

重庆三江口水库诱发地震分析研究^①

吴建超^{1,2}, 张丽芬¹, 汪旭涛^{1,2}, 蔡永建²

(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:通过野外地震地质调查并参考前人研究成果,分析三江口水库区的地质构造背景、地震活动性及水文地质条件等资料,对该水库诱发地震的可能性进行分析。构造类比法分析表明:蓄水后发生构造型水库诱发地震的可能性较小,但有可能发生岩溶塌陷型水库诱发地震。概率预测法分析表明:库首段(新滩子—狮狸弯)发震概率较小,仅为 0.02;库中段(狮狸弯—牛鼻子)岩溶不太发育,诱震可能性较小,不发震的概率为 0.96;库尾段(牛鼻子—峡马口)有可能诱发微震,发震($M < 3.0$)概率为 0.10。

关键词:三江口水库;构造类比法;概率预测法;水库诱发地震;发震概率

中图分类号: P315

文献标志码: A

文章编号: 1000-0844(2015)02-0512-06

DOI:10.3969/j.issn.1000-0844.2015.02.0512

Reservoir-induced Earthquakes for the Sanjiangkou Reservoir in Chongqing

WU Jian-chao^{1,2}, ZHANG Li-fen¹, WANG Xu-tao^{1,2}, CAI Yong-jian²

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

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

Abstract: Based on field investigations and previous research results, this study analyzes the tectonic background, seismic activity, and hydrogeology condition of the Sanjiangkou reservoir area. The Yushan fault is the main fault located in the southeast margin of the Sanjiangkou reservoir area. The other major fault is termed the Mawu fault, which is exposed in the west margin of the Sanjiangkou reservoir area. The active age of the Yushan fault is mid-Pleistocene and the Mawu fault is pre-Quaternary. The level of historic and current seismicity is low in the reservoir area. Employing structural analogy and probabilistic statistic methods, the probability of the induced earthquake in the Sanjiangkou reservoir area is discussed. These results are used to compare the Sanjiangkou reservoir with other reservoirs that have experienced earthquakes. The structural analogy method analysis showed that the possibility of tectonic-type reservoir-induced earthquakes is small following impoundment. However, there is the possibility of a karst subsidence-type reservoir-induced earthquake. This event could occur because of the existence of a large amount of thick layers of limestone in the reservoir area that could foster karst development. The loading and infiltration effects of water may easily cause rock collapse and crack propagation in the karst cave. This would induce a karst subsidence-type reservoir-induced earthquake. Considering the conditions of the Sanjiangkou reservoir area eight induced earthquake factors were selected to conduct the probabilistic prediction of the earthquake magnitude. These factors were reservoir

① 收稿日期: 2014-06-19

基金项目: 中国长江三峡集团公司科研专项基金(SXSN/3354)

作者简介: 吴建超(1985—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事地震工程和水库诱发地震研究. E-mail: jianchao85@gmail.com

water depth,lithology,regional state of stress,fault activity,degree of karst development,fault permeable depth,communication with the reservoir water,and seismic activity background.Based on the geological conditions and induced earthquake environment of the Sanjiangkou reservoir area,the reservoir area was divided into three segments: the head (Xintanzi—Shiliwan),middle (Shiliwan—Niubizi),and end (Niubizi—Xiamakou) regions.Using the MATLAB software programming,the probability of five earthquake magnitude was calculated for the three segments. The larger earthquake magnitude grading range was selected that corresponded to the relative probability value.The grading range was considered as the possible earthquake magnitude.The probabilistic statistic method analysis showed that the reservoir’s head region (Xintanzi—Shiliwan) had a small possibility of an induced earthquake with a possibility of earthquake occurrence of 0.02. The reservoir’s middle region (Shiliwan—Niubizi),where the karst development is unlikely,had a possibility of induced earthquake of 0.96.The end region (Niubizi—Xiamakou) may induce microseismic activity with the possibility of induced $M_L(M < 3.0)$ of 0.10.

