

孔梁水库诱发地震预测研究^{*}

王建平

(河海大学 地球科学与工程系, 南京 210098)

摘要:对孔梁水库所在的巫溪地区地壳深部结构、地球物理场和构造地震特征进行了研究,认为地壳中上部强烈推覆挤压构造的应力集中,是该地区构造地震发生的动力来源,该构造也控制着水库诱发地震的分布和强度。综合多种预测方法成果并结合库区地震地质条件进行分析,认为孔梁水库诱发地震的最大震级约为4级,震中烈度为Ⅵ度,不会超出原设计水平,因而对水工建筑物没有破坏性影响,但对山区农村危房可能会造成一定的破坏。应加强地震观测和防震抗震措施的落实及宣传工作,把可能的地震损失降到最低程度,发挥水库的综合效益。

关键词:诱发地震; 机制; 预测; 孔梁水库

中图分类号: P315.75

文献标识码: A

文章编号: 1000-0666(2010)01-0019-06

0 前言

孔梁水库位于重庆市巫溪县大宁河支流茶登河次级支流小溪河上,距离巫溪县城直线距离约26 km。它是利用天然山体通过岩溶地下暗河堵头形成的。水库正常蓄水位592 m,总库容 $5\,747 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大水深154 m,是一座集防洪、灌溉、人畜饮水、发电、养殖、旅游、航运于一体的中型水利工程。工程于2001年开挖施工,2003年底试蓄水,2004年10月正式蓄水,2005年7月初开始发电并投入商业试运行,目前已经发挥出显著的社会经济效益。由于小溪河全长仅有42 km,水库上游流域面积 58.8 km^2 ,使水库来水量受到严重的限制。为了更好地发挥水库效能,有关部门还计划增加坝高30 m,将茶登河上游水源通过隧洞引水入库,使水库正常蓄水位提高到615 m,库容扩大到 $7\,700 \times 10^4 \text{ m}^3$,最大水深达到177 m。然而水库在蓄水试运行过程中,2004年6月当水位达510 m时,当地居民开始感觉不断有轻微地震发生,2004年9月重庆市地震局派出技术人员到现场监测,判定为水库地震,从而引起了各级领导和主管部门的高度重视。有关部门多次调查分析和会商震情震害,建立救灾预案,以确保孔梁水库工程建筑物和当地百姓生命财产的安全。

由于孔梁水库建设勘察工作的局限,有关部

门前期未能就水库诱发地震问题做专题论证。笔者在分析区域地震地质背景和地震特征的基础上,对水库发震机理及可能产生的后果与危害作了初步探讨,为进一步开展水库地震的监测研究和防震减灾工作奠定基础。

1 区域地震地质条件

孔梁水库区域大地构造属扬子准地台北缘南大巴山台缘凹陷区,其北紧邻秦岭地槽褶皱系北大巴山冒地槽褶皱带,两者以青峰(城口—钟宝)断裂为界。南大巴山台缘凹陷界于阳日断裂和青峰断裂之间,是大巴山推覆构造前缘叠瓦状断皱带部分,由倾向北东的紧闭褶皱和逆冲断层组成,总体向南呈弧形凸出。北部由震旦系至下三叠统的紧密线状褶皱及走向逆断层组成,变形强烈,褶皱轴面和逆断层面多向北倾,褶皱密集,向南倒转,断层呈叠瓦状密集排列。中部为3个复向斜组成不完整的复向斜带,并受青峰断裂带的改造。南部为一东西向复背斜。构造作用由北向南逐渐减弱,褶皱由紧闭逐渐开阔,轴向由倾斜逐渐直立,逆冲断层规模逐渐减小至不发育。

该区由前震旦纪中、深变质岩褶皱带组成基底,沉积盖层发育,厚度近7 000 m。在震旦纪一中三叠世地台盖层沉积期间,发生了多次构造运动。该区经受印支运动地壳回返形成一系列东西

