

凌江筑, 廖欣, 姚运生, 等. 贝叶斯概率统计预测模型在三峡工程水库地震重点监视区地震预测中的应用与检验[J]. 地震工程学报, XXXX, XX(X): 000-000. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20231223001

LING Jiangzhu, LIAO Xin, YAO Yunsheng, et al. Application and validation of Bayesian probability statistical prediction model in reservoir-induced earthquake forecasting for key monitoring areas of Three Gorges Reservoir[J]. China Earthquake Engineering Journal, XXXX, XX(X): 000-000. DOI: 10.20000/j.1000-0844.20231223001

# 贝叶斯概率统计预测模型在三峡工程 水库地震重点监视区地震预测中 的应用与检验

凌江筑<sup>1,2,3</sup>, 廖欣<sup>1,2,3</sup>, 姚运生<sup>1,2,3</sup>, 石云<sup>1,2,3</sup>,  
钱建秀<sup>1,2,3</sup>, 胡陈悦<sup>4</sup>, 秦维秉<sup>5</sup>

(1. 防灾科技学院, 河北 三河 065201;

2. 河北省地震动力学重点实验室, 河北 三河 065201;

3. 河北省资源环境灾变机理及风险监控重点实验室, 河北 三河 065201;

4. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081;

5. 中国长江三峡集团有限公司, 北京 100038)

**摘要:** 水库地震是由人类工程活动引发的地震活动, 具有群发性、高频次和大烈度的特点, 对其进行预测研究有助于评估水库地震灾害风险。将三峡工程水库地震重点监视区划分为若干个  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  的预测单元, 运用贝叶斯概率统计预测模型, 依据库水深度、岩体类型、区域构造应力状态、断层活动性、岩溶发育程度、库水透水深度、与库水沟通关系、地震活动背景 8 个诱震因素, 预测诱发震级的概率。结果表明: 在重点监视区, 以碳酸盐岩为主的库岸附近区域, 诱发地震概率较高; 仙女山断裂北端、高桥断裂近库岸段及牛口断裂近库岸段, 存在诱发中强震 ( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ ) 的可能; 而三峡坝址区和远离库岸区域, 不发震或诱发微震的概率较高。使用三峡水库 175 m 蓄水以来的实际地震情况对预测模型进行检验, 结果表明实际地震的发生地点及震级与预测结果存在明显的一致性, 采用精细划分方式的贝叶斯概率统计预测方法在水库诱发地震危险性评定方面具有很好的效果。研究的概率预测结果对于确定地震风险区域、制定地震预警和防范策略, 以及保障水库工程的安全运行具有重要参考意义。

**关键词:** 水库地震; 贝叶斯统计预测法; 三峡工程水库重点监视区; 诱震因素

**中图分类号:** P315.2

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-0844(XXXX)0X-0-10

DOI: 10.20000/j.1000-0844.20231223001

**收稿日期:** 2023-12-23

**基金项目:** 地震科技星火项目(XH23063A); 国家自然科学基金(41602274, 42174177); 中国长江三峡集团有限公司项目(0799217); 防灾科技学院 2020 年度重点实验室开放基金项目(FZ202208)

**第一作者简介:** 凌江筑(1996-), 男, 硕士研究生, 主要从事水库诱发地震与地震活动性研究。E-mail: 1980849898@qq.com。

**通信作者:** 廖欣(1985-), 男, 博士, 教授, 主要从事流固耦合方面研究。E-mail: liaoxin19851224@126.com。

# Application and validation of Bayesian probability statistical prediction model in reservoir-induced earthquake forecasting for key monitoring areas of Three Gorges Reservoir

LING Jiangzhu<sup>1,2,3</sup>, LIAO Xin<sup>1,2,3</sup>,

YAO Yunsheng<sup>1,2,3</sup>, SHI Yun<sup>1,2,3</sup>, QIAN Jianxiu<sup>1,2,3</sup>, HU Chenyue<sup>4</sup>, QIN Weibing<sup>5</sup>

(1. Institute of Disaster Prevention, Sanhe 065201, Hebei, China;

2. Hebei Key Laboratory of Earthquake Dynamics, Sanhe 065201, Hebei, China;

3. Hebei Key Laboratory of Resource and Environmental Disaster Mechanism and Risk Monitoring, Sanhe 065201, Hebei, China;

4. Institute of Geophysics, CEA, Beijing 100081, China;

5. China Three Gorges Corporation, Beijing 100038, China)

**Abstract:** Reservoir-induced earthquakes, characterized by swarm-like occurrence, high frequency, and significant intensity, are triggered by human engineering activities. The prediction and research on them are crucial for assessing seismic hazards of reservoir. This study applies a Bayesian probability statistical prediction model to key monitoring areas of the Three Gorges Reservoir, divided into several prediction units of  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$ . Eight seismogenic factors were considered: reservoir water depth, rock type, regional tectonic stress state, fault activity, karst development degree, water penetration depth, hydraulic connection with the reservoir, and seismic activity background. The results indicate: (1) Areas near carbonate rock-dominated reservoir banks exhibit higher probabilities of induced earthquakes; (2) The northern end of Xiannüshan fault and the reservoir bank-proximal section of Gaoqiao-Niukou fault show potential for moderate earthquakes ( $6.0 > M_s \geq 4.5$ ); (3) The Three Gorges dam area and regions distal to the reservoir bank have higher probabilities of non-seismicity or micro-earthquakes. The model was validated using seismic records after the impoundment of Three Gorges Reservoir (175 m water level), revealing high consistency between predicted and observed earthquake locations and magnitudes. The Bayesian probability statistical prediction method with rational subdivision has a good effect in the risk assessment of reservoir-induced earthquakes. These probabilistic prediction results provide critical references for delineating seismic risk zones, formulating earthquake early warning and prevention strategies, and ensuring the safe operation of reservoir projects.

