坪沿香溪河达兴山县城与新华断裂连为一体，总体走向 NNW，全长达 230 km 以上。在潘家湾 (1961 年 3 月 8 日 Ms4.9

级，震中烈度 VII°)、周坪 (1972 年 3 月 13 日 Ms3.3 级，震中烈度 V°)<sup>[7]</sup>和兴山峡口 (2001 年 12 月 13 日 ML4.1 级，震中烈度 VI°)<sup>[8]</sup>分别发生地震并引起房屋的破坏。

该断裂带也是滑坡体的密集分布带。如在老林河有一近 SN 向分支断裂即九湾溪断裂<sup>[9]</sup>，该断裂新活动剧烈，岩石高度破碎，形成九湾溪大峡谷，深切 1 000 余 m。向北延至长江对岸，即为新滩滑坡体所在。又因地势陡峻，致使新滩发生多次滑塌，最近一次即是 1985 年 6 月 12 日在原地发生的大规模岩崩与滑坡<sup>[10]</sup>，滑坡总体积 3 000 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 以上，其中超过 200 × 10<sup>4</sup> m<sup>3</sup> 冲入长江，激起对岸涌浪爬高达 49 m。千年古镇新滩从此消失了。

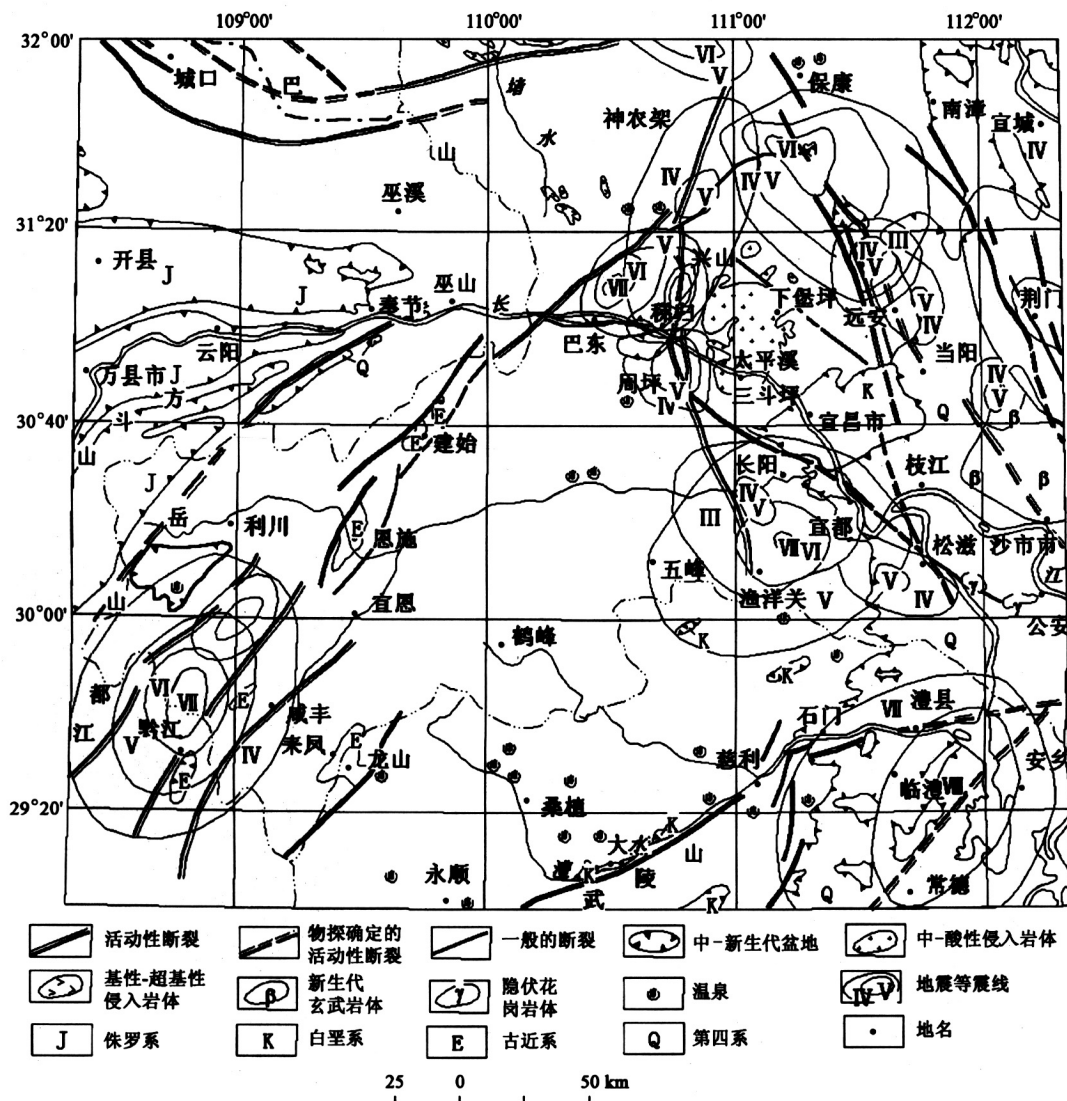


图 1 长江三峡库区及周边地震构造图