向褶皱和断裂,之后长期处于隆起稳定阶段并有快速间歇性上升,局部形成了自第三纪上新世以来发育的剥蚀夷平面和深切峡谷地貌。第四纪全新世地壳处于相对稳定阶段,属地台型稳定区。

区域布格重力异常资料显示,本区重力场均为负值,其值约为 $(-110 \sim -120) \times 10^{-5} \text{ m/s}^2$ 。异常变化比较平缓,异常等值线走向为 NW 向,表现为幔坡缓倾区,莫霍面由南向北加深,深度在 40 km 左右。区内重力实测获得的试验均衡异常水平低于区域布格重力异常水平,表明本区地壳基本处于均衡状态。

航磁异常处于巫溪—秭归—宜昌正异常区的西部,长轴走向为 NNW,显示其磁性块体以 NNW 向为主。巫溪一带磁异常变化呈现平缓的正异常区,是结晶基底隆起的反映。隆起区以巫溪为中心,长轴为 NW 走向,并远离磁异常正、负突变带,表明深部基底隆起比较均匀,基底断裂不发育。

根据区域地质、重力、航磁以及地震波测深剖面资料综合分析,巫溪地区地壳厚度在 40 km 左右,成层性明显,可分为上、中、下三层。上地壳底面埋深约 16 km,包括结晶基底和上覆沉积盖层。盖层因岩性不一,波速变化于 4.6 ~ 5.77 km/s 之间,厚度约为 7 km;结晶基底平均波速为 6.13 km/s,推测以花岗岩为主。中地壳底面埋深约 28 km,平均波速为 6.25 km/s,推测为闪长岩质。下地壳底面(M 面)埋深为 40 ~ 42 km,平均波速为 6.70 km/s,推测为玄武岩质。

盖层受秦岭褶皱带强烈向南的逆冲推覆作用,形成扬子准地台北缘的薄皮冲断变形(何建坤等,1997),其地质特征如图 1 所示。

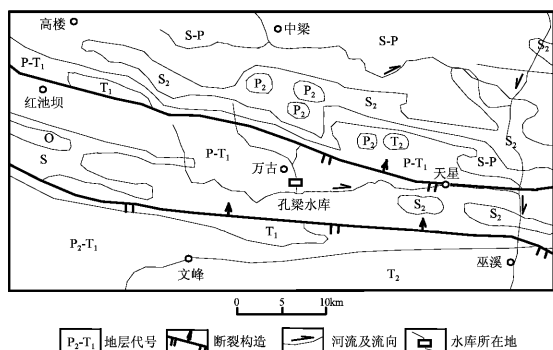


图 1 孔梁水库区域地质略图

Fig. 1 Regional, geological sketch of Kongliang reservoir area

青峰断裂的西段经过孔梁水库北部地区,距孔梁水库直线距离约 35 km,称为城口—钟宝深断裂。该深断裂面在城口附近呈波状,倾向为 NNE,倾角为 $40^\circ \sim 70^\circ$,力学性质为逆冲断层。断裂破碎带显著,糜棱岩化、炭化、擦痕与磨光面均较发育,断裂面两侧的平行断裂、褶皱构造与其形成的叠瓦状逆掩推覆构造均较发育。

历史上沿断裂曾发生过 5.0 级地震。对断层泥进行电镜扫描断代,结果表明中更新世时,断裂活动明显。由断裂带石英脉电子自旋共振(ESR)测年,测得 11 个石英脉的年龄集中在 3 个年龄段,即 240 ~ 230 Ma, 165 ~ 130 Ma, 70 ~ 60 Ma。其中 7 个样品的年龄集中在 165 ~ 130 Ma, 2 个样品的年龄在 70 ~ 60 Ma,由此推断断裂带活动于中晚侏罗世,为其构造变形最强烈时期,而喜山早期(K_2 末)曾活动过。对断裂带内最新断面的断层泥及断层带内物质进行的 ESR 测年结果表明,其年龄在 $(13.3 \pm 2.2) \times 10^4 \sim (64.6 \pm 5.8) \times 10^4$ a B. P.,其中主干断裂测年结果为 $(13.3 \pm 4.4) \times 10^4 \sim (32.4 \pm 5.0) \times 10^4$ a B. P.,上覆第四系堆积体热释光(TL)测年结果为 $(1.76 \pm 0.13) \times 10^4 \sim (7.54 \pm 0.56) \times 10^4$ a B. P.,表明青峰断裂自晚更新世以来没有活动过(徐亚军等,2005)。

