

重庆羊头铺水库诱发地震分析研究\*

吴建超<sup>1,2</sup>, 张丽芬<sup>1</sup>, 蔡永建<sup>1,2</sup>, 缪卫东<sup>1,2</sup>, 雷东宁<sup>1,2</sup>, 余松<sup>1,2</sup>, 乔岳强<sup>1,2</sup>

(1. 中国地震局地震研究所(地震大地测量重点实验室), 湖北 武汉 430071; 2. 武汉地震工程研究院, 湖北 武汉 430071)

**摘要:**通过实地调查并结合前人研究成果,综合分析了羊头铺水库区的地质构造背景、地震活动性及水文地质条件等。在此基础上,应用构造类比法和概率预测法对羊头铺水库诱发地震的可能性进行了分析。结果表明,库区南段有发生水库诱发地震的可能性,发生 $M_s1.0\sim3.0$ 地震的概率约为0.19,诱发最大地震强度为 $M_s3.0$ 左右。而库区北段有发生 $M_s1.0$ 地震的可能性,发震概率仅为0.03。  
**关键词:**羊头铺水库;构造类比法;概率预测法;水库诱发地震  
**中图分类号:**P315.7      **文献标识码:**A      **文章编号:**1000-0666(2012)03-0335-06

0 引言

羊头铺水电站位于重庆市彭水县保家镇羊头铺乡郁江上游1.6 km处,为河床式水电站。设计重力坝高44 m,坝长235 m,正常蓄水位247 m,水库总库容 $1.44\times10^8\text{ m}^3$ ,属Ⅲ等中型水库。该水库的兴建对郁江下游防洪、减淤及水资源开发利用等具有重要战略意义<sup>①</sup>。

水库蓄水诱发地震活动的研究一直被地学界所重视,人们对水库诱发地震的研究已有超过60年的历史。目前,国内外已有140余座水库诱发了地震,其中我国就有24例水库诱发地震事件(王建平,2010; Gupta, 2002)。水库诱发地震对水库工程设施能产生不同程度的破坏,并能引发严重的次生灾害(吴建超,2009)。羊头铺水库于2008年开始设计建设,水库蓄水后是否会诱发地震,诱震的震中、强度及其对库周环境的影响等与电站水库所处的环境密切相关。因此,分析研究羊

头铺水库的诱发地震问题是十分必要的。本文在分析羊头铺水库区地质构造背景、地震活动性及水文地质条件等资料的基础上,对库区诱发地震的可能性进行了分析计算,为进一步开展水库诱发地震的监测研究和防震减灾工作奠定基础。

1 区域地震构造背景

1.1 区域地质构造

羊头铺库区位于扬子准地台上扬子台褶带黔江拱褶断束,其北西侧以巫山—金佛山基底断裂为界,与四川台坳川东褶皱束相接。区域构造以宽缓背斜、向斜或箱状复式背斜及伴生断裂为特征<sup>②</sup>。水库区大部分处在郁江背斜西翼,并涉及到普子复向斜东翼部分。

羊头铺库区及外围出露的断裂主要为郁山断裂带,其次为大堰塘断裂及其它规模较小的断层。主要断裂概况如图1、表1所示,这些断裂均属早、中更新世断裂,晚更新世以来没有活动的迹象。

表 1 羊头铺水库近场区内主要断裂概况  
Tab. 1 Main faults in the near-field region of Yangtoupu reservoir

断裂编号	断裂名称	产状	长度/km	性质	活动时代
F <sub>1</sub>	郁山断裂带	18°~40°/NW∠45°~80°	40	右旋走滑	Q <sub>2</sub>
F <sub>2</sub>	大堰塘断裂带	15°~65°/SE∠45°~60°	24	正断	Q <sub>1</sub>
F <sub>3</sub>	朱家咀断裂	110°~120°/NE∠60°~70°	1.5	左旋走滑	Q <sub>1</sub>
F <sub>4</sub>	田坯子断裂	165°/NE∠45°	2	逆断	Q <sub>1</sub>

\* 收稿日期: 2011-10-24.  
基金项目: 中国地震局地震研究所基金(IS201056088)资助.  
① 国家电力公司西北勘测设计研究院. 2000. 重庆市彭水县羊头铺水利枢纽工程初步设计报告.  
② 武汉地震工程研究院. 2008. 重庆市彭水县羊头铺水电站, 三江口水利枢纽工程水库诱发地震危险性评价报告.