Fig.1 seismotectonic map of the Three-Gorges reservoir area and its surroundings

### 1.2 A 字形架构

除上述两条强震带外，沿长江还存在一条东西向活动断裂，即巴东亩田湾断裂带。断裂带走向近东西，西起巫峡口，向东经亩田湾，沿着长江河谷把黔江—恩施—巴东和仙女山—香溪—兴山两条强震带连接起来，组成 A 字形架构（图 2）。亩田湾断裂长约 50 km，倾向北，倾角  $65^{\circ}\sim 70^{\circ}$ 。这些断裂的活动将秭归侏罗系盆地改造成三角形，地震记录显示震中沿亩田湾断裂带分布。1977 年在断裂东延部位的秭归县泄滩镇发生过密集的小震群<sup>[11]</sup>，

1989 年 10 月 16 日和 18 日断裂带上还分别发生过 2.2 和 2.7 级地震，故这是一条活动断层。1979 年的龙会观 5.1 级地震还在 40 km 以外的新滩产生大崩塌，巨大的崩塌岩块冲入长江形成新的险滩<sup>[12]</sup>，这显然与此东西向活断层有成因联系。A 字形架构是三峡地区一个特殊的构造结构，其断裂的新老活动均很剧烈，致使结晶基底以上之沉积盖层下陷 10 余 km。这三条边界性断裂的交汇部位和断裂的最新活动决定了库区未来诱发地震的地点。