巫溪活动断裂属北大巴山推覆构造带的前缘边界断裂。断裂长 130 km 以上,向南凸出呈弧形,走向由近 EW 向转为 NWW 向,断裂面倾向北,具逆冲断裂性质。断裂挤压破碎带最大宽度可达 1 km 左右(在巫溪县城可见),以压碎岩为主,显示出强烈挤压逆冲力学特征。在断裂挤压破碎带取方解石样做热释光(TL)测定,其绝对年龄为 $(9.54 \pm 1.72) \times 10^4$ a B. P.,属晚更新世活动断裂(丁仁杰,李克昌,2004)。

巫溪断裂至孔梁水库坝址区直线距离约 5 km,库区与断裂没有直接联系。该断裂沿线有多次 4.0 ~ 4.4 级现代和历史地震发生,是发生中等地震的断裂。这些地震的震中主要位于断裂两端的巫溪县城和麻柳、凤凰附近,距离孔梁水库 20 km 以上,对库区的影响烈度在 IV 度以下。

2 水库地震活动分析

2.1 区域地震活动特征

据中国地震台网地震目录,1978 年 1 月 1 日

至 2006 年 02 月 28 日，在 $107^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ， $30^{\circ} \sim 33^{\circ} \text{N}$ 范围内共记录到 2 级以上地震 103 次（图 2），其中 $2.0 < M_L < 2.9$ 有 24 次， $3.0 < M_L < 3.9$ 有 62 次， $4.0 < M_L < 4.9$ 有 16 次，5 级以上地震 1 次，即 1979 年 5 月 21 日湖北巴东 5.1 级地震，距孔梁水库 100 km 以外。图 2 中 I 区反映了孔梁水库区域地震背景，其中最大为 1989 年 6 月 2 日发生在巫溪北西的 4.4 级地震，距离孔梁水库约 20 km，影响烈度小于 IV 度，表明巫溪地区有发生 4.5 级地震的地质背景。

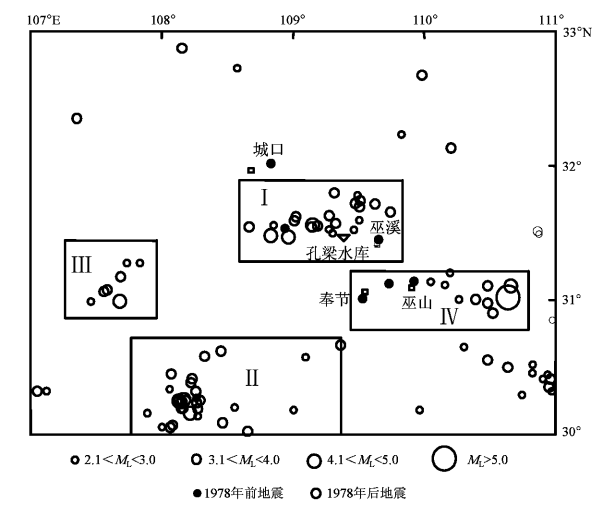


图 2 地震震中分布图
Fig. 2 Distribution of epicenters

对震源深度进行统计后发现（表 1），90% 的地震震源深度在 0 ~ 20 km 范围内，70% ~ 80% 的地震发生在 0 ~ 15 km 范围内，即地震主要位于上地壳内的沉积盖层或结晶基底面附近，反映出区域上地壳逆掩推覆构造现今活动性弱，应力积累慢，时间长。地震震源深度较浅，反映了发震断裂与浅部逆掩推覆构造中的断裂活动有关（张林洪等，2002，2004）。断裂破坏所需的应力相对较