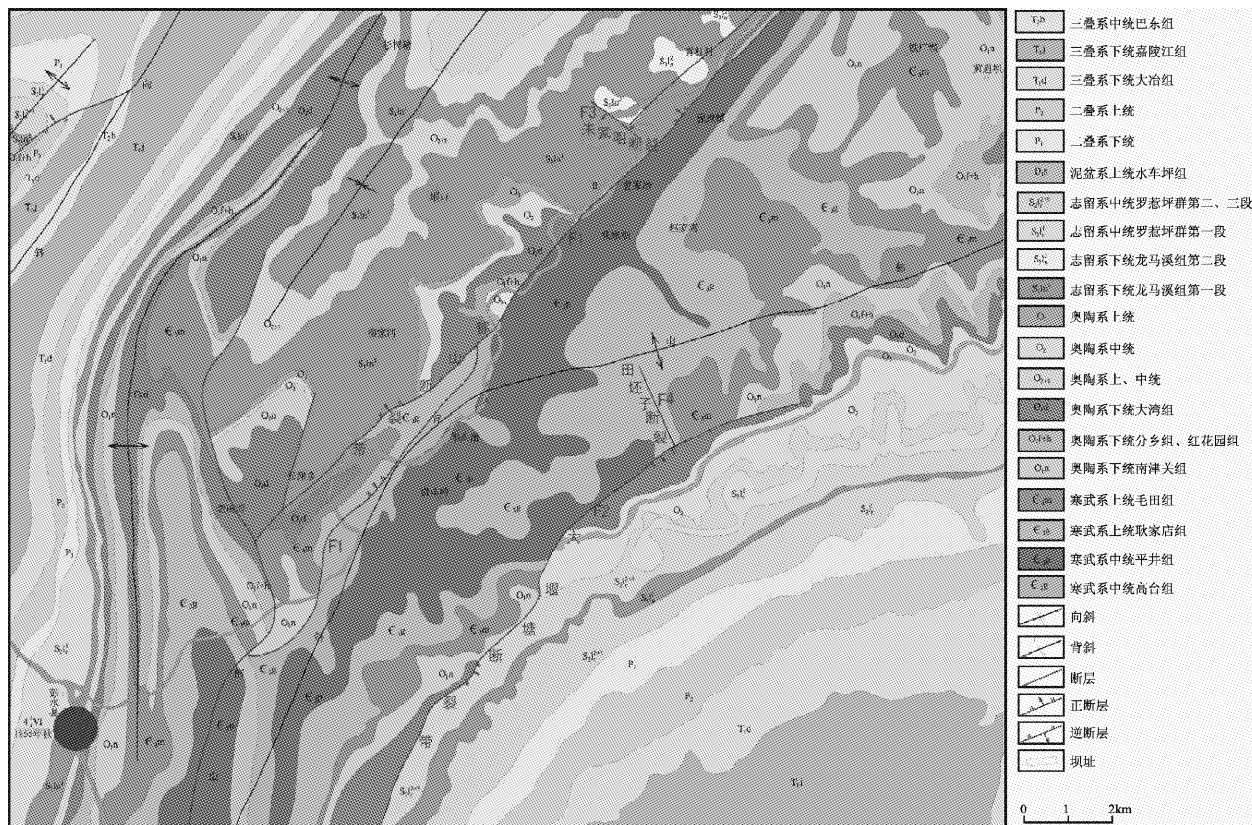


图1 羊头铺水库区地震构造图

Fig.1 Seismotectonic map of the Yangtoupu reservoir region

1.2 地形地貌

羊头铺水库占据着南西流向的郁江下游普家坝至羊头铺河段，长约 15.5 km，郁江河谷及其两侧的地形地貌有一定差异（图 2）。整个库区段发育较典型的山区曲流河河谷地貌，由北向南大致可分为两段。

