

小浪底水库诱发地震预测研究^{*}

贺为民¹, 秦建增¹, 刘明军¹, 李智毅², 吕庆山¹

(1. 中国地震局地球物理勘探中心, 河南 郑州 450003; 2. 中国地质大学, 北京 100083)

摘要: 通过实地考察并结合前人研究成果, 对黄河小浪底水库及其邻区地质构造特征和地震活动性进行了分析. 认为该地区地质构造背景较为复杂, 地震活动性相对较弱. 在此基础上, 采用概率预测法对小浪底水库诱发地震的可能性进行了研究. 利用逻辑信息法和灰色聚类法对诱发地震的强度进行了预测. 结果表明, 该水库存在诱发地震的可能性, 最可能发生诱发地震的地段为库区中段, 震级上限可达 5 级.

关键词: 小浪底水库; 诱发地震; 概率预测法; 逻辑信息法

中图分类号: TV 697. 2⁺4 文献标识码: A 文章编号: 1000—0844(2001)02—0164—05

0 引言

小浪底水库位于黄河下游, 地跨河南和山西二省. 该水库面积约 297.4 km², 最大水深 140 m, 库容约 126.5×10^8 m³, 是三门峡以下黄河干流上唯一一座库容较大, 可以进行长期综合利用的水利工程. 该水库的建成对黄河下游防洪、防凌、减淤及水资源开发利用具有战略意义. 对于这样一个重要的水利工程的诱发地震的可能性进行预测研究, 是十分必要的.

1 区域地震地质概况

1.1 库坝区地层岩性

黄河小浪底水库库坝区位于中朝准地台南部, 与秦岭褶皱系相连. 该区内地层齐全, 中朝准地台发育的各时代地层几乎皆有出露. 太古界和元古界变质岩系出露在中条山、王屋山和青要山一带. 下古生界寒武系和奥陶系出露于太行山及该区中部, 以海相碳酸岩沉积为主. 上古生界石炭系和二迭系出露于该区中部, 主要为陆相碎屑岩. 中生界少量出露于该区东部, 皆为陆相碎屑岩沉积. 第三系出露于各新生代断陷盆地中, 岩性为内陆河湖相碎屑岩, 成岩程度低. 第四系中更新统主要为冲积、洪积成因的松散堆积物, 分布广泛, 覆盖在老地层之上. 区域内岩浆岩分布零星, 面积小, 但成份复杂, 有侵入岩也有喷出岩.

1.2 活断层

小浪底水库库坝区和周边构造复杂, 分布有多条断层^①(图 1). 其中城崖地断层、塔底断层和石井河断层是该区较重要的 3 条断层. 城崖地断层主体走向约 315°, 倾向 NE, 倾角 65°~

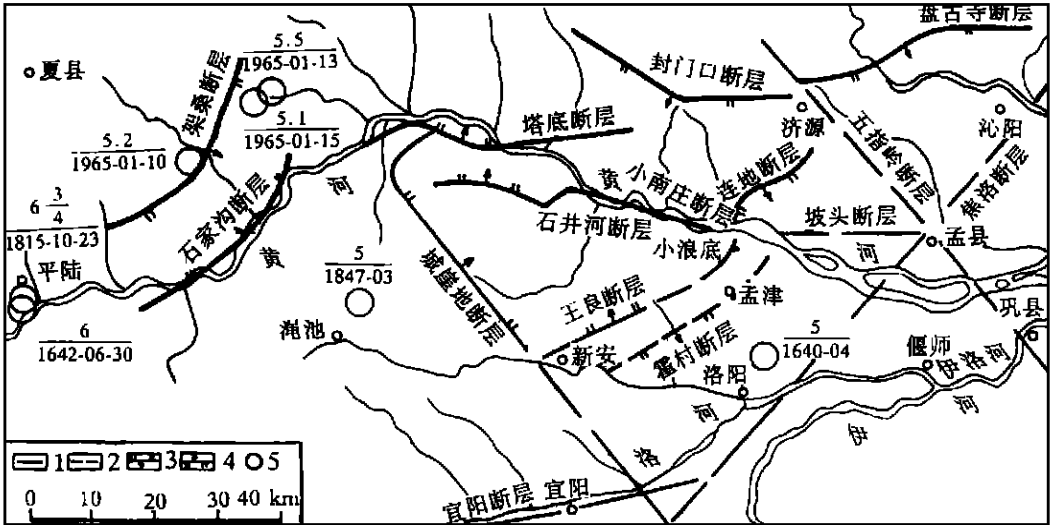
收稿日期: 2000-07-07

^{*} 中国地震局地球物理勘探中心科技论著号: RCE99013.

