

南水水库地震及其发展趋势

肖安予

(广东省地震局)

提要 南水水库截流蓄水后,发生在库区的地震活动,属于水库诱发地震;其序列特征为小的震群型;未来诱发地震将小于 $M_s3.7$ 级,不会影响大坝的安全。

前 言

南水水库大坝建于珠江水系北江的支流南水河上,高81.5米(包括防浪墙)。正常高水位为220米高程时,水库库容为10.5亿立方米。

库区及所在的乳源县,历史上无地震记录。1969年2月水库蓄水后,库区出现了较频繁的地震活动。受广东省南水水电厂委托,我们承担了南水水库地震发展趋势的研究任务。本文是在该项研究报告的基础上改写而成的。

一、地质构造背景

1. 大地构造背景

水库位于东南地洼区浙粤地穹系赣州地穹列的西段^[1]。在构造体系上,属于粤北山字型构造的脊柱部位。

晚元古代至早古生代,水库所在地区构造运动较剧,发育巨厚的由复矿砂岩、粉砂岩和页岩组成的复理式建造。受后期构造运动影响,上述地层多形成紧闭型褶皱、岩石多变质。邻区尚有花岗岩浆侵入。显然,该时期应属地槽发展阶段。

自泥盆纪开始,本区进入地台阶段。构造运动趋于缓和,地壳运动以升降运动为主,相继发育陆相及滨海相碎屑岩建造、海相碳酸岩建造与碎屑岩建造,其中以海相碳酸岩建造最为发育,岩相也较稳定。无岩浆活动。

晚三迭世以来,地壳运动渐趋强烈,地台阶段的沉积建造受褶皱和断裂变动,形成了一系列断块山和断陷盆地等,伴之以大量的酸性、中酸性岩浆侵入,表明本区已进入地洼区发展阶段。自晚白垩世开始,构造运动减弱。深切河谷(切割最深的达300~500米),陡峻的地形(山坡坡度一般 $40^\circ\sim50^\circ$),众多的温泉,多级河谷阶地和溶洞等,表明本区在新构造时期仍有一定的活动性。但总的来说,构造运动进一步减弱,全区主要表现为大面积的间

歇性的抬升运动。

2. 库区地质构造

就区域地质构造部位而言,库区靠近瑶山复式背斜的轴部。

瑶山复背斜是广东北部十分醒目的南北走向的构造形迹。它北宽南窄,延长约100公里。在库区南侧,它被燕山期大东山花岗岩体截成南北两段。库区所在的北段之西翼,发育包括大桥向斜在内的一系列次级褶皱,延伸长度一般20~40公里。此外,还与褶皱构造平行地发育一系列挤压带和断层^[2]。

南水水库主体座落在向南倾伏的大桥向斜构造的轴部(南段)。该向斜核部主要为二迭系和上、中石炭统,两翼依次为下石炭统和上、中泥盆统;南端被燕山期花岗岩熔蚀。它被一系列断层切割而复杂化(图1)。

库区断裂构造发育。主要有北东东、北西、近南北和北东向四组。其中,前二组较发育,活动性较明显。

库区1、5、7、9和11号等北东东向断层,倾角较陡,属张剪性质。沿该组断层,有一系列温泉分布。

2、3、6和8号断层是区内规模较大的北西向断层。它们系剪切断层,最新活动性较强,对河流及地形的发育起一定的控制作用。

4号断层位于瑶山复背斜的西翼、水库之东侧,是一条规模较大,近乎南北走向的正断层。它形成时代较早,新构造时期有较明显的活动性,从而构成两种不同地貌单元的界线。但未切割中更新统以来的地层。

此外,库区节理也十分发育,尤以灰岩地区为甚。

3. 地层与岩性

库区中部及北部主要为中、晚泥盆世和石炭纪的碳酸盐岩系,以中厚层石灰岩为主,坚脆而易溶。东部及东南部由库区向库外,依次为早、中泥盆世的碎屑岩和前泥盆纪(主要是寒武纪和前寒武纪)的砂质及泥质细碎屑变质岩。西部及西南部为燕山期形成的巨大花岗岩体,质地致密而坚硬。