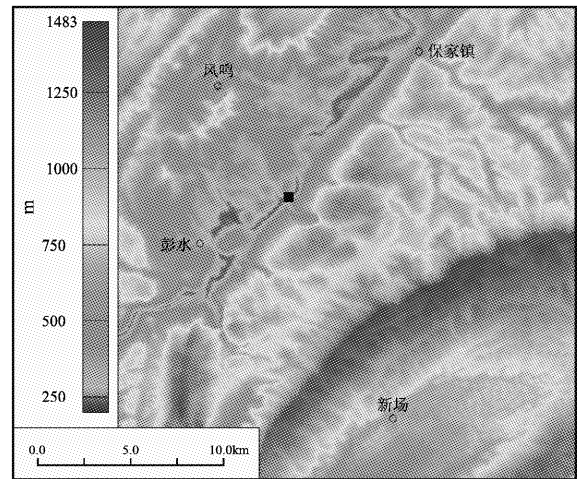


图2 羊头铺水库近场区卫星地貌影像图（■：坝址）

Fig.2 Satellite landform image of the near-field region of Yangtoupu reservoir（■：Dam）

北段由张家坝至库尾，呈曲流宽谷地貌，谷宽 500 ~ 2 000 m，地面高程 280 ~ 480 m，主泓道蜿蜒曲折，并出现多处边滩和沙洲江心滩。河谷中普遍发育 3 ~ 4 级阶地。南段由张家坝至羊头铺，主泓道发育在长而窄的峡谷中，谷宽一般为 30 ~ 80 m，地面高程为 230 ~ 600 m，微地貌呈不对称的“V”型峡谷。谷地下部两侧为相对高度 80 ~ 120 m 的近垂直陡峭的谷坡，底部完全被河床所据，极少有河床堆积物，局部呈嶂谷、隘谷形态。谷地上部两侧为坡角 30° ~ 45° 的缓坡。其中南段为羊头铺水库深度和蓄水量最大的地段。

2 库区地震活动背景

在羊头铺水库区 10 km 范围内，历史和现今地震活动水平较低，除 1855 年彭水 4 级地震外，近 40 年来仅有 9 次小震活动，且多集中在库区北部和西部 5 ~ 8 km 的范围内，最大震级为发生在文家坝附近的  $M_L3.8$  地震，小震活动与郁山断裂带缺乏相关性。

库区外围 150 km 范围内较大中强地震有 1856

年咸丰 6 级地震、1854 年南川 5 级地震、1931 年利川 5 级地震等，对库区的影响烈度均不超过 V 度。

### 3 水库诱发地震危险性分析

#### 3.1 诱发地震的地震地质条件

水库诱发地震是复杂的科学问题，目前还处在探索阶段。根据陈蜀俊等（2005）的研究成果，水库诱发地震的类型可分为构造型、岩溶型和应力局部调整型 3 类，但这 3 类水库诱发地震又各具不同的发震条件。因此，从已发地震经验类比总结出来的发震条件是分析判断水库是否会诱发地震的基础。

库区岩性条件对库水向地下渗透起着重要作用。在我国已发生的 27 例水库地震中，发生在碳酸盐岩地层中的地震有 18 例，占 66%，发生在花岗岩类岩石中的地震有 5 例，约占 18%（杨清源，1996；叶支权等，2010）。因此，岩性条件是产生水库诱发地震的直接要素，同时也是讨论水库诱发地震的重要依据。