**Keywords:** reservoir-induced earthquake; Bayesian statistical prediction method; key monitoring areas of Three Gorges Reservoir; factors inducing earthquake

## 0 引言

地震预测一直是地震学中的重要研究课题,但由于地震活动的复杂性和不确定性,这也是一项极具挑战性的任务。水库诱发地震是指在特定的地区,由于水库蓄水改变了地下水水位、地应力分布以及区域应力状态所引起的地震活动。这种地震与普通天然地震活动不同,具有群发性的特征,而且主要分布于库区附近<sup>[1]</sup>。此外,水库地震活动与水库蓄水或水位变化密切相关,使得对其进行预测成为可能。

目前,水库诱发地震预测方法主要有地质类比

法、灰色聚类法、统计预测法以及综合性方法。其中,地质类比法是寻找一个与研究区地质构造条件相似的已经发生过水库地震的水库区,将二者进行综合对比研究,从而对所研究水库区可能发生地震的震级进行预测<sup>[2]</sup>。这种方法主要依赖于研究者自身的经验和观点,普适性较差。灰色聚类法是依据权值大小来有效地判定水库诱发地震所属类别<sup>[3-4]</sup>。该方法部分指标最优值难以确定,主观性较强。综合方法主要基于水库地震地下流体力学理论,采用数值模拟和机器学习预测技术对水库地震进行预

测。然而,该方法需要获取研究区域的实际地下力学模型,在岩石力学参数的获取方面存在困难<sup>[5]</sup>。统计预测法是一种基于贝叶斯公式的概率统计模型<sup>[6]</sup>,可用来评估水库地震危险性。该方法在工程实践中应用广泛且逐步完善,能有效减少主观因素的干扰,然而,其预测结果对样本统计量非常敏感,当样本量较小时,预测准确性较差。此外,前人在运用上述方法进行水库地震预测时,存在预测单元划分不够精细、区域界限不够明确以及诱震因素选取较少等局限性。

基于上述分析,本文首先选取贝叶斯概率统计方法,利用前人收集到的国内外 309 座已建大型水库资料及其相关地质资料<sup>[7-12]</sup>,结合三峡工程水库地震重点监视区地质概况,选取库水深度、岩体类型、区域构造应力状态、断层活动性、岩溶发育程度、库水透水深度、与库水沟通关系,以及地震活动背景,作为水库地震的诱震因素,并构建预测模型;然

后,结合现有地质资料,将研究区划分为  $1\text{ km} \times 1\text{ km}$  网格,使预测结果更加精细化,更具有可比性;最后,使用三峡水库 2008 年 175 m 蓄水以来实际水库地震情况,对预测模型进行验证分析,进一步提高其可信度。

## 1 三峡工程水库地震重点监视区地质构造背景

三峡工程水库地震重点监视区位于湖北省西部的鄂西山地,地形起伏较大,地质构造上处于秭归盆地、黄陵背斜及神农架穹隆南部地带<sup>[13]</sup>。研究区地质构造如图 1 所示,图中左侧矩形框为巴东库段,右侧矩形框为秭归库段。区内主要发育有 NNW 走向的仙女山断裂、近 NS 走向的九畹溪断裂、NE—NEE 走向的高桥断裂,以及 NNE 走向的牛口断裂<sup>[14-17]</sup>;岩性主要为碳酸盐岩、沉积碎屑岩、花岗岩,浅地表还存在大量溶岩矿洞<sup>[18-19]</sup>。

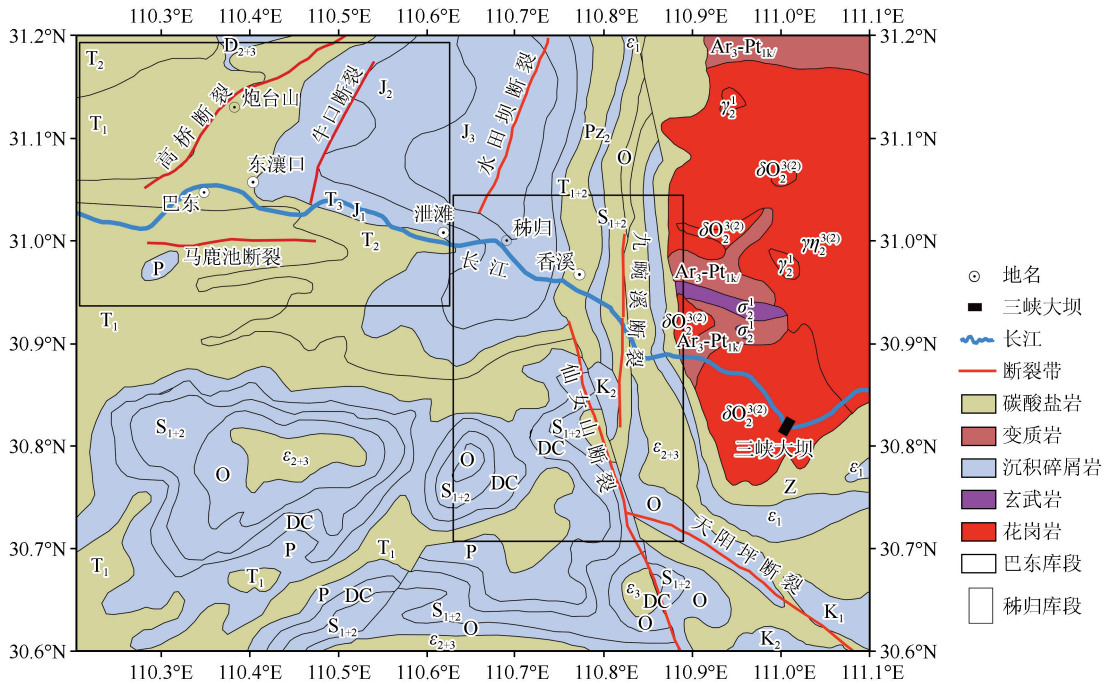


图 1 三峡工程水库地震重点监视区地质构造

Fig.1 Geological structure of key monitoring areas of reservoir-induced earthquakes in Three Gorges Project

## 2 贝叶斯概率统计预测方法

贝叶斯概率统计预测法是由 Beacher 等<sup>[6]</sup>用贝叶斯公式建立起来的用来预测地震活动性的方法。该方法将与水库诱发地震有关的因素视为随机量,在较为全面、客观地获得水库诱震总体组合环境和诱发地震活动特点资料的前提下,选取一定数量的发震水库和未发震水库组成样本集,计算诱震因素

在不同状态下的先验概率,然后通过公式得到诱发地震发生的概率值<sup>[7,19-20]</sup>。

贝叶斯概率统计预测模型计算式如下:

$$P(M_i/D, G, S, F, SK, FD, FC, B) = \frac{P(M_i)P(D, G, S, F, SK, FD, FC, B)}{\sum_{i=0}^4 P(M_i)P(D, G, S, F, SK, FD, FC, B)} \quad (1)$$

式中： $P(M_i)$ 为不同地震等级的先验概率； $P(D, G, S, F, SK, FD, FC, B)$ 为各影响因素组合条件下不同震级的条件概率(具体参数含义列于表1)。地震等级的划分采用苏锦星等<sup>[21]</sup>提出的标准：强震( $M_4 \geq 6.0$ )、中强震( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ )、弱震( $4.5 >$

$M_2 \geq 3.0$ )、微震( $M_1 < 3.0$ )和不发震( $M_0$ )这5个等级。采用余松等<sup>[7]</sup>统计得到的先验概率以及各诱震因子处于不同状态的发震先验概率：强震， $P(M_4) = 0.02$ ；中强震， $P(M_3) = 0.04$ ；弱震， $P(M_2) = 0.05$ ；微震， $P(M_1) = 0.08$ ；不发震， $P(M_0) = 0.81$ 。