4. 水文地质条件

库区的地质构造条件、岩性及新构造运动等,在很大程度上制约了本区的水文地质条件。宏观地看,在中部和北部灰岩区,断层、节理发育,岩溶也较普遍,透水性较好。水库蓄水后,库水有向地下渗透的良好通道。在水库的东、南及西侧碎屑岩、变质岩和花岗岩分布区,断层、节理不甚发育,透水性较差,且随着深度的增大,透水性迅速降低。因此,构成了相对的隔水层。

库区有温泉多处。其中,位于库区北段的有1号(榔木桥)温泉,水温78℃;位于库区中段的有2号(海岱)和3号(车竿水)温泉,水温分别为43℃和46℃;4号(汤盆水)温泉水温43℃,它和5号温泉均位于水库南段,且涌自11号断层。此外,尚有6号温泉等。上述情况表明,库区地下余热较高,地下水有较好的水力联系,且与断层有一定关系。

二、地震活动情况

1. 水库蓄水前库区的地震活动

据地震史料,水库所在的乳源县历史上无地震活动记载。距库区最近(约190公里)的地

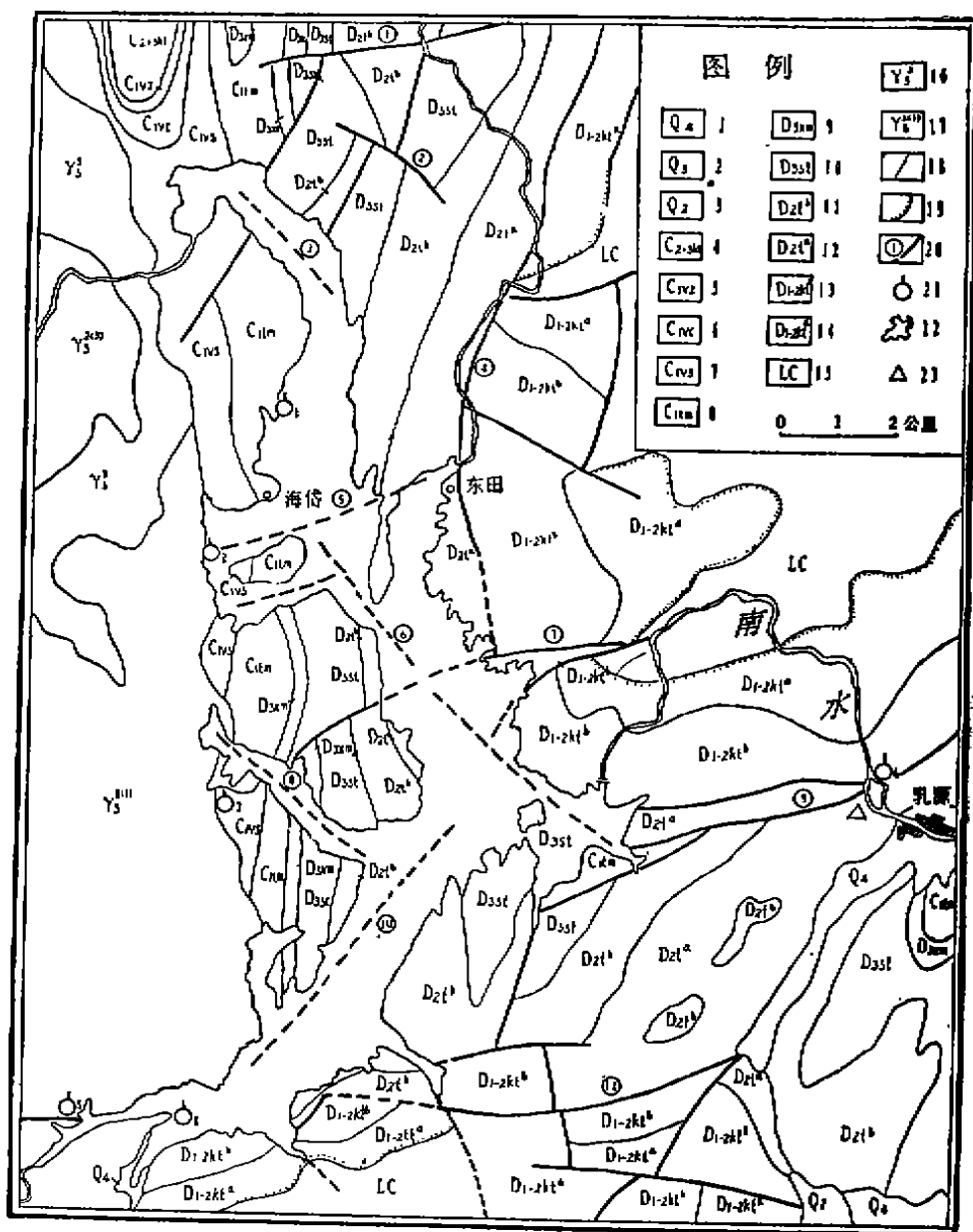


图1 南水水库地质构造略图

Fig. 1 Geologic structure in Nanshui reservoir

1. 全新统; 2. 上更新统; 3. 中更新统; 4. 上、中石炭统壶天群; 5. 6. 7. 8. 下石炭统; 9. 10. 上泥盆统; 11. 12. 中泥盆统; 13. 14. 中下泥盆统桂头群; 15. 前泥盆纪 (主要是寒武纪及前寒武纪) 变质岩系; 16. 17. 燕山期花岗岩; 18. 地层界线; 19. 不整合面; 20. 实测与推断路层及其代号; 21. 温泉; 22. 水库及大型; 23. 地震台台址。(据广东省地质局、水电勘测设计院资料编绘)

震台为广州台, 1956年7月开始观测; 次为新丰江台(距大坝约200公里), 1960年10月开始观测。上述台站的观测结果, 也未发现库区有地震活动。据此, 库区可谓“无震区”。

2. 水库蓄水后地震观测情况

库区最早的地震仪器观测资料始于1970年1月, 即水库截流蓄水11个月之后。当时, 设在英德的流动地震台(距大坝约75公里), 开始记到库区的地震活动。为监测地震动向, 当年3月, 将该台迁到乳源县城西北, 距南水水库大坝约一公里, 改称南水地震台。该台可记录库区 $M_L \geq 0$ 级以上地震。观测时间自3月底起, 至1971年1月底止。

此后, 根据建设区域地震台网需要, 将南水台迁至韶关市北郊, 改称韶关地震台。该台距南水水库大坝约35公里。在此前后, 龙川黎咀地震台、从化和肇庆地震台等相继建立。因距库区较远, 仅能测定 ≥ 1.8 级地震的参数。