Key words: the Sanjiangkou reservoir; structural analogy method; probabilistic statistic method; reservoir-induced earthquake; possibility of earthquake occurrence

0 引言

三江口水库坝址位于重庆市彭水县普子河中下游段的新滩子附近,水库正常蓄水位 306 m,库容 $0.68\times10^8\text{ m}^3$ 。大坝为混凝土重力坝,坝高 71.5 m,坝顶长 218.4 m,装机容量 18.9 MW,属 III 型中等峡谷型水库。

水库蓄水导致库区地震活动增多,这已被国内外大量研究所证实^[1-4]。水库诱发地震会对工程设施和居民生产生活产生不同程度的破坏和影响。三江口水库于 2008 年开始设计论证,水库蓄水后能否诱发地震、地震对库区环境的影响等与水库所处的地震构造环境有密切关系。本文在分析三江口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 库区地质背景

1.1 地质构造

三江口水库在大地构造上位于扬子准地台上扬子台褶带黔江拱褶断束内,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^[5]。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。水库坝址位于普子复向斜东南翼,库区及外围 NE-NNE 向褶皱和断裂呈有规律的分布,构成了库区内的基本构造格局。

库区出露的断裂主要为东南缘的郁山断裂,其

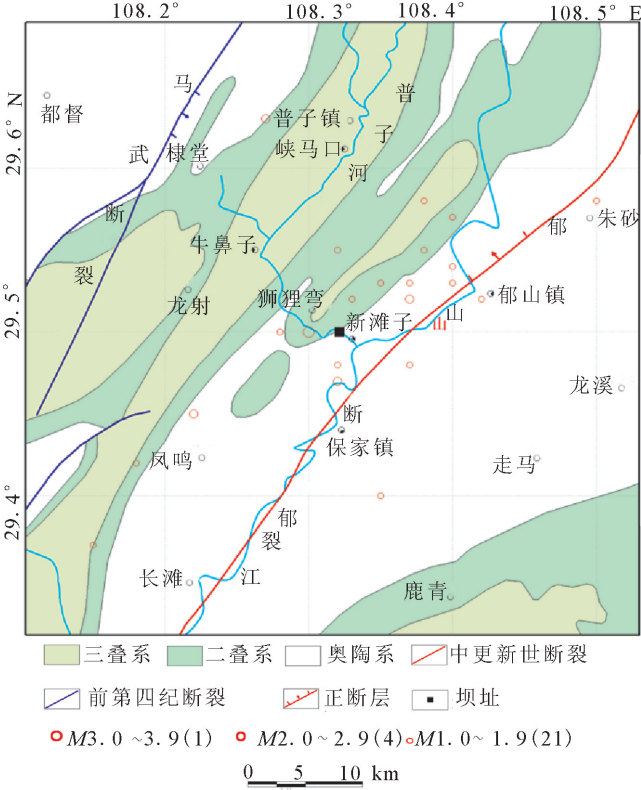


图 1 三江口水库区地震构造图
Fig.1 Seismotectonic map of Sanjiangkou reservoir area

次为西缘的马武断裂(图 1、表 1)。其中,郁山断裂发育在郁山背斜西北翼下奥陶统南津关组中,地貌上多呈现洼地、断层崖、垭口。断层带由断层角砾岩、碎裂岩组成,胶结较紧密,断层面不平整,略粗糙,未见有擦痕。断裂活动具有垂直分量,为正断

层。断裂南北两段的测年数据(TL 法和 ESR 法)集中在 $30\sim 50\times 10^4$ a,表明该断裂最新活动时代为中更新世中期,晚更新世以来没有活动的迹象。马武断裂为前第四纪断裂。

表 1 三江口水库区主要断裂概况

Table 1 Main faults in Sanjiangkou reservoir area					
断裂编号	断裂名称	产状	长度/km	性质	活动时代
F ₁	郁山断裂	18°~40°/NW∠65°	55	正断	Q ₂
F ₂	马武断裂	10°~35°/SE∠66°	30	正断	AnQ

1.2 地层岩性

水库区出露的地层比较简单,主要为奥陶系、二叠系和三叠系地层。第四系零星发育在冲沟沟口、支流与干流汇合处、高陡岸坡脚和河流阶地上。奥陶系主要分布于普子复向斜西北翼和郁江背斜的核部。岩性以灰黑色薄至中层灰岩、泥质灰岩、瘤状灰岩为主,局部含燧石结核,并夹有少量褐色厚层结晶灰岩及灰绿、黄绿色页岩。二叠系地层分布于普子复向斜的两翼,岩性以深灰色生物灰岩和泥灰岩为主,顶部为含燧石条带灰岩等。三叠系地层构成了普子复向斜的核部,岩性主要为泥质灰岩、白云质灰岩和灰岩等。