纵观羊头铺水库的地震地质条件：

（1）库区南段长约 4.5~5.0 km，主要由倾向北西的中寒武统和下奥陶统次生灰岩、泥质灰岩、泥质白云岩和生物碎屑灰岩组成。这类地层绝大部分具有可溶性，沿层面和裂隙岩溶地貌发育。虽然在水库左岸的保家楼 3 大岩溶系统中，发育有一系列溶洞、溶泉、落水洞、竖井和暗河等，但它们的出露高程大都高于正常库水位 247 m，因此对库区的渗漏作用不大。而零星出露在河库或河库边坡的岩溶、落水洞，虽然流量不大，且随季节变化，但可能导致有利于库水渗漏的条件。

库区北段主要由中、下志留统页岩、粉砂岩组成，构成区域性隔水层。部分为中、下奥陶统和中寒武统灰岩、泥质灰岩、生物碎屑灰岩夹页岩，形成可溶性碳酸盐岩与非可溶性碎屑岩的复式组合，构成局部较少地下水通道。由于透水的碳酸盐岩上覆盖着厚度约 500 m 的隔水层碎屑岩，并构成河床浅部主要基岩，蓄水后，地下水向库区渗漏的可能性较小。

（2）郁山断裂带几乎纵贯库区，从图 1 上可以看出，该断裂带的走向呈不规则状，有些段落穿过了库区，而有些段落偏离了库区，若以库区为一个整体，该断裂一共切割库区 5~6 个断裂段落。断裂

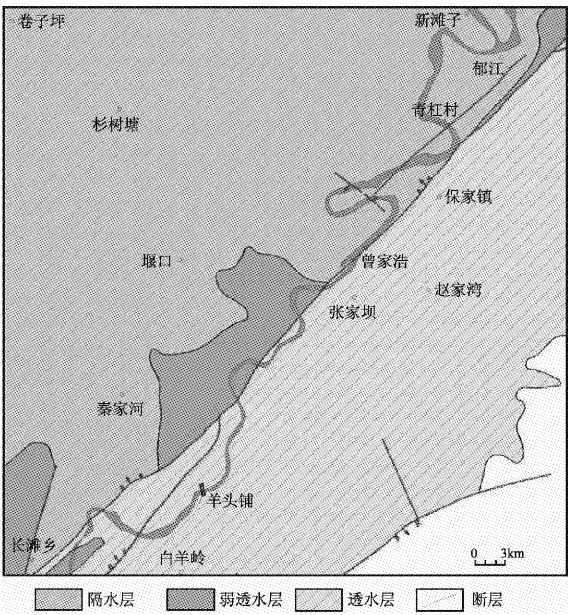


图3 羊头铺水库区碳酸盐岩透水层与碎屑岩隔水层分布图

Fig. 3 Distribution map of the carbonate permeable layer and clastic rock impermeable layer in Yangtoupu reservoir region

带宽 15~30 m，由一系列分支断层组成，有多期活动，最新活动性质为正断。断裂带物质测年大部分为中更新世中期，地貌上有不同程度的响应，沿断裂带无中强地震记载，但局部有小震活动。

该断裂带的渗透系数为  $2.7 \times 10^{-3} \sim 8.3 \times 10^{-4} \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ ，属中等透水体。断裂带内存在地下水位略高于水库正常水位的地下分水岭，库水有可能通过断裂带向下渗漏，为诱发地震提供了水体的主要渗透条件。

（3）从较大范围看，库区现今受 NW-SE 向构造应力场控制。在此应力场作用下，NE 向的郁山断裂带有可能产生挤压变形，亦或左旋活动，易于断裂带的闭合，而不利库水的渗透作用。

从库区外围有限的数据可见，包括库区在内的广大地段地应力  $\tau_0$  值为 50 Pa，垂直应力  $\sigma_v$  随深度增加而迅速减小，库区处于相对较低的地应力背景环境。依据羊头铺水库蓄水后三维数值模拟计算的结果，羊头铺库首区库水荷载约为 0.07 MPa，量值微小，但在郁山断裂带的较深部位，出现相对应力集中区。