表1 水库诱发地震影响因素及其状态<sup>[21]</sup>

Table 1 Influencing factors of reservoir-induced earthquakes and associated states<sup>[21]</sup>

影响因素	状态		
	1	2	3
库水深度 $D$	$D_1: >150$ m	$D_2: 92 \sim 150$ m	$D_3: <92$ m
岩体类型 $G$	$G_1$ : 块状岩体	$G_2$ : 层状岩体	$G_3$ : 碳酸盐岩体
构造应力环境 $S$	$S_1$ : 逆断层环境	$S_2$ : 正断层环境	$S_3$ : 走滑断层环境
断层活动性 $F$	$F_1$ : 活动	$F_2$ : 不活动	-
岩溶发育程度 $SK$	$SK_1$ : 强	$SK_2$ : 弱	$SK_3$ : 不发育
库水透水深度 $FD$	$FD_1$ : 导水深度 $>2000$ m	$FD_2$ : 导水深度 $500 \sim 2000$ m	$FD_3$ : 导水深度 $<500$ m
与库水沟通关系 $FC$	$FC_1$ : 直接沟通	$FC_2$ : 不直接沟通, 但有接触	$FC_3$ : 不沟通
地震活动背景 $B$	$B_1$ : 强	$B_2$ : 中等	$B_3$ : 微弱

### 3 区域划分及其诱震因子状态选取

本研究在空间上对研究区进行  $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$  的网格划分(图2)。这种划分方法可以保证每个网格

单元在地理空间上具有足够的代表性,从而更准确地描述研究区域空间特征,让模型精准捕捉地震发生的可能性,提高其准确性与稳定性。

参考前人研究<sup>[20-21]</sup>,根据三峡工程水库地震重

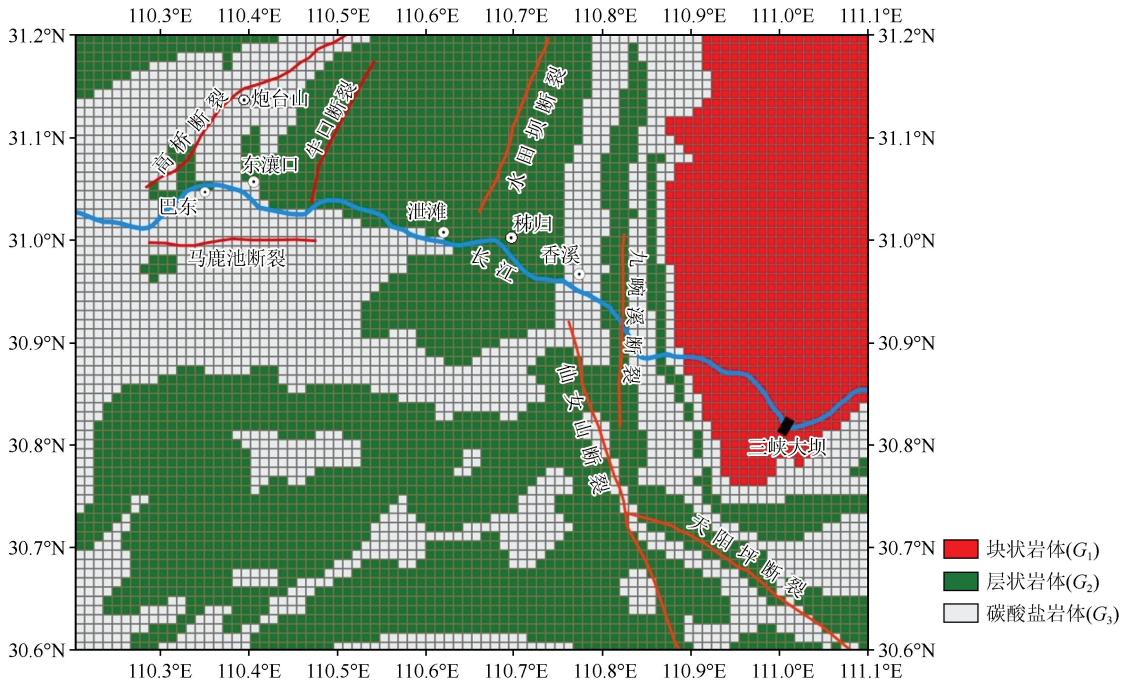


图2 三峡工程重点监视区岩体类型网格划分图

Fig.2 Grid division diagram of rock type in key monitoring areas of Three Gorges Project

点监视区的地质、水文地质等具体条件,选取8个主要的诱震因子用于后续的震级预测,具体包括：库水深度  $D$ 、岩体类型  $G$ 、区域构造应力状态  $S$ 、断层活动性  $F$ 、岩溶发育程度  $SK$ 、库水透水深度  $FD$ 、与库水沟通关系  $FC$ 、地震活动背景  $B$ (表1)。根据

研究区地质资料及其他相关信息,选取网格内诱震因子状态。

库水深度  $D$ :考虑到三峡水库未来运行依然会采用175 m蓄水阶段的调度计划(水位区间145~175 m),绝大多数时间水位高于145 m,平均水位高



度为 160 m,因此坝址库水深度按大于 150 m 考虑;其中,从坝址到泄滩的库水深度为  $D_1$ ,从泄滩到巴东的库水深度为  $D_2$ ,巴东之后库段的库水深度为  $D_3$ 。

岩体类型  $G$ :根据图 1 及相关地质资料对研究区岩性进行状态划分<sup>[18-19]</sup>,变质岩、花岗岩、玄武岩属于块状岩体,归为  $G_1$ ;沉积碎屑岩属于层状岩体,归为  $G_2$ ;碳酸盐岩归为  $G_3$ 。

构造应力环境  $S$ :仙女山活动断裂由北至南分为 3 段,北段断裂力学性质在新生代发生改变,呈压扭性特征,属于斜向逆冲断层,所以划为  $S_1$ <sup>[22-24]</sup>,其余两段以张扭性为主,划为  $S_3$ <sup>[14]</sup>;九畹溪断裂应力状态目前表现为张性,属于正断层,划分为  $S_2$ <sup>[25]</sup>;高桥断裂和牛口断裂以张扭为主,属于走滑断层,划分为  $S_3$ <sup>[26]</sup>;其余地区划分为  $S_3$ <sup>[17-19,21,26]</sup>。