1.3 地形地貌

三江口水库区以中低山和小型山间盆地地貌为主,山脉连绵,沟谷发育。库区两岸边坡高陡,地势北东高,南西低,呈阶梯状降低。普子河蜿蜒曲折,“V”型和“U”型谷相间分布。由于受地势的影响,河流由北东向南西依势而流,地貌类型多受岩性的控制。在碎屑岩分布区以侵蚀、剥蚀地貌为主,多呈脊状低中山地貌,溪沟纵横交错,相对高差 500~1 000 m,平均自然坡度在 40°~60°。而在碳酸盐岩分布地区,地形切割较强烈,多以溶蚀地貌为主,如在二叠系和三叠系等灰岩分布地区,地貌形态多以峰林谷地、峰林洼地和峰丛槽谷为主,在垂直方向上可见有明显的台阶或夷平面。

2 库区地震活动背景

三江口水库区历史和现今地震活动水平较低,近几十年来库区 20 km 范围内有 26 次小震活动(图 1)。其中,M1.0~1.9 地震 21 次,M2.0~2.9 地震 4 次,M3.0 以上地震仅有 1 次,发生于 1979 年 12 月 31 日,距三江口坝址约 2 km。这些小震、微震活动大部分分布于郁山断裂的上盘,呈现出 NE—SW 向的条带状展布特征,与本地区主要地质构造方向基本一致。

库区较大范围内的中强地震有:1855 年彭水 4¾ 级地震、1856 年咸丰 6¼ 级地震和 1931 年利川 5 级地震,距离三江口坝址分别为 31 km、50 km 和 85 km,对坝址的最大影响烈度均不超过 V 度。

3 水库诱发地震危险性分析

3.1 水文地质条件分析

水库诱发地震是复杂的科学问题,目前还处在探索过程中。根据前人的研究成果^[6],水库诱发地震的类型可分为构造型、岩溶塌陷型和应力局部调整型三类,各类水库诱发地震又各具不同的发震条件。构造型水库诱发地震多与断裂和库水的联合作用相关;岩溶型水库诱发地震多发生在大面积碳酸盐岩出露、现代岩溶作用强烈、具备向深部渗流条件的地区;应力局部调整型水库诱发地震的发震条件为河谷岸坡相对高差大、岩体微裂隙较发育、有利于库水渗透的水文地质结构面。从已知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^[7-8]。

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有 18 例,占 66%;发生在花岗岩类岩石中的有 5 例,约占 18%^[9]。岩性条件是产生水库诱发地震的直接诱因,同时也是讨论水库诱发地震的重要依据。

三江口水库区地下水类型以裂隙溶洞水为主,孔隙潜水和基岩裂隙水次之。由于溶洞、暗河、泉水、岩溶管道系统发育,裂隙溶洞水常形成地下水汇集和排泄通道,多以层状出现。由于水库区的中段和库尾段岩石性质和岩石类型略有不同,故岩溶发育程度不一。如图 2 所示,牛鼻子—峡马口一带地层为三叠系灰岩,透水性较强,溶洞、暗河和泉水等均较发育,是地表水与地下水动力联系的重要通道,也是库水向深部渗透的良好条件,有利于产生诱发地震。而在牛鼻子—狮狸弯库段,主要为二叠系地层,岩溶发育略弱,多以峰丛、槽谷、溶沟等为主,地表水与地下水联系不如前者,因此产生诱发地震的机率较小。

综上所述,三江口库区不存在活动断裂,几乎不存在发生构造型水库地震的可能。但蓄水后诱发岩溶塌陷型水库地震的可能性较大,主要集中在二叠系和三叠系碳酸盐岩大面积分布、岩溶管道发育的库段。