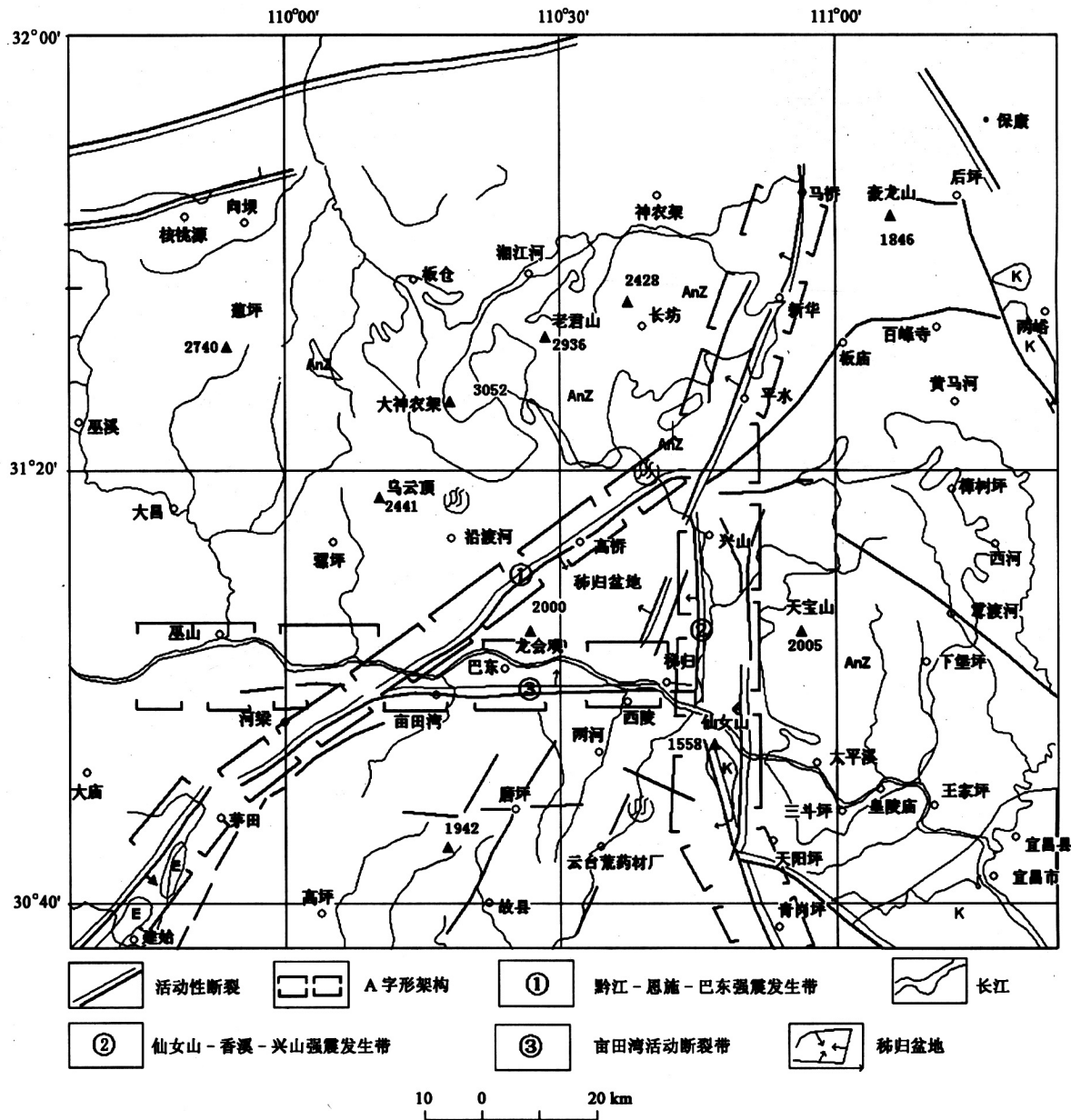


图 2 本区地震构造的 A 字形架构

Fig.2 The A-shaped seismotectonic framework in the Three-Gorges reservoir area

## 2 水库诱发地震的估计

全球水库诱发地震已发生有 100 多例<sup>[13]</sup>。研究证实水库诱发地震与坝高、库容以及区域活动构造有关。高坝大库发生水库地震的概率很高, 坝高大于 40 m, 库容大于  $10 \times 10^8 \text{ m}^3$  的水库, 发生概率为 10% 左右<sup>[14]</sup>。而坝高超过 100 m, 库容  $100 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上者发生的概率达 40% 左右。三峡地区具备以上的所有不利条件, 即三峡大坝坝高 185 m, 最高蓄水水位 175 m, 库区最大水深为 150 余 m, 库容  $393 \times 10^8 \text{ m}^3$ ; 另外, 三峡地区多有峡谷, 相对高差可达 1 500 m 以上。江面宽度仅在 100~300 m, 秭归的链子崖峡谷仅宽 100 余 m, 峡谷的形成多与同方向的断层存在有关; 从库区岩石成分来看, 本区多为碳酸盐类地层分布, 全球 120 余座水库地震震例中, 岩溶区地震占 50%, 在中国, 这类地震要占 70% 以上<sup>[15]</sup>。三峡库区以古生代至中生代早期的灰岩沉积为主, 故本区具备水库诱发地震的岩性条件。

### 2.1 地点的估计

前述的 A 字形断裂架构, 所围成的就是秭归盆地, 该盆地中堆积了  $(5 \sim 7) \times 10^3 \text{ m}$  厚的侏罗纪地层, 说明此三条断裂的升降位错很大, 活动的时间很长, 晚更新世以来抬升速率加剧。现今断裂上地震活动频繁, 所以这三条活动断层特别是 A 字形架构南部的两个交汇部位, 就是水库诱发地震的孕育之所在。具体说, 水库诱发地震的两个危险区为秭归危险区和巴东危险区 (图 3)。

### 2.2 强度的估计

诱发地震的强度估算可用潜在震源区的上限震级来判断。根据潜在震源区的确定原则, 凡活动断层带发生过强震者 (无论是古地震, 历史地震或仪器记录地震) 即可划为潜在震源区。震级上限的确定有历史地震法、古地震法、活断层特征参数法、构造类比法以及综合评判法等, 当地震资料不丰富时, 通常经验的做法是取已发生地震的最大震级再加上 0.5 级<sup>[16~18]</sup>。