断层活动性  $F$ :历史上 2001 年 12 月 13 日秭归与兴山交界处  $M_s4.1$ 、1972 年 3 月 13 日秭归县  $M_s3.6$ 、1979 年 5 月 22 日龙会关  $M_s5.1$  地震与仙女山断层、九畹溪断层、高桥断裂和牛口断裂存在关联<sup>[27-28]</sup>,因此将这几个断裂的活动性按  $F_1$ (活动)计算<sup>[14,29]</sup>;水田坝断裂和马鹿池断裂按  $F_2$ (不活动)计算<sup>[19-30]</sup>。

岩溶发育程度  $SK$ :高桥断裂、马鹿池断裂南部、高桥断裂西侧、炮台山北部和东瀼口地区岩溶发育强烈,划分为  $SK_1$ <sup>[14,17,19]</sup>;香溪河口附近岩溶较为发育,划分为  $SK_2$ <sup>[25]</sup>;仙女山断裂西侧区域存在岩溶发育区域,同样划分为  $SK_2$ <sup>[31-32]</sup>;其余地区划分为  $SK_3$ <sup>[19]</sup>。

库水透水深度  $FD$ :仙女山断裂的断层倾角大,附近为碳酸盐岩,有利于库水向深层渗透,划分为  $FD_1$ ;九畹溪断裂横跨长江,与库水存在直接联系,加之该区域的碳酸盐岩有利于库水渗透,所以同样划分为  $FD_1$ ;高桥断裂近库岸段、牛口断裂近库岸段和水田坝断裂断层,依据前人研究结果<sup>[20,27]</sup>划分为  $FD_2$ ;秭归至巴东地区库岸附近(2 km 范围),岩性以碳酸岩盐和砾岩为主,划分为  $FD_2$ ;其余地区为  $FD_3$ <sup>[20,22]</sup>。

与库水沟通关系  $FC$ :九畹溪断裂带横跨长江,与库水存在直接联系,划分为  $FC_1$ ;水田坝断裂带近库岸段和高桥断裂近库岸段,有长江支流流过,划分为  $FC_1$ ;库岸附近(2 km 范围)也划分为  $FC_1$ ;香溪河东段灰岩区和巴东库岸灰岩地区距离库岸 2 km 以外,但主要为碳酸盐岩区,划分为  $FC_2$ ;仙女山断裂北端地表附近无大型支流,但考虑到其距离

库岸较近且北端附近为碳酸岩盐,也划分为  $FC_2$ ;其余地区距离库岸较远,划分为  $FC_3$ <sup>[20,27,31]</sup>。

地震活动背景  $B$ :研究区整体地震背景为弱震环境,但 1975 年 5 月 22 日龙会观发生  $M_s5.1$  地震<sup>[33]</sup>,2001 年 12 月 13 日秭归与兴山交界一带发生  $M_s4.1$  地震<sup>[24]</sup>,故将历史上发生  $M_s4.0$  以上地震的区域定义为  $B_2$ ,其余地区为  $B_3$ 。

## 4 统计预测模型预测结果

结合表 2 数据,用式(1)计算得出研究区 175 m 蓄水时期不发震( $M_0$ )、微震( $M_1 < 3.0$ )、弱震( $4.5 > M_2 \geq 3.0$ )、中强震( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ )和强震( $M_4 \geq 6.0$ )的诱发概率,如图 3 所示。

### 4.1 研究区不发震预测结果

由图 3(a)可知,断裂带及库岸附近(碳酸盐岩区)不发震概率远低于其他区域。其中,仙女山断裂北端区域尤为明显,不发震的概率为 30%~32%;巴东高桥—牛口断裂近库岸段以及库岸附近不发震的概率为 47%~69%,且越靠近断裂带概率值越低;坝址区、远离库岸区域不发震的概率为 94%~99%。图 3(a)中,175 m 蓄水阶段地震主要分布于库岸及断裂带附近,仙女山断裂北端和高桥—牛口断裂近库岸段地震最为集中,地震分布情况与预测结果高度一致。

### 4.2 研究区发震预测结果

诱发微震( $M_1 < 3.0$ )的预测结果如图 3(b)所示。仙女山断裂北端、九畹溪断裂上盘以及东瀼口岩溶地区诱发微震概率最为显著,概率值分别为 38%~42%、25%~38%、32%~45%;巴东碳酸盐岩库岸附近为 8%~30%;高桥断裂近库岸段为 10%~17%;牛口断裂近库岸段为 14%~24%。

诱发弱震( $4.5 > M_2 \geq 3.0$ )的预测结果如图 3(c)所示。仙女山断裂北端诱发弱震概率最为显著,概率值为 12%~20%;九畹溪断裂上盘靠近断裂附近为 5%~20%;高桥断裂近库岸段为 4%~10%;东瀼口附近为 1.5%~9%。

诱发中强震( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ )的预测结果如图 3(d)所示。断裂带近库岸段附近诱发中强震的概率最为显著。其中,仙女山断裂北端为 10%~15%;九畹溪断裂上盘为 4%~15%;高桥断裂近库岸段为 12%~27%;牛口断裂近库岸段为 12%~36%。

根据统计预测模型的结果,得出三峡工程水库地震重点监视区诱发强震( $M_4 \geq 6.0$ )的概率值为 0。

表2 诱震因子不同状态发震先验概率统计<sup>[7-12]</sup>

诱震因子	状态	发震先验概率				
		强震 ( $M_4 \geq 6.0$ )	中强震 ( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ )	弱震 ( $4.5 > M_2 \geq 3.0$ )	微震 ( $M_1 < 3.0$ )	不发震 ( $M_0$ )
库水深度 $D$	$D_1$	0.00	0.22	0.46	0.36	0.18
	$D_2$	1.00	0.70	0.46	0.54	0.60
	$D_3$	0.00	0.08	0.08	0.10	0.22
库区岩性条件 $G$	$G_1$	0.70	0.48	0.46	0.21	0.48
	$G_2$	0.05	0.10	0.15	0.47	0.36
	$G_3$	0.25	0.42	0.39	0.32	0.16
构造应力环境 $S$	$S_1$	0.00	0.10	0.23	0.32	0.17
	$S_2$	0.40	0.41	0.62	0.50	0.68
	$S_3$	0.60	0.49	0.15	0.18	0.15
断层活动性 $F$	$F_1$	0.90	0.70	0.38	0.21	0.10
	$F_2$	0.10	0.30	0.62	0.79	0.90
岩溶发育程度 $SK$	$SK_1$	1.00	0.42	0.55	0.50	0.16
	$SK_2$	0.00	0.33	0.35	0.17	0.34
	$SK_3$	0.00	0.25	0.10	0.33	0.50
库水透水深度 $FD$	$FD_1$	0.75	0.60	0.57	0.31	0.21
	$FD_2$	0.20	0.30	0.38	0.50	0.28
	$FD_3$	0.05	0.10	0.05	0.19	0.51
与库水沟通关系 $FC$	$FC_1$	0.80	0.80	0.69	0.61	0.38
	$FC_2$	0.10	0.10	0.23	0.29	0.31
	$FC_3$	0.10	0.10	0.08	0.10	0.31
地震活动背景 $B$	$B_1$	0.25	0.20	0.31	0.21	0.24
	$B_2$	0.25	0.40	0.46	0.53	0.47
	$B_3$	0.50	0.40	0.23	0.26	0.29