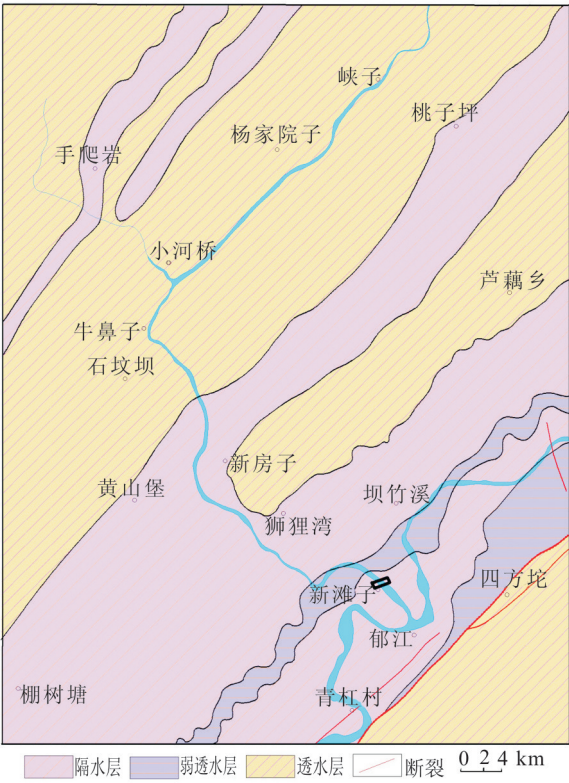


图 2 三江口水库区碳酸盐岩透水层与碎屑岩隔水层分布图

Fig.2 Distribution of the carbonate permeable layer and clastic rock impermeable layer in Sanjiangkou reservoir area

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。

在与水库规模、地质条件等相近的四川铜街子、云南鲁布革、湖北前进、湖南黄石等已发震水库进行对比后,认为三江口水库蓄水后发生构造型水库诱发地震的可能性较小。其理由是:库区没有较大的活动断裂通过,仅在库区东南缘和西北缘分布有两条非活动断裂,即郁山断裂和马武断裂。库区位于普子复向斜内,没有展布大型的地球物理异常带。本文认为水库蓄水后有可能发生岩溶塌陷型水库地震。其理由是:库区内多为中厚层灰岩出露,岩溶较发育,库区内的褶皱轴与水库区展布基本相似,容易形成地下水管流系统。蓄水后库水的荷载作用和渗透作用容易引起溶洞内岩体塌陷和裂隙扩展,进而诱发岩溶塌陷型水库地震。

3.3 概率预测分析

该方法是 Packer 和 Beacher 提出来的,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,从现有水库与诱发地震有密切关系的因素进行统计分析^[11-12]。

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一个多因子函数,将影响因子看作随机因子,真实全面地获得水库诱发地震的组合环境资料,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^[13-14]。

水库诱发地震的影响因素很多,不同的研究者所选取的诱震因子集也往往不同。考虑到三江口库区的具体条件,依据苏锦星等^[14]提出的诱震因子,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)、断层透水深度(H)、与库水沟通关系(C)和地震活动背景(E)等八个诱震因子进行震级概率预测计算(表 2)。八因子方案将预测水库地震震级分为“强、中强、弱、微、无震”5 种状态。具体为: M_4 代表强震($M \geq 6.0$), M_3 代表中强震($6.0 > M \geq 4.5$), M_2 代表弱震($4.5 > M \geq 3.0$), M_1 代表微震($M < 3.0$), M_0 代表无震(不发震)。

表 2 水库诱发地震影响因素及其状态^[13]

Table 2 Affecting factors and the state of the reservoir-induced earthquake^[3]

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
断层透水深度(H)	>2 000 m	500~2 000 m	<500 m
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	弱

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:

$$P(M_i/D,G,S,F,K,H,C,E) = \frac{P(M_i)P(D,G,S,F,K,H,C,E/M_i)}{\sum_{i=0}^4 P(M_i)P(D,G,S,F,K,H,C,E/M_i)} \quad (1)$$

式中: $P(M_i/D,G,S,F,K,C,H,E)$ 为不同震级地震类别的先验概率。根据国内外 251 座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: $P(M_4) = 0.02$; $P(M_3) = 0.04$; $P(M_2) = 0.05$; $P(M_1) = 0.07$; $P(M_0) = 0.82$ 。 $P(D,G,S,F,K,C,H,E/M_i)$ 为各影响