由上可见, 库区地震记录不系统, 也不完整。它不仅给地震活动性的详细研究带来困

表1 南水水库区 $M_L \geq 2.0$ 级地震简目(1970.1~1990.2)

Table 1 The earthquakes of $M_L \geq 2.0$ in Nanshui reservoir (1970.1—1990.2)

序 号	发 震 时 间 年 月 日	震 级		序 号	发 震 时 间 年 月 日	震 级	
		M_L	M_S			M_L	M_S
1	1970 1 7	2.8	2.2	24	1970 7 6	2.0	1.2
2	1970 1 9	2.1	1.3	25	1970 7 7	2.4	1.7
3	1970 1 9	2.0	1.2	26	1970 7 12	2.1	1.3
4	1970 1 9	2.1	1.3	27	1970 7 26	2.0	1.2
5	1970 1 29	2.6	1.9	28	1970 10 9	2.3	1.6
6	1970 1 29	2.7	2.0	29	1970 10 12	2.9	2.3
7	1970 1 30	2.5	1.8	30	1970 11 14	2.2	1.5
8	1970 2 2	2.3	1.6	31	1971 8 1	2.1	1.3
9	1970 2 12	2.1	1.3	32	1971 8 28	2.3	1.6
10	1970 2 18	2.5	1.8	33	1972 4 30	2.0	1.2
11	1970 2 22	2.1	1.3	34	1972 5 26	2.4	1.7
12	1970 2 26	3.0	2.4	35	1972 6 14	2.2	1.5
13	1970 2 26	2.6	1.9	36	1972 12 17	2.4	1.7
14	1970 3 9	2.2	1.5	37	1973 2 13	2.0	1.2
15	1970 4 27	2.3	1.6	38	1973 4 3	2.3	1.6
16	1970 4 27	2.5	1.8	39	1973 10 10	2.3	1.6
17	1970 4 27	2.1	1.3	40	1973 11 19	2.2	1.5
18	1970 5 8	2.3	1.6	41	1973 11 19	2.4	1.7
19	1970 5 29	2.2	1.5	42	1974 8 24	2.4	1.7
20	1970 5 30	2.8	2.2	43	1975 1 16	2.7	2.0
21	1970 6 9	2.2	1.5	44	1975 10 1	2.5	1.8
22	1970 6 14	2.2	1.5	45	1975 10 1	2.9	2.3
23	1970 7 1	2.0	1.2	46	1982 3 8	2.5	1.8