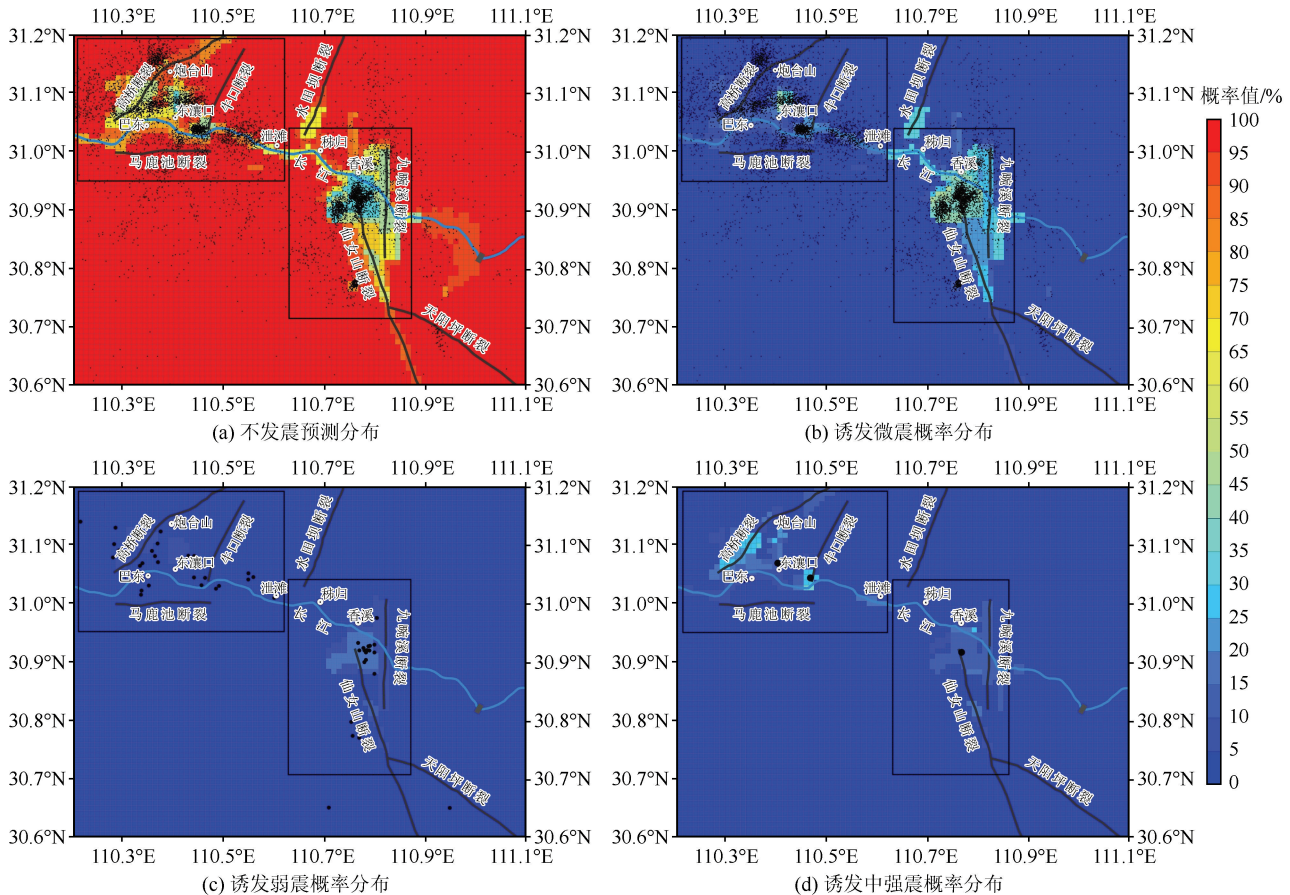


图3 三峡工程水库重点监视区预测结果分布图

Fig.3 Distribution of predicted results in key monitoring areas of Three Gorges Reservoir

图 3 中黑色点表示对应等级地震的实际分布情况。如图 3(b)所示,实际上微震主要分布于仙女山断裂北端、牛口断裂近库岸段以及巴东库段的碳酸盐岩地区,其中绝大多数微震都对应于微震高概率值预测区域。如图 3(c)所示,弱震主要分布于仙女山断裂北端及高桥—牛口—马鹿池断裂所围成区域,其中仙女山断裂北端的弱震分布最为集中;秭归库段弱震对应于弱震高概率值区域;巴东库段仅高桥断裂近库岸段及东瀼口的弱震对应于弱震高概率值预测区域,其余地区地震主要对应于弱震低概率预测区域。如图 3(d)所示,中强震分布于仙女山断裂北端、巴东东瀼口地区以及牛口断裂近库岸段,且都对应于中强震高概率值预测区域。研究区自 175 m 蓄水以来未发生大于 6.0 级的地震,因此强震预测结果与实际发震情况一致。相较于前人关于三峡水库地震的预测结果<sup>[28]</sup>,本研究结果与实际地震对

应较好,尤其是  $M > 4.0$  的中强震预测结果与实际地震情况高度一致。

## 5 检验与讨论

根据预测模型得出的不同等级地震的概率分布情况(图 3),将三峡工程水库地震重点监视区划分为 8 个比较典型的区域,并整理得到不同区域可能发生地震的震级及相应的概率区间(表 3)。结合图 3 和表 3 可知,研究区不发震和诱发微震的概率较大,但仙女山断裂北端、高桥断裂近库岸段和牛口断裂近库岸段存在诱发中强震( $6.0 > M_3 \geq 4.5$ )的可能,其概率值依次为 10%~15%、12%~27%、12%~36%。同时,以碳酸盐岩为主的库岸附近诱发地震的概率远高于其他地区,且越靠近断裂带概率值越高[图 3(b)~(d)]。大坝区、远离库岸区域不发震概率远大于其他地区。