作者简介: 贺为民(1965—), 男(汉族), 河南洛宁人, 工程师, 主要从事地球物理和地质灾害防治工作.

① 水利部黄河水利委员会勘测规划设计院. 黄河小浪底水利枢纽初步设计报告附件——工程地质勘察报告. 1988.

75°, 可见长度 30 km 左右, 据航卫片判读, 其全长在 100 km 以上. 该断层控制了东西二盘新生代地层的厚度, 断距达 1 000 m. 塔底断层是控制垣曲新生代断拗盆地南部边界的一条断层, 走向近 EW, 总延伸长度 38 km, 倾向 N, 倾角 70°. 该断层垂直断距大, 在新安县峪里以南达 2 000 m 以上, 向东西二端逐渐递减. 在平面上, 该断层与黄河近乎平行, 是该区燕山期形成的较大规模的断层之一. 石井河断层由西沃镇南向东, 经竹峪、赤壁滩, 直抵坝址区右岸, 总体走向 285°, 断面倾向 N, 倾角大于 60°, 总延伸长度在 40 km 以上, 显示正断层性质.



1 断层; 2 推测或隐伏断层; 3 逆断层; 4 正断层; 5 地震

图 1 小浪底水库区断层和震中分布

Fig. 1 Distribution of active faults and epicentres in Xiaolangdi reservoir region.

该区一些老断层, 如塔底断层、城崖地断层等形成于燕山期或前燕山期, 在晚近时期仍有明显活动, 但是未发现大规模的第四纪以来新产生的断裂, 说明该区在第四纪以来断裂活动较微弱. 架桑断层、城崖地断层、宜洛断层和焦洛等断层曾发生过多地地震, 因此它们可能属于全新世活动断层. 在水库附加荷载影响范围内分布有 10 条断层, 即石井河断层、小南庄断层、连地断层、王良断层、坡头断层、霍村断层、塔底断层、封门口断层、城崖地断层和石家沟断层. 其中, 与库水直接接触的有小南庄断层、石井河断层、塔底断层和石家沟断层. 水库蓄水后, 这 4 条断层将大部分被淹没.

1.3 地震活动性

水库区及其周围的地震活动总体较为微弱, 以小震、微震为主. 自有记载以来至 1999 年, 距坝址 110 km 范围内共发生 $M_s \geq 5$ 地震 7 次(图 1), 其中最大的一次是 1815 年平陆 6 $\frac{3}{4}$ 级地震, 距离坝址最近的一次是 1640 年洛阳 5 级地震. 黄河水利委员会设计院协同河南省地震局在王良、下冶、竹峪设置了 3 个临时微震台, 1985 年 5 月至 11 月共记录到 $M_L = 0.1 \sim 2.5$ 地震 93 次, 其中 $M_L = 0.1 \sim 0.9$ 地震 17 次, $M_L = 1.0 \sim 1.9$ 地震 68 次, $M_L = 2.1 \sim 2.5$ 地震 8 次. 微震震中密集在洛宜盆地西部边缘及王良断层、城崖地断层、塔底断层附近. 震中分布明显受活动断层控制, 在库水淹没区内主要受塔底断层控制.

1.4 构造应力场

由小浪底地区震源机制解可知, 区内构造为走滑型. 最大主应力(σ_1)和最小主应力(σ_3)

近于水平, 倾角多小于 20° ; 中间主应力(σ_2) 近于直立. 最大主应力(σ_1) 方位为 NEE 或近 EW 向.

2 水库诱发地震预测

2.1 概率预测法

概率预测法是美国佩克(Packer)和比切尔(Beacher)等人提出的. 该方法通过对现有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, 计算出诱发地震的概率^[1]. 这些因素包括: 库深(D)、库容(V)、水库所在地区应力场状况(S)、库区断层活动性(F) 以及库区优势岩性条件(G), 见表 1.