表 1 震源深度统计表
Tab. 1 Statistics of the focal depth

震源深度/km	整个区域		I 区	
	数量	百分比	数量	百分比
0 ~ 5	10	11%	3	16%
5 ~ 10	18	19%	3	16%
10 ~ 15	37	40%	8	42%
15 ~ 20	18	19%	3	16%
> 20	10	11%	2	10%

小，形成的地震震级也同样受到了限制。因此，总体来看，研究区域以 5 级以下中强地震为发震上限，且间歇时间较长，震源深度较浅，属于地震活动较弱的区域。

2.2 水库地震分析

根据现有地震记录的零星资料，我们得到了水库地震与孔梁水库蓄水过程的关系（图 3）。

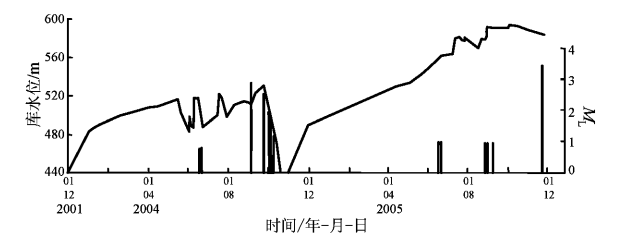


图 3 孔梁水库蓄水位与水库地震 $M-T$ 关系图
Fig. 3 Water level of Kongliang reservoir and the $M-T$ Relation of the reservoir-induced earthquakes

从库水位变化过程与水库地震发生的过程看，似乎水库地震的发生与库水位上升有着密切的关系。库区地震活动主要表现为 2 个阶段：一是水库初次蓄水到 520 m 以上，发生了一系列有感地震。地震发生的密度比较大，强度低，这与水库蓄水后溶洞裂隙充水引起的局部变形或塌陷有关；第二个阶段是在水库放水后重新蓄水到 550 m 以上直至达到正常蓄水位 592 m，期间相继发生了几次孤立型地震，2005 年 9 月初达到正常蓄水位后，库水位稍有回落。2005 年 11 月 24 日 13 点 46 分，当库水位达到 583.87 m 时，发生了 $M_L 3.4$ 有感地震。

笔者查阅 2003 年 12 月 1 日至 2006 年 2 月 28 日中国地震台网地震目录，库区周边地区（ $31^{\circ} \sim 32^{\circ} \text{N}$ ， $108^{\circ} \sim 110^{\circ} \text{E}$ ）仅发生 3 次地震，震中分布如图 4。

中国地震台网记录到的地震与重庆市地震局通报中的记录有明显差异。2004 年 9 月 9 日地震的震中位于西溪河流域的白马穴附近，2005 年 11 月 24 日地震的震中位于西溪河流域的李家溪沟。两次地震震中距离孔梁水库均在 12 km 左右，并且其间有巨厚的志留系页岩构成了西溪河与茶登河的天然分水岭。因此从水力联系来看，库水与两次地震没有水力联系。因此上述 3 次较大地震是否为孔梁水库诱发地震值得商榷。

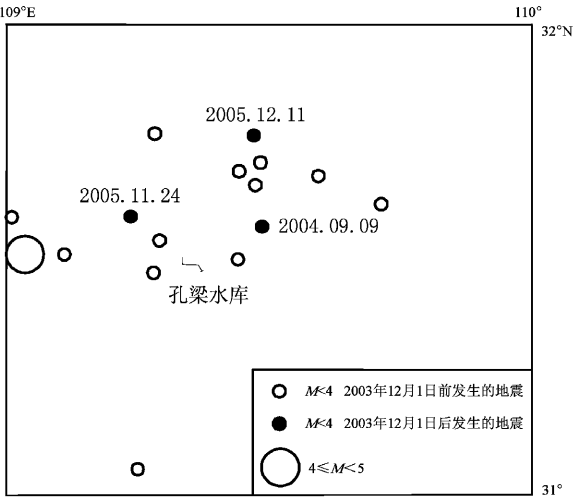


图 4 1978 年 1 月 1 日以来库区
周边地震震中分布图

Fig. 4 Distribution of epicenters around the reservoir
area since January 1, 1978