* 除注明者外, 本文所用震级, 均为 M_L 震级。

难,也使地震活动随蓄水过程的变化、震源机制及测震学的其他方面的详细研究受到限制。

3. 水库蓄水后库区的地震活动^[3]

1969年2月水库截流蓄水后,库水位急速上升。至当年9月,库水位达到207米高程(下闸前,坝前水位为151米高程),坝区工地的技术人员开始感受到发生在库区的地震活动。至1970年1月,库水位升至210.5米高程,英德地震台开始记录到库区的地震活动。据统计,至1990年2月,仪器记录的库区地震共622次,其中, ≥ 1.0 级者260次, ≥ 2.0 级者46次,最大地震为1970年2月26日发生的3.0级地震(表1)。上述地震,绝大多数发生在1970年内。此后,地震活动水平明显下降;1982年3月以后基本停息。

对库区居民感震情况调查结果——北部及中部的居民有震感(一般反映地震有声;地动人晃,门窗格格作响;卧者感觉床动人摇),而南部的居民无感——表明,地震活动分布于库区北、中部。这与地震台网测定的震中分布相吻合。震源深度较浅。

综合分析发现,库区的地震活动有下述特点:

- ①在时间上,地震活动出现于水库蓄水之后,且主要发生在水库蓄水初期;
- ②在空间上,地震活动局限于库区,且集中于石灰岩分布地段;
- ③震源较浅,因此较小的地震,当地居民也有较明显的感觉;
- ④在水库蓄水初期,地震活动与水库水位有较密切的关系(图2)。