黔江—恩施—巴东强震发生带, 北延过长江在龙会观 1979 年曾发生过 5.1 级地震, 故巴东潜在震源区的震级上限为 5.6 级。中段虽发生过  $6 \frac{1}{4}$  级强震, 但属于不同地质结构, 未予考虑。仙女山潜在震源区的震级上限以仙女山断裂带已发生的最大震级 4.9 级计, 其震级上限应为 5.4 级。概括此两

条强震发生带因水库诱发作用而在两个地震危险区内的发震潜能, 其上限震级均可定为 5.5 级。

诱发地震若从同一构造区内的地震构造背景和区内强震记录来估算, 本区位于鄂西地震区内, 区中数条强震发生断层交织。历史上几次强震都位于强震发生断层或活断层的交叉点上 (见图 3)。在一个统一的应力场中, 区域构造应力的强度将随着时间的推移而积累和释放。南阳、咸丰、常德三地在历史上均发生过 6 级以上地震 (南阳公元 46 年 10 月 23 日, 6.5 级; 咸丰公元 1856 年 6 月 10 日, 6.25 级; 常德公元 1631 年 8 月 14 日, 6.5 级)。三次大震均发生在强震发生断层上。一次 6.5 级地震发生后, 地应力下降影响到全区。待经过一定的年月, 构造应力积累达到一定的强度, 在适当的地点又可发生强震。现取离库区最近、年代最新的两个震例估算, 常德地震后, 经过 225 年到咸丰大路坝地震, 大路坝地震距今 148 年, 可大致估计出已蓄积了十几个相当 5.5 级地震的能量 (尚不到一个 6 级地震的能量), 完全具备发生 5.5 级地震的条件。

巴东和秭归两个地区, 即二条强震发生断层与东西向的活断层交汇处, 一旦得到水压力的引发, 发生 5.5 级左右地震是完全可能的。并且, 如果大路坝地震是 7 级或大于 7 级, 则更可发生 6 级左右的地震。这两个潜在震源区分别距三峡大坝有 70 km 和 20 km, 三峡大坝按 VII° 设计, 所以不会对大坝造成危害。但对潜在震源区范围内的移民城镇和滑坡体将产生严重危害。

### 2.3 时间的估计

表 1 为全球部分水库诱发地震 ( $M \geq 4.5$ ) 统计。从表 1 可以看出:

1) 发生 6 级以上水库地震者, 水深多在 100 m 以上, 库容在  $27.8 \times 10^8 \text{ m}^3$  以上。三峡水库都超过此标准。

2) 水库最大的诱发地震的发生, 多在水库开始蓄水后, 滞后一定时间。三峡水库自 2003 年 6 月 1 日开始蓄水, 7 天后在黔江—恩施—巴东强震发生带的北端信陵镇发生微震群活动, 23 天内发生 2000 余次小震, 震源深达 5~10 km。值得注意的是小震群发生后, 震源没有再向深处迁移<sup>[1]</sup>。