3 水库地震综合评价

3.1 水库诱震环境

(1) 地质条件

孔梁水库的基本参数见表 2。孔梁水库位于大宁河的两条支流西溪河与茶登河之间的河间地块中。两河分水岭地带分布的最老的地层为古生界志留系中统徐家坝群页岩，它构成了孔梁水库与邻谷水系的天然分水岭和隔水层，对水库渗漏起隔挡封闭作用。库区主要分布有古生界二叠系和中生界三叠系，岩性以厚层灰岩、白云质灰岩为主。褶皱构造轴线均为近 EW 向，其中万古寺—长桂倾伏背斜穿过水库库盆上游段，天井屋—火炼垭向斜穿过库盆中部，渔沙—建楼倾伏背斜通过小溪河下游孔梁水库库区。据 1:5 万遥感解释成果及野外调查，水库区不存在较大的断裂构造，但规模较小的断裂仍很发育，按其走向和力学性质可分为 4 组：① 近东西向压性断裂；② 近南北向张性断裂；③ 北东向扭性断裂；④ 北西向扭性断

裂。它们是该区域在南北向同一挤压应力场作用下的产物。

(2) 岩溶水文地质条件

研究区属亚热带内陆山区季风气候，年最大降雨量达 1 500 ~ 1 900 mm，多年平均降雨量为 1 392 mm，为川东暴雨中心的一部分。多年平均气温 18℃，最高气温 41.8℃，最低气温 -3.3℃。雨量丰沛，气候温和，光照充足，四季分明，地表植被茂盛，为岩溶发育创造了良好的水文条件。

研究区以构造—溶蚀地形为主，山体多为峰丛状，悬崖陡壁发育普遍，河谷多为峡谷，地貌组合形态为峰脊谷地。在谷底至峰顶的不同高程上，常镶嵌有“U”型岩溶槽谷、悬谷，如长桂岩溶悬谷。岩溶发育不太典型和普遍，以侵蚀地貌为主，既有垂直岩溶形态，也常有水平溶洞或暗河，或以其中之一为主，落水洞发育深度很大。漏斗、落水洞、水平溶洞在地表都少见洞口，多数出口呈反虹吸式。

小溪河深切于各级剥夷面之下，相对高差在 1 000 m 左右，多呈“V”型峡谷。在小溪河与雁鸭溪河间地块高程为 1 100 ~ 1 600 m 的剥夷面上，溶蚀洼地及落水洞很发育，呈现峰丛洼地地貌景观。

水库区主要地下水类型属岩溶裂隙溶洞水。据对水库及小溪河—雁鸭溪河间地块上出露的泉水的不完全统计，可以看出：

在水库及小溪河—雁鸭溪河间地块约 25 km² 的测区范围内发现泉水点 26 个以上，数量相对较少，主要原因是地形坡度大，地层倾角大，地表排水条件好。

T_{ld}⁴⁻¹、P₂ 层泉水点共 20 个，占总泉水数的 76%。枯流量大于 10 L/min 及丰流量大、枯流量小的溶洞泉主要分布在 T_{ij}、P₂ 及 T_{ld}⁴⁻¹ 层。

相对隔水层 T_{ld}¹⁻¹、T_{ld}⁴⁻² 及弱岩溶层 T_{ld}² 泉水数量少，流量小，仅发现 4 个枯流量小于 10 L/min 的泉水点。

泉水点分布高程有明显特点。400 ~ 500 m 阶段共发现 11 个，占总数的 42.2%；500 ~ 700 m 阶段共发现 9 个，占总数的 34.6%；700 ~ 1 000 m 阶段共发现 6 个，占总数的 23.0%。高程 1 000 m 以上地带泉水极少，一般枯流量小于 1 L/min，缺水现象十分严重。