表 3 典型区域预测结果

Table 3 Prediction results of typical areas

重点预测地区	发震概率/%				
	$M_4 \geq 6.0$	$6.0 > M_3 \geq 4.5$	$4.5 > M_2 \geq 3.0$	$M_1 < 3.0$	$M_0$ (不发震)
秭归仙女山断裂北端	0	10~15	12~20	38~42	30~32
秭归九畹溪断裂上盘	0	4~15	5~20	25~38	45~65
巴东牛口断裂近库岸段	0	12~36	1~3	14~24	47~66
巴东高桥断裂近库岸段	0	12~27	4~10	10~17	55~69
巴东东瀼口地区	0	0.3~2	1.5~9	32~45	58~71
巴东碳酸盐库岸附近	0	0~2	0~2	8~30	66~82
大坝区	0	0~1.7	0~0.6	0~3	94~95
远离库岸区域	0	0~0.07	0~0.06	1~2	98~99

根据预测结果可知,库岸以及断裂带近库岸段区域的发震概率要远高于其他区域。这是由于三峡工程水库地震重点监视区蓄水前处于低应变状态<sup>[18]</sup>,在蓄水前期(数年时间尺度),水库蓄水有助于改变其应力平衡状态<sup>[13]</sup>。

(1) 秭归仙女山断裂北端、九畹溪断裂上盘、巴东牛口断裂近库岸段和高桥断裂近库岸段属于断层尖端,存在大量的次裂缝或微裂缝,而且这 4 条断层尖端附近岩性以透水性较强的碳酸盐岩和砾岩为主,为库水下渗提供了有利通道。同时,库水的持续重力作用以及蓄水附加的拉伸应力进一步加强了岩石裂缝被扩展并连通的可能,使得水随裂缝向下扩散、渗透,造成地下的孔隙压力增大,岩石和断层强度降低,从而引发地震活动<sup>[34-35]</sup>。

(2) 巴东东瀼口地区和碳酸盐库岸区域岩溶发育较为强烈,库水周期性卸荷以及库水的渗透作用致使岩石孔隙压力增大,破坏了原有岩体的应力平衡状态,造成局部岩体失稳,使岩石和裂隙面的有效

应力和剪切应力降低,引起岩溶、矿洞坍塌、裂隙错动以及库岸边坡滑动,从而诱发浅表卸荷型地震<sup>[4,14,16,36]</sup>。

(3) 大坝区属于花岗岩区域,附近无活动断裂存在,且区域应力状态表现为挤压,物质坚实,不易被库水侵蚀<sup>[13]</sup>,所以该区域发震概率低。

(4) 远离库岸区无活动断裂存在,且距离库岸足够远,几乎不受库水影响,所以诱发地震的概率远低于近库岸区。

因此,三峡重点监视区的地震活动主要分布于以碳酸盐岩为主的库岸区和断裂带近库岸段附近,且主要以微震为主,大坝及远离库岸区基本不发震。

上述从物理机制层面展开的解释,进一步佐证了预测结果的合理性,即断裂带的近库岸段附近,诱发弱震、中强震的概率要远高于其他区域。这些地震可能受区域构造应力控制,主要释放的是构造应变能。一方面,断裂带近库岸段(断层尖端)属于应力集中区域。研究表明,三峡工程蓄水前(二十世纪



六七十年代)几次较大的地震与仙女山断裂、高桥断裂、牛口断裂密切相关<sup>[18,27-28,33]</sup>,这表明这些断裂附近原本就具备发生弱震和中强震的条件。另一方面,在三峡工程蓄水后,库水的长期渗透以及库水对岩石的软化、弱化作用致使断层面的抗剪强度降低,加之蓄水引起的库水荷载增强,造成裂缝或断层面所承受的应力超过其强度,致使处于应力临界状态的断层突然被触发活动,从而使断裂带所积累的应力提前释放,最终触发弱震及中强震活动<sup>[37-38]</sup>。

从2008年三峡水库175 m蓄水至今,其重点监视区断层尖端附近发生多次 $M > 4.0$ 构造触发型水库地震<sup>[19,35,39-41]</sup>。自蓄水以来,牛口断裂近库岸段绝大多数地震活动属于2017—2018年4次 $M > 4.0$ 构造触发型水库地震的余震<sup>[34]</sup>。东瀼口地震在2013年之前主要为岩溶塌陷地震,之后则主要为2013年12月 $M_s 5.1$ 构造触发型水库地震的余震<sup>[17]</sup>。其中,东瀼口塌陷地震可能影响了高桥断裂和牛口断裂的稳定性,使得它们无法持续、稳定地积累应力。岩溶地区发生大量地震活动后,区域应力逐渐趋于平衡状态,地震活动明显减弱,因此,断裂带受塌陷地震的影响程度显著降低,能够积累更多的应力。最终,当断裂带上积累的应力达到临界状态时,再受到库水的“触发”,就可能引发中强震活动。这一过程可能解释了为什么巴东地区高桥—牛口断裂近库岸段中强震发生概率明显高于弱震。

通过以上分析可知,应用贝叶斯概率统计模型预测的三峡重点监视区诱发地震的结果,与研究区实际发震情况吻合度较高,并且可以运用物理机制对其进行合理解释。这表明本文预测结果对三峡重点监视区的地震灾害防范具有一定的指导意义,同样表明该模型具有较强的适用性和推广价值。

## 6 结论

本研究通过贝叶斯概率统计预测模型对三峡工程水库地震重点监视区的水库地震进行预测分析,得出如下结论:

(1) 在重点监视区,以碳酸盐岩为主的库岸附近区域诱发地震的概率要远高于其他地区。其中,仙女山断裂北端、高桥断裂以及牛口断裂近库岸段存在诱发中强震( $6.0 > M_s \geq 4.5$ )的可能;三峡坝址区和远离库岸区域不发生地震的概率极高。

(2) 采用长江三峡水库175 m蓄水以来实际地震情况对预测模型进行检验,结果表明实际地震的发生地点及震级与预测结果具有很好的一致性,并

尝试从地震成因机制上对预测结果的合理性进行了解释。

(3) 相较于前人关于三峡水库地震的预测结果,本研究结果与实际地震情况对应较好,尤其是 $M > 4.0$ 的中强震预测结果与实际地震情况高度一致,表明采用精细划分方式的贝叶斯概率统计预测方法在水库诱发地震危险性评定方面具有很好的效果。因此,为了减轻地震灾害的影响,有必要加强对库岸附近及断裂带近库岸段区域的监测和防范。