表 1 诱震因素及状态

诱震因素	诱震因素状态		
	1	2	3
库深(D) /m	d_1 : 很深 $d_1 > 150$	d_2 : 深的 $150 > d_2 > 92$	d_3 : 浅的 $d_3 < 92$
库容(V) / $\times 10^9 \text{m}^3$	v_1 : 很大的 $v_1 > 10$	v_2 : 大的 $10 > v_2 > 1.2$	v_3 : 小的 $v_2 < 1.2$
应力状态(S)	s_1 : 逆断层 (σ_3 垂直, σ_1 和 σ_2 水平)	s_2 : 正断层 (σ_1 垂直, σ_2 和 σ_3 水平)	s_3 : 走滑断层 (σ_2 垂直, σ_1 和 σ_3 水平)
断层活动性(F)	f_1 : 活动的	f_2 : 不活动的	—
介质条件(G)	g_1 : 沉积岩	g_2 : 变质岩	g_3 : 火成岩

根据黄河小浪底水库的具体情况, 库深取 d_2 和 d_3 2 种状态, 库容取 v_1 和 v_3 2 种状态, 应力状态取 s_2 和 s_3 2 种状态, 断层活动性取 f_1 状态, 介质条件取 g_1 和 g_2 2 种状态. 这些因素共有 8 种可能的组合状态, 其概率预测结果见表 2.

表 2 小浪底水库诱发地震概率预测结果

因素、状态组合	水库诱发地震概率	因素、状态组合	水库诱发地震概率
d_2, v_1, s_2, f_1, g_1	15.7%	d_3, v_3, s_2, f_1, g_1	11%
d_2, v_1, s_2, f_1, g_2	12.2%	d_3, v_3, s_2, f_1, g_2	8.5%
d_2, v_1, s_3, f_1, g_1	36.2%	d_3, v_3, s_3, f_1, g_1	28.1%
d_2, v_1, s_3, f_1, g_2	29.9%	d_3, v_3, s_3, f_1, g_2	22.1%

由表 2 可见, 在 σ_2 垂直, σ_1 和 σ_3 水平的应力状态下, 即应力状态取 s_3 的情况下, 所预测出的水库诱发地震概率大于一般认为的临界概率(20%), 说明该水库存在诱发地震的可能性. 当库区岩性为沉积岩(g_1) 时的诱震概率比变质岩(g_2) 高. 当库深变浅, 库容变小时, 诱震概率有所下降.

2.2 逻辑信息法

逻辑信息法是苏联学者康斯坦丁诺夫等人首创的, 以控制论、数理逻辑、组合分析和数理统计为基础的一种预测方法. 文献[2] 将该方法用于水库诱发地震预测. 本文也尝试使用该方法对小浪底水库诱发地震进行预测. 在预测中选择与水库诱发地震有关的地质、地震、水文等 19 个因素作为识别特征标志. 各标志(变量)的定义见表 3.

通过一系列运算, 最后按下式计算每个研究对象(水库)的对象权 I_i .

$$I_i = \sum_{k=1}^p R_k(1, 0)$$

式中: I_i 为第 i 个对象分权总和(对象权); i 为对象(水库) 编号; k 为标志序号; $R_k(1, 0)$ 为根据第 i 个对象标志的数值(0 或 1) 所赋予 $R_k(0)$ 和 $R_k(1)$ 的值. 当对象权临界值小于 0. 742 时, 水库不诱发地震; 当临界值为 0. 742 ~ 1. 65 时, 水库诱发地震的震级 $M < 3$; 当临界值为 1. 65 ~ 2. 037 时, $3 \leq M < 4. 7$; 当对象权临界值大于 2. 037 时, $4. 7 \leq M < 6^{2.3}$.

表 3 特征标志定义

标志序号	标志定义
1	地震活动背景值(以坝址为圆心 100 km 为半径范围内地震能量累积值)
2	水库区主要断裂方位角
3	水库及水域外 25 km 范围内 10 km 以上断裂总长度
4	水库及水域外 25 km 范围内 10 km 以上断裂交点数目
5	白垩—第三系盆地边缘的影响系数(坝址到盆地边缘的最小距离与 25 km 之比值)
6	新生代盆地边缘的影响系数(坝址到盆地边缘的最小距离与 25 km 之比值)
7	三级以上断块的影响系数(坝址到断块边界的最小距离与 25 km 之比值)
8	三级以上断块角顶的影响系数(坝址到角顶的距离与 25 km 之比值)
9	三级以上隆起与凹陷过渡带的影响系数(坝址到过过渡带的最小距离与 25 km 之比值)
10	水库水域范围内碳酸岩类及花岗岩类岩石出露面积与该范围总面积之比值
11	水库及水域外 25 km 范围内碳酸岩类及花岗岩类岩石出露面积与该范围总面积之比值
12	水库 100 km 范围内新生代以来活动大断裂总长度
13	水库 100 km 范围内第三纪以来活动大断裂总长度
14	水库 100 km 范围内第四纪以来活动大断裂总长度
15	水库及水域外 25 km 范围内 10 km 以上正断层总长度
16	水库及水域外 25 km 范围内 10 km 以上逆断层总长度
17	水库及水域外 25 km 范围内 10 km 以上平推断层总长度
18	水库坝高
19	水库库容

根据小浪底水库的实际情况, 抽取与上述水库地震逻辑信息模型中相应的 19 个变量, 组成特征标志构形, 计算出小浪底水库诱发地震的预测对象权 I_i 为 1. 783 8(表 4), 所以该水库诱发地震震级预测结果为: $3 \leq M < 4. 7$.