表 2 孔梁水库基本参数一览表

Tab. 2 Parameters of Kongliang reservoir

工程状况	正常蓄水位 /m	最大水深 /m	库容 /×10 ⁴ m ³	库面面积 /×10 ⁴ m ²
已建成	592	154	5 747	90.6
未来扩容	615	177	7 700	122.7

从水文地质条件和水库蓄水后的状况分析，水库区不存在较大的向库外渗漏的条件，封闭条件较好。从水库及坝址区地貌形态、地层岩性及岩溶发育特征分析，水库周边地区具有地下水下渗的岩溶发育条件，尤其是在峡谷区，河谷深部岩溶发育，为库水向深部渗透提供了条件。

3.2 水库地震预测

(1) 诱发地震可能性概率预测

概率预测法是 Packer (1979) 和 Beacher (1982) 提出的。其立意是在概率意义上对一个新建水库的诱震危险性进行预测。该方法主要是对现有水库的诱发地震密切关系的可能因素进行统计分析，并认为主要诱震因素包括：库深 (D)、库容 (V)、水库所在地应力场状况 (S)、库区断层活动性 (F) 以及库区优势岩性条件 (G)。根据孔梁水库诱发地震因素状态计算得到其诱发地

震概率约为 0.21，略大于水库地震的临界概率 0.2。因此可以判断该水库存在诱发地震的可能性。

(2) 综合评价

笔者分别采用古哈估算法、灰色聚类 (贺为民, 李智毅, 2000)、层次分析法 (李克, 曹丽, 1995)、模糊数学法 (苏锦星, 1997) 等综合方法预测孔梁水库的诱发地震震级, 预测结果见表 3。预测最大震级为 5 级, 最小为 2.1 级。从各种预测方法考虑的因素分析, 在考虑了巫溪活动断裂的影响情况下, 震级预测结果偏大, 而仅从活动断裂的破裂长度因素预测则仅有 3.7 级。由岩溶塌陷引起的地震震级一般在 3 级左右, 结合巫溪活动断裂分析, 构造地震的最大震级只有 4.4 级。水库对该断裂并没有直接淹没和影响, 因此我们认为把孔梁水库诱发地震的最大震级确定为 4 级比较合理可靠, 该地区不会发生 5 级以上破坏性中强地震。

表 3 水库地震震级预测表
Tab. 3 Predicted magnitudes of the reservoir-induced earthquake

预测方法	现已建成的水库	未来扩容的水库
古哈估算法	4.4	4.4
灰色聚类	4.0~5.0	4.0~5.0
层次分析法	2.1	2.1
模糊数学法	3.0~5.0	3.0~5.0
$M = 3.365 + 0.5349E$ (常宝琦, 梁纪彬, 1994)	4.7	4.9
$M = 1.3163 + 1.134E$ (常宝琦, 梁纪彬, 1994)	4.1	4.5
$M = 0.7706 + 0.6524E + 0.4669\ln H$ (常宝琦, 梁纪彬, 1994)	4.7	5.1
$M = -4.7251 + 1.1962E + 1.242\ln H$ (常宝琦, 梁纪彬, 1994)	4.4	5.0
类比法 (陈献程, 杨清源, 2004)	3.0	3.0
断层破裂长度估算法 (曾心传, 高士钧, 1987)	3.7	3.7

4 结论

水库诱发地震的预测和评价, 既与构造地震的机理研究和预报紧密相关, 又有自身的特殊规律, 目前国内外均处于探索阶段。人们对于诱发地震的机理和发生发展过程尚未能从本质上得到肯定的认识。判断水库诱发地震的可能性, 特别是预测发震地点和强度, 现阶段主要还是依据地震地质背景, 从已有的水库诱发地震的震例中归纳出某些共同特点, 进行类比分析, 作出粗略的估计。