综上所述，羊头铺水库库区不存在活动断裂，不存在发生构造型水库地震的可能。但水库蓄水后诱发岩溶型水库地震的可能性较大，主要集中在

在碳酸盐岩大面积分布、岩溶管道发育的库段。由于库区岸坡、沟谷地形相对高差较大，以及库区碳酸盐岩分布特点，岩层中 3~4 组结构面易因库水渗透作用抗剪强度降低，故有发生应力局部调整型水库地震的可能性。

3.2 构造类比分析

该方法根据对已发震水库资料的分析，总结归纳出诱发地震的主要条件。这些条件在拟建水库中越齐备越典型，该水库诱发地震的可能性就越大（张秋文等，2005）。

通过与水库规模、地震地质条件等相近的四川铜街子、云南鲁布革、湖北前进、湖南黄石以及南冲等已发震水库进行对比后发现，羊头铺水库库区地层以灰岩和白云岩为主，属于诱震的有利条件。但含水层地下水循环主要局限在浅部，未达到地壳深处，因此水对地壳中应力应变的影响仅限于浅部。库坝区发育有郁山断裂以及其它多条规模较小的压扭性和张扭性次级断层，但均不属于活动断层，断裂的渗透能力较弱，不大可能积累较大的应力应变。这两方面的因素大大制约了该水库的诱震能力。因此判定该水库发生构造型水库诱发地震的可能性较小。但在水库南段有发生岩溶型水库诱发地震的可能。

3.3 概率预测分析

该方法是美国 Packer（1979）和 Beacher（1979）提出来的，其立意是在概率意义上对一个新建水库的诱发地震危险性进行预测。从现有较大水库的可能与诱发地震有密切关系的因素进行统计分析。

水库诱发地震受多种因素的影响，一般把水库诱发地震过程看成是一个多因素函数，将影响因

素看作随机因素，比较真实全面地获得水库诱震总体组合环境和诱发地震活动特点的资料，再通过概率统计等数学模型来计算和处理，就可以得到条件和结果之间的函数关系（张琦伟等，2005；张林洪等，2004）。

结合秦嘉政等（2009）、王秋良等（2009）的研究，针对羊头铺水库的主要影响因素，选用库水深度（ $D$ ）、库区岩性条件（ $G$ ）、区域应力状态（ $S$ ）、断层活动性（ $F$ ）、岩溶发育程度（ $K$ ）、与库水沟通关系（ $C$ ）和地震活动背景（ $E$ ）7 个诱震因子进行震级概率预测计算（表 2）。

根据贝叶斯条件概率理论，预测水库诱发地震的统计模型可表达为：

$$P(M_i/D,G,S,F,K,C,E) = \frac{P(M_i)P(D,G,S,F,K,C,E/M_i)}{\sum_{i=0}^4 P(M_i)P(D,G,S,F,K,C,E/M_i)}$$

(1)

在统计样本中，认为各诱震因子是相互独立的。（1）式中： $P(M_i)$  为不同震级地震类别的先验概率。根据国内外 46 座发震的大型水库，205 座未发震的大型水库资料统计的发震概率，发生强震、中强震、弱震、微震和不发震的先验概率分别为： $P(M4) = 0.02$ ； $P(M3) = 0.04$ ； $P(M2) = 0.05$ ； $P(M1) = 0.07$ ； $P(M0) = 0.82$ 。

$P(D,G,S,F,K,H,C,E/M_i)$  为各影响因素组合条件下不同震级的条件概率（表 3）。

利用 MATLAB 软件，计算得出库区南段和北段分属 5 个发震震级的概率，取其中概率值最大者，即认为预测的可能发震强度（表 4）。

表 2 水库诱发地震影响因素及其状态  
Tab. 2 Influence factors and the state of the reservoir-induced earthquake