**致谢:**湖北省地震局为本文研究提供了三峡工程水库地震重点监视区的地震目录数据,在此表示衷心的感谢!

## 参考文献(References)

- [1] 常廷改,胡晓.水库诱发地震研究进展[J].水利学报,2018,49(9):1109-1122.  
CHANG Tinggai, HU Xiao. Research progress on reservoir induced earthquake[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2018, 49(9):1109-1122.
- [2] 夏其发,汪雍熙,李敏等.乌溪江水库地震的地震地质背景[J].地震地质,1986,8(3):33-43.  
XIA Qifa, WANG Yongxi, LI Min, et al. Seismogeological background of the Wuxijiang reservoir-induced earthquakes [J]. Seismology and Geology, 1986, 8(3):33-43.
- [3] 杨清源,陈献程,胡毓良,等.应用灰色聚类法预测长江三峡工程水库诱发地震的最大震级[J].华南地震,1996,16(2):75-79.  
YANG Qingyuan, CHEN Xiancheng, HU Yuliang, et al. Forecast the maximum magnitude of induced reservoir earthquake on the Sanxia Project of Yangtze River using grey cluster method[J]. South China Journal of Seismology, 1996, 16(2):75-79.
- [4] 马文涛,徐锡伟,于贵华,等.使用灰色聚类方法评估长江三峡水库湖北不同库段水库诱发地震的震级上限[J].地震地质,2012,34(4):726-738.  
MA Wentao, XU Xiwei, YU Guihua, et al. Assess the reservoir-induced seismic hazard in the Hubei section of the Three Gorges Reservoir using gray clustering method[J]. Seismology and Geology, 2012, 34(4):726-738.
- [5] 周斌.水库诱发地震时空演化特征及其动态响应机制研究[D].北京:中国地震局地质研究所,2010.  
ZHOU Bin. Study on temporal and spatial evolution characteristics and dynamic response mechanism of reservoir-induced earthquakes[D]. Beijing: Institute of Geology, CEA, 2010.
- [6] BAECHE G B, KEENEY R L. Statistical examination of reservoir-induced seismicity[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 1982, 72(2):553-569.
- [7] 余松,吴建超,蔡永建.统计预测模型在汉江孤山水电站水库诱发地震中的应用[J].水利水电技术,2019,50(10):91-97.  
YU Song, WU Jianchao, CAI Yongjian. Application of statistical prediction model to prediction of reservoir-induced earth-



- quake from Gushan hydropower station of Han River[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2019, 50(10): 91-97.
- [8] 常宝琦,梁纪彬.水库“规模”与水库地震震级的关系[J].华南地震,1987,7(1):94-99.  
CHANG Baoqi, LIANG Jibin. Correlation between “scale” of reservoir and magnitude of reservoir-induced earthquakes[J]. South China Journal of Seismology, 1987, 7(1): 94-99.
- [9] 许强,黄润秋.用神经网络理论预测水库诱发地震[J].中国地质灾害与防治学报,1996,7(3):10-17.  
XU Qiang, HUANG Runqiu. The prediction of reservoir-induced seismicity using artificial neural network[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1996, 7(3): 10-17.
- [10] 丁原章.水库诱发地震[M].北京:地震出版社,1989.  
DING Yuanzhang. The reservoir induced earthquake[M]. Beijing: Seismological Press, 1989.
- [11] 陈献程,杨清源.重庆巴山水电站水库诱发地震的初步评价[J].华南地震,2004,24(1):44-50.  
CHEN Xiancheng, YANG Qingyuan. Preliminary evaluation of induced earthquakes in the Reservoir of Bashan hydropower station in Chongqing[J]. South China Journal of Seismology, 2004, 24(1): 44-50.
- [12] 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.  
YANG Qingyuan, HU Yuliang, CHEN Xiancheng, et al. Catalogue of reservoir induced seismic events in the world[J]. Seismology and Geology, 1996, 18(4): 453-461.
- [13] 孟庆筱,姚运生,廖武林,等.三峡蓄水进程中库首区地震活动与库水位的关联性研究[J].大地测量与地球动力学,2021,41(7):714-720.  
MENG Qingxiao, YAO Yunsheng, LIAO Wulin, et al. Analysis of the cross-correlation between seismicity and water level at the head area of the Three Gorges Reservoir in the impoundment process[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2021, 41(7): 714-720.
- [14] 王秋良,张丽芬,廖武林,等.三峡库首区断裂构造与地震活动特征[J].大地测量与地球动力学,2013,33(5):29-33.  
WANG Qiuliang, ZHANG Lifan, LIAO Wulin, et al. Fault tectonics and seismic activity characteristics of Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2013, 33(5): 29-33.
- [15] YAO Y S, WANG Q L, LIAO W L, et al. Influences of the Three Gorges Project on seismic activities in the reservoir area[J]. Science Bulletin, 2017, 62(15): 1089-1098.
- [16] ZHANG L F, LI J G, SUN X D, et al. A possible mechanism of reservoir-induced earthquakes in the Three Gorges Reservoir, Central China[J]. Bulletin of the Seismological Society of America, 2018, 108(5B): 3016-3028.
- [17] ZHANG L, LEI X, LIAO W, et al. Statistical parameters of seismicity induced by the impoundment of the Three Gorges Reservoir, Central China[J]. Tectonophysics, 2019, 751: 13-22.
- [18] 袁登维,梅应堂,秦兴黎,等.长江三峡工程坝区及外围地壳稳定性研究[M].武汉:中国地质大学出版社,1996.  
YUAN Dengwei, MEI Yingtang, QIN Xingli, et al. Study on the crust stability in the Three Gorges Project dam site and its surrounding areas[M]. Wuhan: China University of Geosciences Press, 1996.
- [19] 夏金梧.水库诱发地震评价理论与实践[M].武汉:长江出版社,2020.  
XIA Jinwu. Theory and practice of reservoir induced earthquake evaluation[M]. Wuhan: Changjiang Press, 2020.
- [20] 王秋良,姚运生,夏金梧,等.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,2009,31(2):287-294.  
WANG Qiuliang, YAO Yunsheng, XIA Jinwu, et al. Application of statistical forecasting model to the prediction of the Three Gorges Reservoir induced seismicity [J]. Seismology and Geology, 2009, 31(2): 287-294.
- [21] 苏锦星,夏其发,汪雍熙,等.大藤峡水库诱发地震初步预测[J].中国地质灾害与防治学报,1993,4(4):44-53.  
SU Jinxing, XIA Qifa, WANG Yongxi, et al. Preliminary prediction on Datengxia reservoir induced seismicity[J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(4): 44-53.
- [22] 何超枫,张春光,王秋良,等.仙女山—九畹溪断裂带断层泥石英微形貌特征及其年代学意义[J].大地测量与地球动力学,2017,37(4):355-360.  
HE Chaofeng, ZHANG Chunguang, WANG Qiuliang, et al. Micro-morphology characteristics and dating implications of the gouge quartz of Xiannüshan—Jiuwanxi fault[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2017, 37(4): 355-360.
- [23] 刘锁旺,甘家思,薛宏交.长江三峡地区的构造应力场与地震活动[J].地震地质,1983,5(1):29-41.  
LIU Suowang, GAN Jiasi, XUE Hongjiao. Tectonic stress field and seismicity in the Yangtze Three Gorges area[J]. Seismology and Geology, 1983, 5(1): 29-41.
- [24] 杨森楠,李江风,韦必则,等.长江三峡坝区断裂构造的形成和演变的最新研究[J].地质科技情报,1996,15(4):73-80.  
YANG Sennan, LI Jiangfeng, WEI Bize, et al. New study of formation and evolution for the structures in the dam area of the Yangtze Three Gorges[J]. Geological Science and Technology Information, 1996, 15(4): 73-80.
- [25] 路永强.三峡库区湖北段水库地震规律性研究及趋势预测[D].宜昌:三峡大学,2021.  
LU Yongqiang. Study on earthquake regularity and trend prediction of reservoirs in Hubei section of Three Gorges Reservoir area[D]. Yichang: China Three Gorges University, 2021.
- [26] 陈蜀俊,姚运生,蔡永建.三峡库首区重点断裂围限区蓄水的加卸载效应[J].大地测量与地球动力学,2006,26(4):97-101.  
CHEN Shujun, YAO Yunsheng, CAI Yongjian. Loading and unloading effect of Three Gorges Reservoir impounding on area defined by main faults of head area[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2006, 26(4): 97-101.