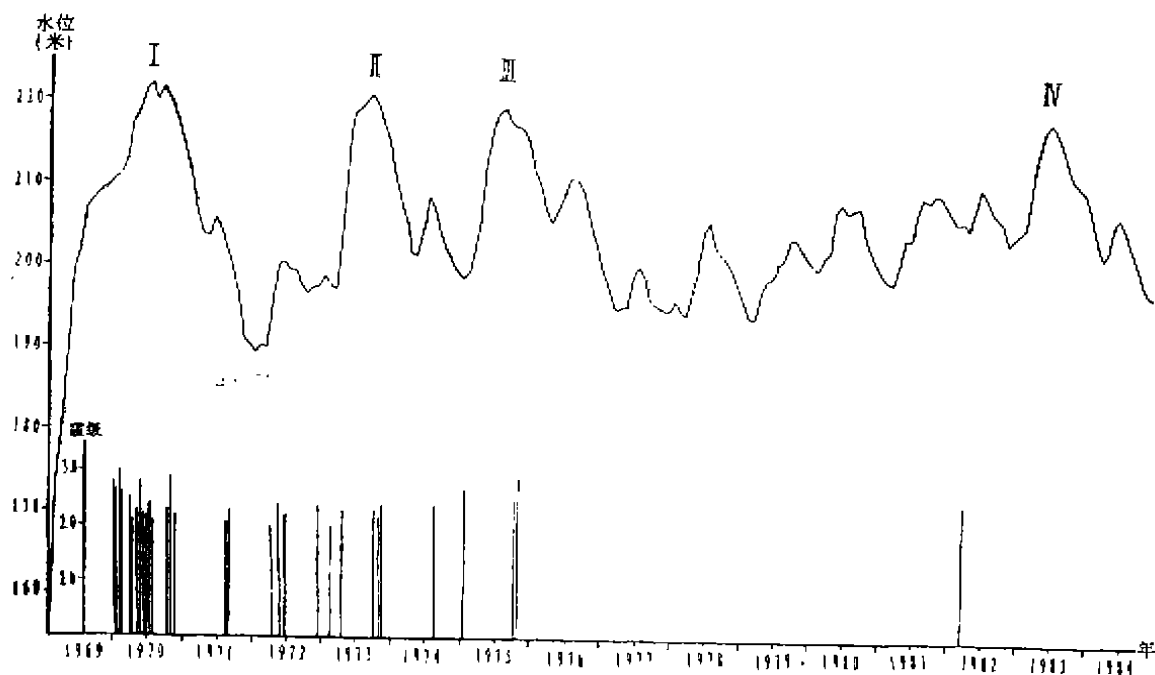


图2 南水水库地震与水库水位的关系

Fig. 2 The relations between reservoir earthquake and its level in Nanshui reservoir

(取 ≥ 2.0 级地震,当月 ≥ 2.0 级地震较多时,取其中较大的两次为代表)

1969年3月至1970年11月,库水位迅速上升,形成第一个高水位(≥ 215 米高程)阶段,地震活动也达到高潮。此期间,共发生 ≥ 2.0 级地震30次。其中,3.0级、2.9级和2.7级地震各一次,2.8级地震2次。1970年12月至1973年3月水库水位较低,地震活动水平也相应较低。接着,库水位又迅速上升,至1973年底形成第二个高水位阶段,1975年6月至12月又形成第三个高水位阶段,地震活动均相应地有所回升,发生2.9级地震和其他4次 ≥ 2.0 级地震。

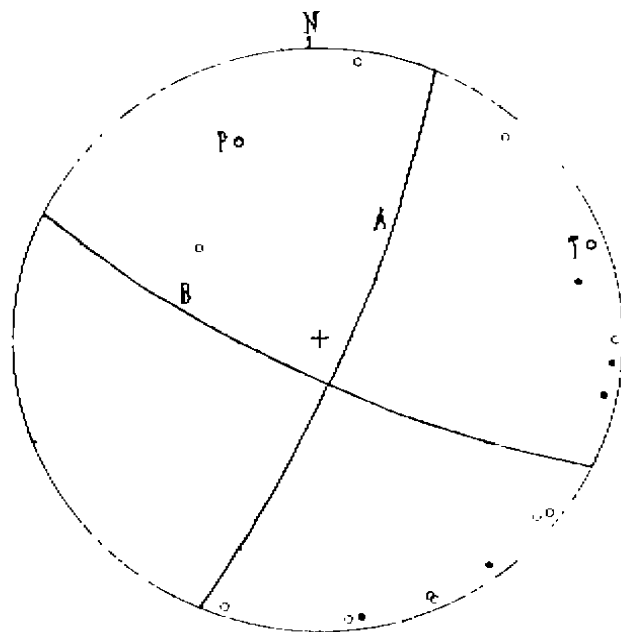


图3 南水水库地震的震源机制解
Fig. 3 Focal mechanism solution of
reservoir earthquake in Nanshui

果如图3所示。

尽管由于资料的限制,震源机制解的准确程度不高,但它仍提供了以下信息:南水水库地震的震源应力场与区域构造应力场的总体特征是吻合的;同新丰江等水库地震震例一样,区域构造应力场是南水水库诱发地震的制约因素;B节面可能代表了库区地震的断层面。

三、南水水库地震的发展趋势

南水水库自截流蓄水以来,已经21年有余。未来地震发展趋势如何?试从以下诸方面分析。

1. 从库区地震活动的衰减情况分析

①每年释放的应变能变化情况。地震活动的过程是地壳中原已积累的应变能释放的过程。如以本库区整个地震序列释放的应变能为100%计。统计分析发现,1970年所释放的地震应变能竟占65.4%。此后,呈波浪式起伏衰减。在衰减过程中,有两个较突出的“波峰”,

⑤地震活动衰减缓慢。整个序列延续的时间长达十余年,其中高潮期约7个月。相比之下,1970年4月、7月和9月发生在水库附近的龙门、台山和清远的一般构造地震,衰减速度要快得多。它们的整个地震序列延续的时间均不到3个月,活动高潮均不足20天。