黔江—恩施—巴东强震发生带在巴东段多为三迭纪泥灰岩及粉砂岩组成, 岩性较之新丰江库区的花岗岩更易弱化变软, 水的渗透较慢, 因此估计其

发生最大诱发地震所需的滞后时间可能会较长，亦就是在 3 年或更长一点的时间。

仙女山—香溪—兴山强震发生带中段的强震发

生断层是九湾溪断层，地表是灰岩，约 1 km 以下是花岗岩，故可参考新丰江水库的滞后发生例子，推测诱发地震的时间约在蓄水后 3 年之内。

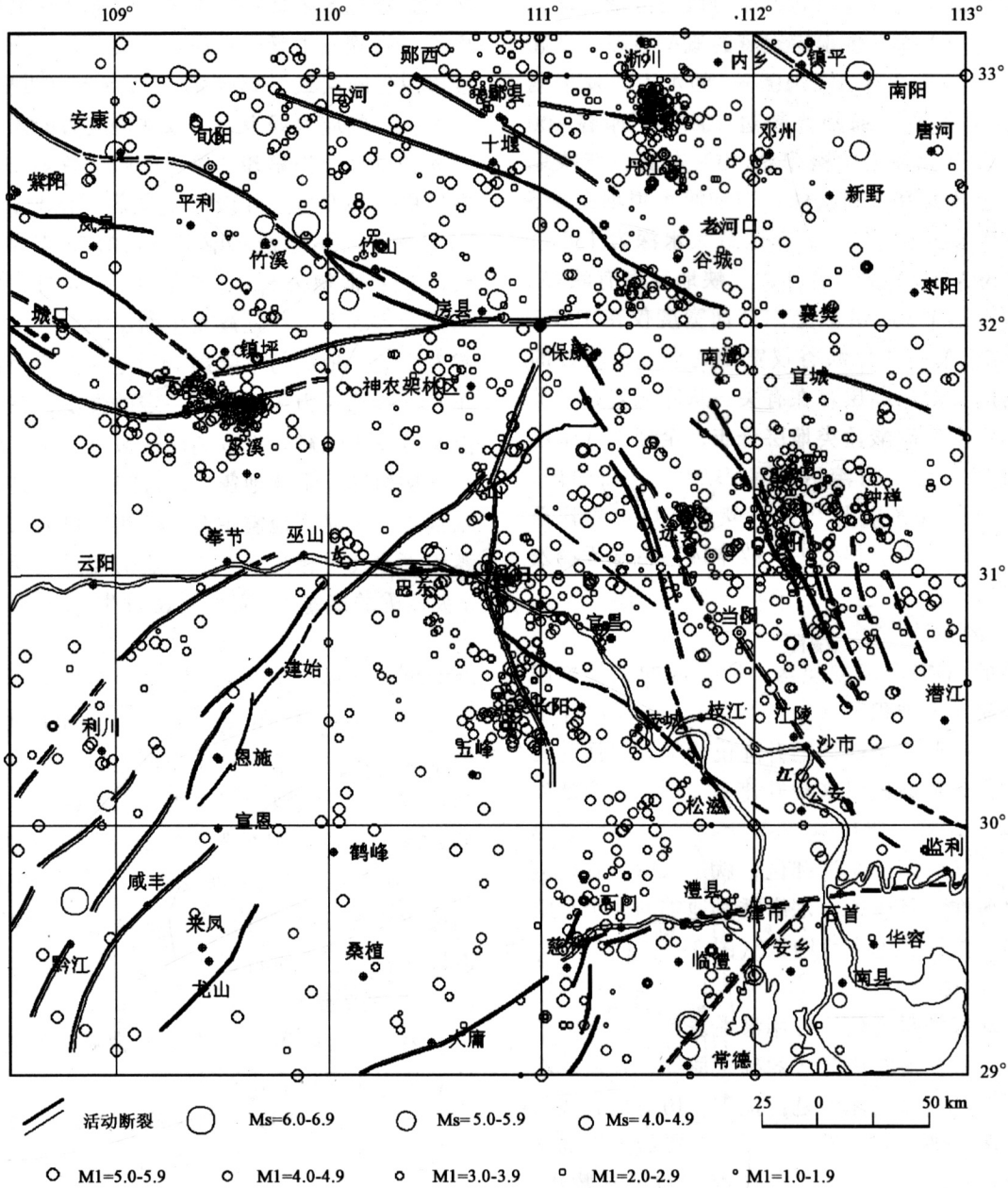


图 3 三峡地区活断裂和地震震中分布图

Fig.3 Distribution of seismic epicenters in the Three-Gorges reservoir area

三峡水库将分三期提高水位（即 2003 年水位达 135 m，2006 年达 156 m，2009 年达 175 m）。水位三次提高，也就是三次水压加大。加压后，水向外渗透软化的面积随着时间扩大。显然，三期的水位抬高，断层面的软化面积愈来愈大，若发生地震，其震级也愈大。所以，最后一期水位抬高后，面临强震的危险性更大。

### 3 结语

根据以上分析，得出以下几点认识：

- 1) 水库蓄水后，引发小震是必然的，而且有可能发生 5.5 级左右地震的危险，地震烈度将可达到 VII°~ VIII°。

表1 全球部分水库诱发地震 ( $M \geq 4.5$ ) 统计<sup>[19]</sup>Table 1 Simple list of the reservoir-induced earthquakes ( $M \geq 4.5$ ) over the globe