诱震因子	状态		
	1	2	3
库水深度（ $D$ ）	> 150 m	92 ~ 150 m	< 92 m
库区岩性条件（ $G$ ）	块状岩体	层状岩体	碳酸盐岩体
构造应力环境（ $S$ ）	逆断层环境	正断层环境	走滑断层环境
断层活动性（ $F$ ）	活动	不活动	
岩溶发育程度（ $K$ ）	强	弱	不发育
与库水沟通关系（ $C$ ）	直接接触	不直接接触，但有沟通	不沟通
地震活动背景（ $E$ ）	强	中等	微弱

表 3 诱震因子不同状态发震先验概率统计表

Tab. 3 Statistical table of earthquake prior probability for the induced-earthquake factors under different states

诱震因子	状态	发震强度				
		I 类	II 类	III 类	IV 类	V 类不发震
		( $M \geq 6.0$ )	( $6.0 > M \geq 4.5$ )	( $4.5 > M \geq 3.0$ )	( $M < 3.0$ )	
库水深度 ( $D$ )	1	0.00	0.22	0.46	0.36	0.18
	2	1.00	0.70	0.46	0.54	0.60
	3	0.00	0.08	0.08	0.10	0.22
库区岩性条件 ( $G$ )	1	0.70	0.48	0.46	0.21	0.48
	2	0.05	0.10	0.15	0.47	0.36
	3	0.25	0.42	0.39	0.32	0.16
构造应力环境 ( $S$ )	1	0.00	0.10	0.23	0.32	0.17
	2	0.40	0.41	0.62	0.50	0.68
	3	0.60	0.49	0.15	0.18	0.15
断层活动性 ( $F$ )	1	0.90	0.70	0.38	0.21	0.10
	2	0.10	0.30	0.62	0.79	0.90
岩溶发育程度 ( $K$ )	1	1.00	0.42	0.55	0.50	0.16
	2	0.00	0.33	0.35	0.17	0.34
	3	0.00	0.25	0.10	0.33	0.50
库水透水深度 ( $H$ )	1	0.75	0.60	0.57	0.31	0.21
	2	0.20	0.30	0.38	0.50	0.28
	3	0.05	0.10	0.05	0.19	0.51
与库水沟通关系 ( $C$ )	1	0.80	0.80	0.69	0.61	0.38
	2	0.10	0.10	0.23	0.29	0.31
	3	0.10	0.10	0.08	0.10	0.31
地震活动背景 ( $E$ )	1	0.25	0.20	0.31	0.21	0.24
	2	0.25	0.40	0.46	0.53	0.47
	3	0.50	0.40	0.23	0.26	0.29

表 4 诱震因子状态及统计模型预测结果

Tab. 4 The state of the induced earthquake factors and prediction results of the statistical models

预测单元划分	影响因子状态	统计模型预测结果					可能发震强度
		$M4$	$M3$	$M2$	$M1$	$M0$	
南段	$D3G3S2F2K1C2E3$	0.00	0.01	0.06	0.12	0.81	$M0, M1$ (不排除)
北段	$D3G3S2F2K3C2E3$	0.00	0.00	0.00	0.03	0.97	$M0$

由计算结果可知，水库南段岩性主要以灰岩、泥质白云岩等碳酸盐岩类为主，岩体喀斯特化程度较高，且岩溶管道发育，发生 1~3 级地震的概率约为 0.19。而库区北段不发震的比例较高，约为 0.97，有发生  $M1.0$  地震的可能性，发震概率为 0.03。

4 结论

羊头铺水库区周边为贫困山区，农民住房房屋质量较差，水库诱发地震会对居民的生命财产

存在潜在的破坏影响。

因此，综合羊头铺库区地层岩性、地质构造、地形地貌及岩溶水文地质等条件，采用构造类比和概率预测 2 种分析方法，分析认为库区南段包括郁山断裂带分布区，有发生水库诱发地震的可能性。而库区北段诱发地震的可能性较小。

采用概率计算得到库区南段发生 1~3 级地震的概率约为 0.19，诱发地震最大震级为  $M3.0$  左右。库区北段有发生  $M1.0$  地震的可能性，发震概率仅为 0.03。故库区南段可以排除发生水库诱发地震的可能性。

衷心感谢刘锁旺研究员和高士钧对本研究的指导!