表 4 用逻辑信息法对小浪底水库诱发地震的预测结果

特征标志序号	1	2	3	7	11	4	9	6	8	10	12	15	18	19
变量构形	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1
各标志分权	0. 139	0. 026 8	0. 131	0	0	0	0	0	0	0	0. 302	0. 443	0. 493	0. 249
预测对象权	1. 783 8													
预测震级	$3 \leq M < 4. 7$													

2.3 灰色聚类法

灰色聚类法是将收集到的样本按统计方法取其权, 再将被预测对象按实际指标的值在白化权函数上找出所对应的权, 根据找出权的大小判断所属类别. 将水库地震震级作为聚类的类别, 诱震因素^[4] 作为聚类指标, 被预测的水库作为聚类对象. 作者已在文献[5] 中对小浪底水库诱发地震的最大震级做了预测. 预测结果为 $5. 0 > M_s > 4. 0$.

3 结论

如前所述, 正在兴建中的黄河小浪底水库属于高坝水库. 库区地层中分布有可溶性碳酸岩, 特别是在断裂带及其附近岩体渗透率较高, 这都是诱发地震的有利条件. 库区位于许昌—

淮南地震带上. 目前该地震带的地震活动平静时段即将结束, 第四个活跃时段即将开始, 而且微震活动时时有发生, 因此不能忽视该水库发生诱发地震的可能性. 概率预测法的计算结果也表明, 小浪底水库存在诱发地震的可能性.

根据逻辑信息法对小浪底水库诱发地震的强度的预测结果为: $3 \leq M < 4.7$. 灰色聚类法的预测结果为: $5.0 > M_s > 4.0$. 在历史地震方面, 发生在库区中段附近的浍池地震为 5 级, 距坝址 25 km 的洛阳地震也是 5 级. 据此可以将该水库诱发地震震级上限确定为 5 级.

小浪底水库库坝区主要的活断层——城崖地断层与塔底断层交汇部位位于库区中部. 库坝区寒武系、奥陶系的碳酸岩地层也主要分布于库区中段. 在库水淹没区内, 微震震中分布主要受塔底断层控制. 据此可以估计发生诱发地震可能性较大的地段为库区中部.

在本文完成过程中, 得到了中国地质大学 唐辉明教授、王建锋副教授和黄河水利委员会设计院牛书安同志、王磊同志的支持和帮助, 在此一并致谢.

[参考文献]

- [1] 丁原章. 水库诱发地震[M]. 北京: 地震出版社, 1989. 164—168.
- [2] 余永毓. 逻辑信息法在水库诱发地震研究中的应用[J]. 地震学报, 1987, 9(增刊): 413—421.
- [3] 高士钧. 长江三峡地区地壳应力场与地震[M]. 北京: 地震出版社, 1992. 143—146.
- [4] 杨清源, 陈献程, 胡毓良, 等. 应用灰色聚类法预测长江三峡水库诱发地震的最大震级[J]. 华南地震, 1996, 16(2): 75—79.
- [5] 贺为民, 李智毅, 刘敏, 等. 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, 2000, 20(1): 26—29.

FORECAST ON INDUCED EARTHQUAKES FOR XIAOLANGDI RESERVOIR

HE Wei-min¹, QIN Jian-zeng¹, LIU Ming-jun¹, LI Zhi-yi², LU Qing-shan¹

(1. *Research Center of Exploration Geophysics, CSB, Zhengzhou 450002, China;*

2. China University of Geosciences, Beijing 100083, China)

Abstract: On the basis of field investigation and former studies, the geological structures and seismicity in Xiaolangdi reservoir and its adjacent area are analysed. It is considered that the geotectonic background is complex and seismicity is relatively week in the area. By using probabilistic statistic method, logic information method and gray cluster method, possibility and magnitude of induced earthquake of the Xiaolangdi reservoir are forecasted. The result shows that there is the possibility of the induced events, especially in the middle segment of the reservoir and the maximum magnitude could be 5.0.

Key words: Xiaolangdi reservoir; Reservoir induced earthquake; Probabilistic statistic method; Logic information method