库(坝)名	坝高/m	库容/ $10^8 \text{ m}^3$	开始蓄水时间 (年-月-日)	首次诱发地震时间 (年-月-日)	最大诱发地震时间 (年-月-日)	震级(烈度)
长江三峡水库(中国湖北)	185	393	2003-06-01 (2003-06-10 达到 135 m 水 位)	2003-06-07 发生微 震群, 6月9日4~6 时最密集, 截止6月 30日共记录2000余 次, 最大的M2.1		
新丰江水库(中国广东)	105	115	1959-10	1959-11	1962-03-19	6.1
丹江口水库(中国湖北)	97	162	1967-11	1970-01	1973-11-29	4.7
参窝水库(中国辽宁)	50.3	5.47	1972-11	1973-02	1974-12-22	4.8
佛子岭水库(中国安徽)	74	4.7	1954-06	1954-12	1973-03-11	4.5
柯依那(Koyna, 印度)	103	27.8	1962-06	1963-10	1967-12-10	6.4
基尼萨尼(Kinnersani, 印度)	61.75		1965	1965	1969-04-13	5.3
黑部第四(Kurobe, 日本)	180 (186)	1.5 (1.99)	1960	1961-08	1961-08-09	4.5
齐尔克依(циркй, 前苏联)	233	27.8	1974-07		1974-12-23	5.1
克里马斯塔(Kremasta, 希腊)	165 (174)	47.5	1965-07	1965-12	1966-02-05	6.2
卡斯特拉基(Kastraki, 希腊)	95	1.0	1969-01	1969-03	1969-03	4.6
匹阿斯特拉(Piastra, 意大利)	93	0.12	1965	1965-10	1966-04-07	(VI-Ⅶ) 4.7
蒙台纳特(Monteynard, 法国)	155	2.75	1962-04	1963-04	1963-04-25	5.0 (4.9)
沃格兰(Vouglans, 法国)	110	6.05	1969	1971-06	1971-06-21	4.5
堪内里斯(Canelles, 西班牙)	150	6.78	1960-10	1962-06	1962-06-09	4.7 (V)
巴伊纳巴什塔(Bajina Basta, 南斯拉夫)	89	3.4	1967-06	1967-07	1967-07-03	4.5~5.0
卡里巴(Kariba, 赞比亚-津巴布韦)	123 (125)	1750 (1603)	1958-12	1959-06	1963-09-23	6.1
阿斯旺(Aswan, 埃及)	111	1640	1968 (1970)		1981-11-14	5.6
乌特富达(Qued Fodda, 阿尔及利亚)	89	2.25	1932-12	1933-01	1954-09-09	Ⅶ
阿科松博(Akosombo, 加纳)	113	1600	1958		1964-11	Ⅷ
米德湖(Lake Mead, 美国)	221	375	1935-05	1936-09	1939-05-04	4.6 (5.0)
奥罗维尔(Oroville, 美国)	235	4.4	1967-11		1975-08-01	5.6 (5.8)
卡诺-德-卡尤拉(Carno de Cajura, 巴西)	22	1.93	1954	1970	1972-01	4.7
沃尔塔-格兰德(Volta Grande, 巴西)	56	23.0	1973	1973		5.0
本莫尔(Benmore, 新西兰)	118	20.4	1964-12	1965-02	1966-07	>4.5

2) 发生5.5级左右地震的地点在巴东和秭归两个地区, 存在导致严重地质灾害之危险。

3) 发震时间一般在水位抬高后2~3年之内。

鉴于以上认识, 三峡库区存在水库诱发破坏性地震的危险, 这种危险随着二期和三期水位的增加而日趋临近。上述两条强震发生断层被一条活断层连接,  $Q_3$  以来的构造活动已引起长江两岸大量滑坡体的再活动, 当水库储水后, 许多滑坡体的下部

为库水所浸润, 如遇诱发强震将会引起巨大的灾害。巴东至秭归区段多为移民迁建区, 滑坡体上有众多的城镇和居民点, 一旦发生破坏性地震, 滑坡体涌入江中, 引发的灾难, 将是十分惨重的。自蓄水达135 m水位以来, 库区微震频繁, 长江南岸的秭归沙镇溪及附近于2003年6月10日发生1.7级地震, 7月9日发生1.6级地震, 7月13日零时20分突然发生2400余万方的大滑坡, 此滑坡体缓