- [27] 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[M]//中国地震年鉴(2001).北京:地震出版社,2002:180.  
SHI Ying, HE Yufang. The M<sub>4.1</sub> earthquake at the junction of Zigui and Xingshan, Hubei Province, on December 13, 2001 [M]// China Earthquake Yearbook (2001). Beijing: Seismological Press, 2002: 180.
- [28] 《中国地震年鉴》编辑部.中国地震年鉴(2001)[M].北京:地震出版社,2002.  
Editorial Department of *China Earthquake Yearbook*. China earthquake yearbook(2001)[M]. Beijing: Seismological Press, 2002.
- [29] 夏金梧,李长安,王旭.神经网络在三峡水库诱发地震预测中的应用[J].人民长江,2007,38(2):8-10.  
XIA Jinwu, LI Chang'an, WANG Xu. Application of neural network theory in prediction of earthquake induced by TGP reservoir[J]. Yangtze River, 2007, 38(2): 8-10.
- [30] 涂光美,刘世凯,熊友平.三峡水田坝断裂构造特征及其活动性研究[J].湖北地质,1996(2):103-112.  
TU Guangmei, LIU Shikai, XIONG Youping. Structural features mobility Shuitianba fault in the Three Gorges area[J]. Hubei Geology, 1996(2): 103-112.
- [31] 罗明明,周宏,陈植华.香溪河流域岩溶水循环规律[M].北京:科学出版社,2018:23-43.  
LUO Mingming, ZHOU Hong, CHEN Zhihua. Karst water cycling features in Xiangxi River Basin [M]. Beijing: Science Press, 2018: 23-43.
- [32] 董建辉,叶浩,徐玉聪,等.长江三峡库区秭归杨林桥镇震群成因[J].地震地磁观测与研究,2017,38(6):34-40.  
DONG Jianhui, YE Hao, XU Yucong, et al. The genesis of the Yanglinqiao small earthquake swarm, Zigui, Three Gorges Reservoir region[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2017, 38(6): 34-40.
- [33] 李琰,李愿军,杨美娥.长江三峡库区水库诱发地震的研究[J].中国工程科学,2005,7(6):14-20.  
LI Ping, LI Yuanjun, YANG Meie. A study of reservoir-induced earthquake in the Three Gorges area[J]. Strategic Study of CAE, 2005, 7(6): 14-20.
- [34] 梁青槐,高士钧,曾心传.水库诱发地震机制研究[J].华南地震,1995,15(1):74-77.  
LIANG Qinghuai, GAO Shijun, ZENG Xinchuan. Research on the mechanism of reservoir-induced earthquake[J]. South China Journal of Seismology, 1995, 15(1): 74-77.
- [35] 吴海波,王杰,邹正波,等.三峡库区秭归与巴东交界 M<sub>s</sub>4.0 地震矩张量及应力环境研究[J].地球物理学报,2021,64(2):484-497.  
WU Haibo, WANG Jie, ZOU Zhengbo, et al. 2021. Moment tensors and the stress environment of M<sub>s</sub>4.0 earthquakes in the junction area between Zigui and Badong, Three Gorges Reservoir[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2021, 64(2): 484-497.
- [36] 陈蜀俊,苏爱军,罗登贵.长江三峡水库诱发地震的成因类型[J].大地测量与地球动力学,2004,24(2):70-73.  
CHEN Shujun, SU Aijun, LUO Denggui. Genesis and type of induced earthquake in Three Gorges Reservoir[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2004, 24(2): 70-73.
- [37] TALWANI P, ACREE S. Pore pressure diffusion and the mechanism of reservoir-induced seismicity[J]. Pure and Applied Geophysics, 1984, 122(6): 947-965.
- [38] 蒋海昆,宋金,贾若,等.不同时期水库地震活动主要影响因素讨论:以三峡库区微震活动为例[J].地震,2014,34(1):13-23.  
JIANG Haikun, SONG Jin, JIA Ruo, et al. On the major influencing factors of reservoir-related seismicity in different stages: the case of the Three Gorges Reservoir[J]. Earthquake, 2014, 34(1): 13-23.
- [39] 车用太,陈俊华,张莉芬,等.长江三峡工程库首区胡家坪 M<sub>s</sub>4.1 水库诱发地震研究[J].地震,2009,29(4):1-13.  
CHE Yongtai, CHEN Junhua, ZHANG Lifan, et al. Study of the reservoir-induced Hujiaping M<sub>s</sub>4.1 earthquake in the Three Gorges dam area[J]. Earthquake, 2009, 29(4): 1-13.
- [40] 陈蜀俊,姚运生,吴建超,等.巴东 M<sub>s</sub>5.1 地震:一种新的水库地震类型[J].大地测量与地球动力学,2014,34(3):1-5.  
CHEN Shujun, YAO Yunsheng, WU Jianchao, et al. Badong M<sub>s</sub>5.1 earthquake: a new type of reservoir earthquake[J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2014, 34(3): 1-5.
- [41] 王秋良,张丽芬,廖武林,等.2014年3月湖北省秭归县 M<sub>4.2</sub>、M<sub>4.5</sub> 地震成因分析[J].地震地质,2016,38(1):121-130.  
WANG Qiuliang, ZHANG Lifan, LIAO Wulin, et al. Research on genesis of M<sub>4.2</sub> and M<sub>4.5</sub> earthquake sequences in March 2014 in Zigui County, Hubei Province[J]. Seismology and Geology, 2016, 38(1): 121-130.

(本文编辑:赵乘程)