因素组合条件下不同震级的条件概率,即 $P(D,G,S,F,K,C,H,E/M_i)=P(D/M_i) \cdot P(G/M_i) \cdot P(S/M_i) \cdot P(F/M_i) \cdot P(K/M_i) \cdot P(H/M_i) \cdot P(C/M_i) \cdot P(E/M_i)$ 。表 3 为八项诱震因子在不同震级下的条件概率统计结果。

表 3 诱震因子不同状态发震先验概率统计表^[13]

Table 3 Statistical table of earthquake prior probability for the induced-earthquake factors under different states^[13]

诱震因子		$M_4(M \geq 6.0)$	$M_3(6.0 > M \geq 4.5)$	$M_2(4.5 > M \geq 3.0)$	$M_1(M < 3.0)$	M_0 (不发震)
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

根据三江口库区各库段诱发地震的地质构造条件和诱发地震环境,本文将库区自下游至上游划分为三段:库首段(新滩子—狮狸弯)、库中段(狮狸弯—牛鼻子)和库尾段(牛鼻子—峡马口)。利用 MATLAB 软件编程,计算得出三个库段分属五个发震震

级的概率,取其中概率值最大或较大者对应的地震震级分级区间,即为预测的可能发震强度,见表 4。

由计算结果可知,库首段(新滩子—狮狸弯)为水库诱发地震发震概率较小的库段,发震概率仅为 0.02,说明库坝区较稳定。库中段(狮狸弯—牛鼻子)虽然地表出露二叠系灰岩,但岩溶不太发育,不发震的概率为 0.96,为诱震可能性较小的地段。库尾段(牛鼻子—峡马口)虽不发震的概率约 0.83,但诱震 $M_1(M < 3.0)$ 的发震概率为 0.10,说明库尾段有可能诱发微震。

4 讨论与结论

本文采用构造类比和概率预测两种方法对三江口水库诱发地震问题进行分析研究,得出的预测结果基本一致。

库首段(新滩子—狮狸弯)的河谷地貌形态以中低山、丘陵的曲流宽谷与狭谷相间排布为特征,岸坡大多较缓,组成河谷的地层为隔水层,渗透条件不畅,且无较大断裂通过,缺乏地震活动。确定性评价认为不易发生水库诱发地震,计算不发震的概率为 0.98。

库中段(狮狸弯—牛鼻子)的基本条件与库首区相同,但库区岩性为弱透水层,局部地段岩溶发育,有利于库水渗透。确定性评价认为发生水库诱发地震的可能性较小,计算不发震的概率为 0.96。

库尾段(牛鼻子—峡马口)最显著的特征是:河谷呈狭窄的 V 型,局部为 V 型障谷、隘谷,岸坡陡峻,几近直立,三叠系灰岩中岩溶发育,溶洞、暗河地下水量较大,易于渗透。确定性评价认为。该段发生岩溶塌陷型水库地震的可能性较大。概率计算得到的诱发 $M_1(M < 3.0)$ 的发震概率为 0.10。综合评价库尾段(牛鼻子—峡马口)水库诱发地震的可能性较大,最大震级小于 3.0 级。

表 4 诱震因子状态及统计模型预测结果

Table 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
		M_4	M_3	M_2	M_1	M_0	
库首段	$D3,G2,S2,F2,K3,H2,C2,E3$	0.00	0.00	0.00	0.02	0.98	M_0
库中段	$D3,G3,S2,F2,K2,.,H2,C2,E3$	0.00	0.00	0.02	0.02	0.96	M_0
库尾段	$D3,G3,S2,F2,K1,H2,C2,E3$	0.00	0.01	0.06	0.10	0.83	M_0,M_1

水库地震诱发地震危险性评估方法有很多,如类比法、成因模式法、概率预测法、模糊数学法、灰色系统模型法、灰色聚类方法等,它们是预测水库诱发地震危险性的主要方法^[15-16]。今后应进一步采用多

种诱震预测评价方法计算成果和各种诱震因素分析,判断三江口水库在未来关键时段内的最大诱震震级。

参考文献(References)