综合库区岩性、地质构造、地形地貌及岩溶水文地质等条件, 结合水库地震的概率预测, 笔

者认为孔梁水库具有诱发地震的条件和可能性。诱发地震类型主要为岩溶陷落型地震和裂隙 (层面) 错动型地震。

笔者根据多种诱震预测评价方法计算成果和各种诱震因素分析, 判断孔梁水库诱发地震的最大震级为 4 级, 震中烈度为 VI 度, 对应的地震动峰值加速度为 0.05 g, 仍在水库初期设计确定的烈度范围内。诱发地震产生的超载较小, 不会对水库建筑物产生破坏性的影响。水库诱发地震也不会给当地居民区构成严重威胁。但由于库区周边为贫困山区, 农民住房质量较差, 多为土坯茅草房, 承受地震的能力极弱, 若地震发生可能会引起重物坠落, 房屋倒塌, 给居民的生命财产造成不同程度的伤害。

分析表明水库蓄水位加高 20 m 后, 对库区诱震条件和地震强度没有根本性改变, 仍保持现有状况(表 2, 3)。因此, 在水库运行一段时间后, 可以视水库地震活动水平的减弱, 实施加坝扩库的后续工程。

针对孔梁水库诱发地震的现状, 有必要进一步开展地震监测等研究工作。

参考文献:

- 常宝琦, 梁纪彬. 1994. 水库地震震级预测的讨论[J]. 华南地震, 14(1): 77-82.
- 陈献程, 杨清源. 2004. 重庆巴山水电站水库诱发地震的初步评价[J]. 华南地震, 24(1): 44-50.
- 丁仁杰, 李克昌. 2004. 重庆地震研究[M]. 北京: 地震出版社.
- 何建坤, 卢华复, 张庆龙, 等. 1997. 南大巴山冲断构造及其剪切挤压动力学机制[J]. 高校地质学报, 3(4): 419-428.
- 贺为民, 李智毅. 2000. 应用灰色聚类法预测小浪底水库诱发地震最

- 大震级[J]. 华北地震科学, 18(1): 26-30.
- 李克, 曹丽. 1995. 层次分析方法在水库诱发地震预测中的应用[J]. 东北地震研究, 11(2): 39-45.
- 柳源. 1994. 水库诱震的模糊预测方法[J]. 中国地质灾害与防治学报, 5(2): 85-87.
- 苏锦星. 1997. 模糊聚类分析及其在水库诱发地震研究中的应用[J]. 水利水电技术, 28(6): 18-23.
- 徐亚军, 杨坤光, 马昌前. 2005. 秦岭地区城口—房县断裂带变形特征及 ESR 定年[J]. 现代地质, 19(1): 127-132.
- 张林洪, 刘荣佩, 周建芬, 等. 2002. 构造型水库地震的断裂力学分析[J]. 地震研究, 25(2): 186-191.
- 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的可能性分析[J]. 地震研究, 27(3): 241-245.
- Beacher G B, Keeney R L. 1982. Statistical examination of reservoir-induced seismicity[J]. BSSA, 72(2): 553-569.
- Packer D R, Cluff L S, Knuefer P L, et al. 1979. Study of reservoir induced seismicity[R]. Woodward-Clyde Consultants, San Francisco, California Technical Report.

Study of the Induced Earthquake of Kongliang Reservoir

WANG Jian-ping

(Department of Earth Science and Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, Jiangsu, China)

Abstract

The deep geological structure, geophysical and seismic record, and karst hydrological characteristics of Kongliang reservoir are discussed in the paper. The stress concentration of the compression nappe structure in the upper crust is the dynamic source of the natural earthquake. The nappe structure also controls the reservoir induced earthquake's distribution and strength. Synthesizing various estimation method results and by the help of seismo-geological condition analysis, we get the result that the magnitude of the biggest earthquake in Kongliang reservoir is about 4, the intensity is VI.

Key words: induced earthquake; mechanism; forecast; Kongliang reservoir