⑥余震b值较高。南水水库余震b值为0.95,与新丰江、卡里巴等水库地震接近;龙门、台山和清远余震b值分别为0.72、0.62和0.71,与一般构造地震相当。

对照国内外水库地震震例^[4],综合分析认为,南水水库区的地震活动属于水库诱发地震。

为了探讨南水水库地震的震源应力场,系统查阅了广东区域地震台网记录,并尽可能利用了湖南南部地震台站记录。最后,采用5次 ≥ 2.2 级地震的P波初动,做了迭加震源机制解,其结

即1972年和1975年，释放的能量分别占8.6%和15.6%。近8年，能量释放趋于零。从21年来库区地震活动的实际情况分析，未来地震活动很可能遵循图4给出的上限衰减公式，即

$$\text{Log } E_{\text{max}} = 3.965 - 0.797 \text{Lg} T.$$

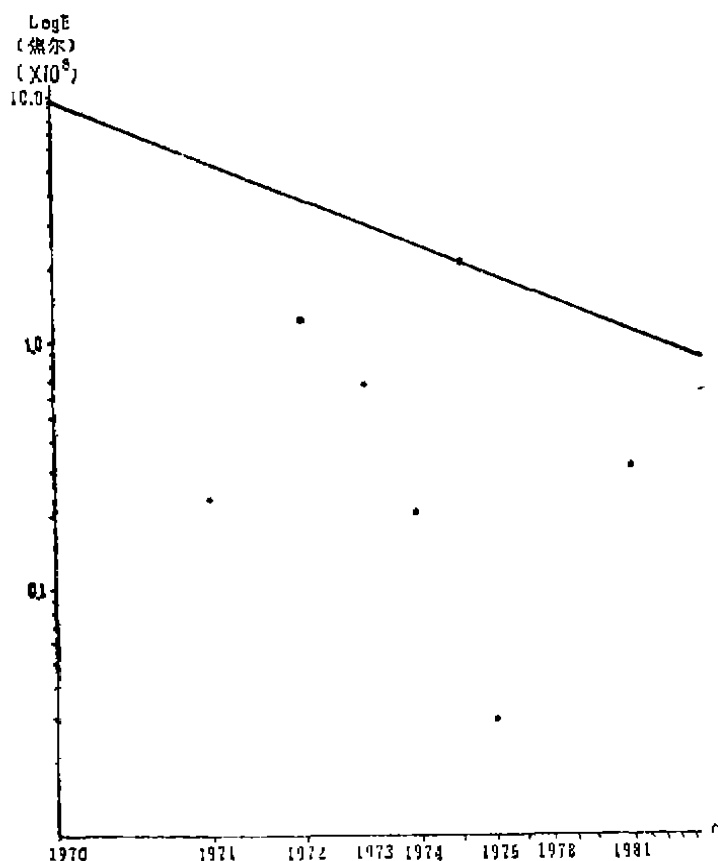


图4 南水水库地震能量释放随时间的变化

Fig. 4 Time-Variation of earthquake energy released in Nanshui reservoir

也就是说，未来诱发的最大地震将小于3.0级。式中 T 为自1970年算起至未来发展年份的年数。

②每年发生 ≥ 2.0 级地震次数的变化情况。1970年共发生 ≥ 2.0 级地震30次，占整个序列同类地震总数的65%。此后，呈波浪式的逐步衰减。自1983年以来，再无 ≥ 2.0 级地震发生。

2. 从地震活动与水库水位的关系分析

由图2可见，南水水库自截流蓄水至今，先后出现过4次高水位阶段。在蓄水初期，尤其是第一、二个高水位阶段，地震活动与库水位的对应关系较好，较高的水位或较大的水位变化，往往伴随较高水平的地震活动。但是，自1976年即第三个高水位阶段之后，上述对应关系消失。无论高水位抑或较大的水位变化，均未能改变地震活动逐步衰减的总趋势。

对国内外水库地震震例研究结果表明，水库的诱发作用，通常只在一段时期内起作用；最大地震多发生在最初的高水位阶段；对正常蓄水的水库而言，诱发的最大地震一般发生在水库开始蓄水的头5年内（表2）。此后，更高的水位，虽然有的伴随地震活动水平的回升，但不改变逐步衰减的总趋势（图5）。