- [1] Gupta H K. A Review of Recent Studies of Triggered Earthquakes by Artificial Water Reservoirs with Special Emphasis on Earthquakes in Koyna, India[J].Earth-Science Reviews, 2002(3):279—310.
- [2] 贺为民,秦建增,刘明军,等.小浪底水库诱发地震预测研究[J].西北地震学报,2001,23(2):164-168.
HE Wei-min, QIN Jian-zeng, LIU Ming-jun, et al. Forecast on Induced Earthquake for Xiaolangdi Reservoir[J].Northwestern Seismological Journal, 2001, 23(2):164-168. (in Chinese)
- [3] 马文涛,蔺永,范京立,等.水库诱发地震的震例比较与分析[J].地震地质,2013,35(12):914-921.
MA Wen-tao, LIN Yong, FAN Jing-li, et al. Comparison and Analysis on the Basic Features of Reservoir-induced Seismicity[J].Seismology and Geology, 2013, 35(12):914-921. (in Chinese)
- [4] 陈蜀俊.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,2005:23-37.
CHEN Shu-jun. Numerical Modeling of Tectonic Stress Field Before and After Reservoir Impounding in the Head Area of the Three Gorges and Studies on the Seismic Risk[D].Wuhan: China University of Geoscience, 2005:23-37. (in Chinese)
- [5] 潘桂棠,肖庆辉,陆松年,等.中国大地构造单元划分[J].中国地质,2009,36(1):6-13.
PAN Gui-tang, XIAO Qing-hui, LU Song-nian, et al. Subdivision of Tectonic Units in China[J].Geology in China, 2009, 36(1):6-13. (in Chinese)
- [6] 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 Qiu-liang, YAO Yun-sheng, XIA Jin-wu, 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. (in Chinese)
- [7] 贺为民,杨杰.中波水电站水库诱发地震预测研究[J].自然灾害学报,2013,22(5):105-108.
HE Wei-min, YANG Jie. Research on Forecast of Earthquake Induced by Reservoir of Zhongbo Hydropower Station[J].Journal of Natural Disasters, 2013, 22(5):105-108. (in Chinese)
- [8] 苏锦星,汪雍熙.水库诱发地震可能性的定量评价[J].工程地质学报,2000,8(增刊):70-73.
SU Jin-xing, WANG Yong-xi. Quantitative Evaluation of Reservoir Induced Earthquake Possibility[J].Journal of Engineering Geology, 2000, 8(Supp):70-73. (in Chinese)
- [9] 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 Qing-yuan, HU Yu-liang, CHEN Xian-cheng, et al. Reservoir Induced Earthquake Catalogue at Home and Abroad. [J].Seismology and Geology, 1996, 18(4):453-461. (in Chinese)
- [10] Beacher G B. Reservoir Induced Seismicity, II: Probability of Risk at Deep And/or Very Large Reservoirs[J].G S A, 1979(7):3-9.
- [11] Packer D R. Reservoir Induced Seismicity, II: Summary and Implications for Occurrence of Risk[J].G S A, 1979(7):12-18.
- [12] 吴建超,张丽芬,蔡永建,等.重庆羊头铺水库诱发地震分析研究[J].地震研究,2012,35(3):338-340.
WU Jian-chao, ZHANG Li-fen, CAI Yong-jian, et al. Research on Earthquake Induced by Yangtoupu Reservoir in Chongqing [J].Journal of Seismological Research, 2012, 35(3):338-340. (in Chinese)
- [13] 苏锦星,夏其发,汪雍熙,等.大藤峡水库诱发地震初步预测[J].中国地质灾害防治学报,1993,4(4):48-50.
SU Jin-xing, XIA Qi-fa, WANG Yong-xi, et al. Preliminary Prediction on Datengxia Reservoir Induced Seismicity[J].The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 1993, 4(4):48-50. (in Chinese)
- [14] 刘先锋,李碧雄,邓建辉,等.水库诱发地震预测方法研讨[J].地震工程学报,2014,36(1):171-176.
LIU Xian-feng, LI Bi-xiong, DENG Jian-hui, et al. Discussion on the Prediction Methods for Reservoir-induced Seismicity [J].China Earthquake Engineering Journal, 2014, 36(1):171-176. (in Chinese)
- [15] 廖建忠.诱震八因子概率统计模型法在水库诱发地震危险性概率评价中的应用[J].西北水电,2013(2):11-14.
LIAO Jian-zhong. Eight Factors Induce Earthquake Probability Statistical Model Method in the Application of Reservoir Induced Earthquake Risk Probability Assessment[J].Northwest Hydropower, 2013(2):11-14. (in Chinese)