慢滑入江中, 一个小镇消失了, 24 人遇难, 千余人劫后余生<sup>[20,21]</sup>。前车之覆, 应为后车之鉴。

#### 参考文献

- [1] 李胜乐, 严尊国, 薛军蓉, 等. 长江三峡水库蓄水后的首发微震群活动[J]. 大地测量与地球动力学[J]. 2003, 23(4): 75~79
- [2] Li Ping, Li Yuanjun. A study of the Crustal Stability in the Yangtze Three Gorges Area[J]. Engineering science, 2003, 1(1): 23~31, 56
- [3] 刘锁旺, 李愿军, 丁忠孝, 等. 1856 年湖北咸丰大路坝地震[A], 中国地震年鉴[M]. 北京: 地震出版社, 1987. 300~314
- [4] 黄伟, 1856 黔江、咸丰间 6.1/4 级地震[M], 四川活动断裂与地震(唐荣昌、韩渭滨著), 1993. 地震出版社, 29~33
- [5] 王静瑶. 1979 年湖北巴东 5.1 级地震震源机制与地形变. 地壳形变与地震[J]. 1981. 创刊号: 93~100
- [6] 李愿军, 丁美英. 长江三峡东段的地震与滑坡问题[J]. 中国工程科学, 2003, 5(10): 43~51
- [7] 熊继平. 湖北地震史料汇考[M]. 北京: 地震出版社, 1985
- [8] 时迎, 贺玉芳. 2001 年 12 月 13 日湖北秭归与兴山交界一带 4.1 级地震[R]. 中国地震年鉴(2001). 北京: 地震出版社, 2002: 180
- [9] 李珩, 张世良, 刘行松, 等. 对长江三峡东段新构造的几点新认识[A]. 构造地质问题[C]. 北京: 科学出版社, 1965: 69~64
- [10] 丁仁杰, 汪成民, 胡正华, 等. 试论长江三峡库区地震、地质灾害及其监测、预报与防治[J]. 自然灾害学报, 2001, 10(3): 71~78
- [11] 高士钧, 等. 长江三峡地区地壳应力场与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1992
- [12] 罗淦堂, 付冰清. 猴子岭斜坡稳定分析[J], 长江科学院院报, 1991, 8(1): 26~35
- [13] 杨清源, 胡毓良, 陈献程, 等. 国内外水库诱发地震目录[J]. 地震地质, 1996, 18(4): 453~461
- [14] 于品清. 从水文地质条件探讨未来三峡水库发生构造型水库地震的可能性[J]. 华南地震. 1993, 13(1): 76~83
- [15] 于品清, 周明礼, 杨淑贤. 未来三峡水库区诱发岩溶型水库地震的可能震级[J]. 1992, 12(2): 81~87
- [16] 高孟潭. 地震带震级上限与最大历史地震的关系[A]. 中国地震区划文集[C]. 地震出版社, 1993: 138~143
- [17] 国家地震局. 中国地震烈度区划图(1990)概论[M]. 北京: 地震出版社, 1996: 89~109
- [18] 胡聿贤. 地震安全性评价技术教程[M]. 北京: 地震出版社, 1999: 130~153
- [19] 丁原章. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989
- [20] 湖北省千将坪滑坡应急调查专家组. 秭归县沙镇溪镇千将坪滑坡应急调查报告[R]. 2003
- [21] 薛军蓉, 李峰, 王育. 三峡水库蓄水初期 9 次微震震源机制解特征[J]. 大地测量与地球动力学, 2004, 24(2): 48~51

## A Study of Reservoir-induced Earthquake in the Three Gorges Area

Li Ping<sup>1</sup>, Li Yuanjun<sup>2</sup>, Yang Meie<sup>1</sup>

(1. Institute of Geology, China Seismological Bureau, Beijing 100029, China;

2. College of Civil Construction Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China)

**[Abstract]** The Three-Gorges Hydropower Project on Yangtze River was officially impounded on June 1, 2003. Then, more than two thousand microearthquakes abruptly occurred along the River in Badong County of Hubei Province from June 7, 2003, and attracted great attention. After the completion of the second and third-phase construction of the project, the water level will raise up to 156 m and 175 m, respectively. Could it trigger stronger shock? Seismotectonic analysis of the distribution of several active faults and their intersections and seismogenic capacity in the eastern part of the Three-Gorges Reservoir area suggests that two potential seismic focus zones located in Badong and Xiangxi may be hit by reservoir-induced earthquake of upper-limit magnitude about 5.5, and the seismic intensity in epicentral zone will be VII°~VIII°. Meanwhile, a large number of landslides will be triggered to move and, hence, heavy geologic hazards will occur.

**[Key words]** Three-Gorges Reservoir area; reservoir-induced earthquake; geologic hazards