### 参考文献:

- 陈蜀俊,姚运生,曾佐勋,等. 2005. 三峡库首区蓄水前后构造应力场三维数值模拟研究[J]. 岩石力学与工程学报. 4(2): 5612-5617.
- 陈蜀俊. 2005. 三峡库首区蓄水前后构造应力场数值模拟及地震危险性研究[D]. 武汉: 中国地质大学.
- 秦嘉政,刘丽芳,钱晓东. 2009. 水库诱发地震活动特征及其预测方法研究[J]. 地震研究, 32(2): 105-113.
- 王建平. 2010. 孔梁水库诱发地震预测研究[J]. 地震研究. 33(1): 19-25.
- 王秋良,姚运生,夏金梧,等. 2009. 统计预测模型对三峡库区诱发地震预测的应用[J]. 地震地质, 32(1): 287-294.
- 吴建超,陈蜀俊,陈俊华. 2009. 三峡水库蓄水后全位移场变化的数值模拟[J]. 大地测量与地球动力学. 29(6): 52-55.

- 杨清源,胡毓良. 1996. 国内外水库诱发地震目录[J]. 地震地质. 18(4): 453-461.
- 叶友权,王遵琪,张艺峰,闫培,薛蕾. 2010. 厦门莲花水库诱发地震可能性分析[J]. 工程地球物理学报. 7(5): 644-649.
- 张林洪,刘荣佩,周建芬,等. 2004. 库水压力作用下不同类型断层诱发水库地震的可能性分析[J]. 地震研究, 27(3): 241-245.
- 张琦伟,宋刚,刘志英,徐树涛,郭文生. 2005. 红吉水库诱发地震分析研究[J]. 自然灾害学报. 14(2): 126-131.
- 张秋文,王乘,李峰. 2005. 长江三峡工程库首及周缘地区水库诱发地震危险性定量预测与评估研究[J]. 水电能源科学. 23(4): 21-26.
- Beacher G B. 1979. Reservoir induced seismicity, II: Probability of risk at deep and/or very large reservoirs[J]. G S A, 11(7): 3-9.
- Gupta H K. 2002. A review of recent studies of triggered earthquakes by artificial water reservoirs with special emphasis on earthquakes in Koyna, India[J]. Earth - Science Reviews, 58(3/4): 279-310.
- Packer D R. 1979. Reservoir induced seismicity, II: Summary and implications for occurrence of risk[J]. G S A, 11(7): 12-18.

## Research on Earthquake Induced by Yangtoupu Reservoir in Chongqing

WU Jian-chao<sup>1,2</sup>, ZHANG Li-fen<sup>1</sup>, CAI Yong-jian<sup>1,2</sup>, MIAO Wei-dong<sup>1,2</sup>,  
LEI Dong-ning<sup>1,2</sup>, YU Song<sup>1,2</sup>, QIAO Yue-qiang<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Earthquake Geodesy, Institute of Seismology, CEA, Wuhan 430071, Hubei, China)

(2. Wuhan Institute of Earthquake Engineering, Wuhan 430071, Hubei, China)

### Abstract

On the basis of field investigation and previous research, we comprehensively analyzed the tectonic background, seismic activity and hydrogeology condition of the Yangtoupu reservoir. Then we discussed the probability of the earthquake induced by Yangtoupu reservoir using structural-analogy method and probabilistic statistic method. The results show that there is possibility for the southern region of the Yangtoupu reservoir to induce earthquake and the probability of reservoir induced earthquake from  $M1.0$  to  $M3.0$  is about 0.19. The biggest magnitude of the induced earthquake is about  $M3.0$ . The northern region of it has little possibility to induce  $M1.0$  earthquake and the probability is only 0.03.

**Key words:** Yangtoupu reservoir; structural-analogy method; probabilistic statistic method; reservoir induced earthquake