3. 从地震序列特征分析

南水水库地震属于震群型序列。震群型序列的主要特点是，没有突出的主震；应变能主要通过几次震级相近的地震释放，最大地震在全序列中所占能量比例一般小于80%（南水水库为小于20%），前震、余震与主震震级一般相差0.3~1.0级^[6]。据此，南水水库已发生的最大地震为3.0级，如今后发生地震，通常不会超过4.0级（ $M_s 3.5$ 级）。

4. 从水库参数与诱发的最大地震的相关性分析

常宝琦对国内外大量诱震水库进行过系统的研究^[6]，得出了水库参数与诱发地震的最

表2. 水库诱发地震震例简表

Table 2 The events of reservoir induced earthquakes

库(坝)名 及所属国家	坝 高 (米)	开始蓄水 时 间	初次发震 时 间	诱发最大地震	
				时 间	震级(Ms)
新丰江, 中国	105	1959.10	1959.11	1962.3.19	6.1
柘林, 中国	63.5	1972.1		1972.10.14	3.2
克里马斯塔, 希腊	165	1965.7	1965.12	1966.2.5	6.2
米德湖, 美国	221	1935	1936.9	1939.5.4	4.6
本莫尔, 新西兰	118	1964.12	1965.12	1966.7	4.5

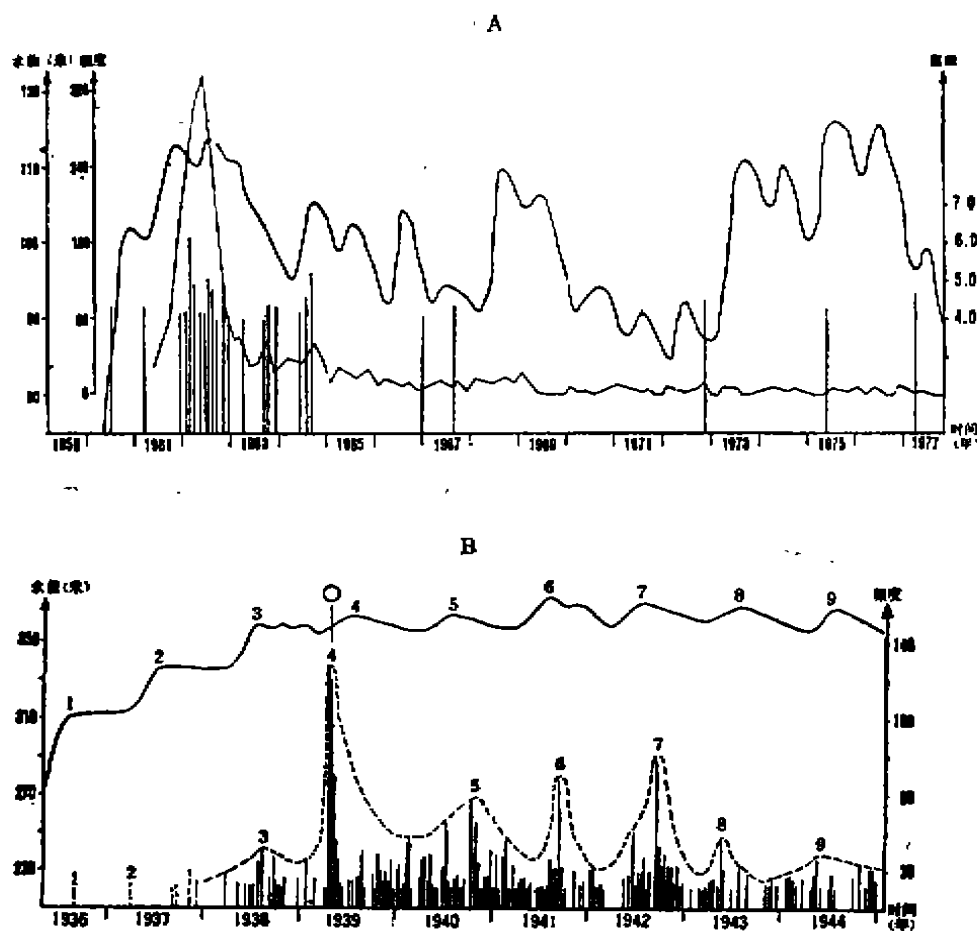


图5 新丰江、米德湖水库地震与水库水位的关系

A. 新丰江水库——地震频度为 $M_s \geq 2.0$ 级地震数的两月平均值；地震强度取每月 ≥ 4.0 级地震中的最大者；库水位也为两月平均值。

B. 米德湖——地震频度为每10日发生的地震次数（本图取10次以上者）；水位曲线上的圆圈表示诱发的最大地震，其下的竖直短线标示发震时间与相应水位（引自H. K. Gupta等，稍加修改）。

大震级的关系式为:

$$M = 0.338 + 1.291E \pm 0.73$$

式中, 0.73为震级标准偏差, E为综合影响参数。E与水库面积S、库容V和最大库深H的关系为: $S = E \frac{V}{H}$

通过上式, 计算分析得出的最大震级为Ms3.7级。

5. 从南水水库地震形成的条件分析

水库座落在向南倾伏的向斜构造轴缘的南端。库域北部及中部广泛分布石灰岩, 断裂节理及岩溶较发育; 东、南、西部被透水性差的变质岩、砂页岩和花岗岩所包围。上述圈闭的水文地质环境, 为库水向深部渗透提供了良好条件。

较为活跃的区域构造应力场和构造应变能的积累, 是南水水库诱发地震的又一重要条件。1969年至1972年间, 在水库周围地区相继发生阳江Ms6.4级、龙门Ms3.9级、台山Ms3.4级和河源Ms4.5级等地震, 是区域构造应力场较为活跃的佐证。

国内外水库地震的研究成果表明, 水库诱发地震的强度, 主要取决于当地的构造条件, 特别是构造应变能的积累水平和库区介质条件。南水水库所在的粤北地区, 相对于沿海地区而言, 构造应变能积累水平较低。库区岩石介质比较破碎和不均匀(介质品质因素Q值 ≈ 100), 不利于蕴育大地震。加之, 随着蓄水过程的发展, 构造应变能不断地释放, 库水的渗透逐渐地趋于其极限程度, 相应地诱震作用也逐步减弱。在这种情况下, 如果出现超过历史最高水平的水位, 或区域构造应力场的活动加强, 虽然还可能引起库区应力场的调整, 伴随新的地震活动, 但一般不会改变库区诱发地震逐步衰减的趋势。

综上所述, 自南水水库蓄水以来, 发生在库区的地震活动属于水库诱发地震; 未来诱发地震不会超过Ms3.7级, 且很可能小于M_L3.0级, 对大坝的影响将低于地震烈度Ⅵ度。

参加本项目工作的有冯绚敏、薛佳谋、孙丽英、谢明富和李宏等。工作中得到南水水电厂和省地震科技咨询服务中心的大力支持。肖海提供了零陵和茶陵地震台的有关资料。在此一并致谢。

参 考 文 献

1. 国家地震局广州地震大队, 中国大地构造概要, 地震出版社, 1977.
2. 王岳伯、沈叔敏, 粤北区域构造的分析, 地质力学论丛, 第2号, 科学出版社, 1964.
3. 王安予、潘建雄, 浅析南水水库的地震活动, 中国诱发地震, 地震出版社, 1984.
4. 王安予, 水库诱发地震若干震例的初步分析, 水文地质工程地质, 第3期, 1982.
5. 包叔芳、刘宝诚等, 地震学教程(下册), 地震出版社, 1980.
6. 霍宝琦, 水库地震最大震级的预测, 华南地震, 第9卷, 第4期, 1989.

THE RESERVOIR EARTHQUAKE IN NANSHUI AND ITS DEVELOPING TENDENCY

Xiao Anyu

(Seismological Bureau of Guangdong Province)

[Abstract] The seismicities which occurred after the impoundment of Nanshui reservoir belong to the reservoir induced earthquakes. Their sequences of events are small swarms and the magnitudes of induced earthquakes in the future will be lower than $M_s=3.7$, which will not affect the safety of the dam.

.....

(上接第55页)

是库周区域产生不同程度影响的水库地震。加强地震监测工作十分必要,进一步开展诱发地震机制的研究已刻不容缓,当前需要从实际出发,制定科学的、可行的技术方案,保证必要的经费来源。

经过认真的学术讨论和对库区的实地考察,与会代表就如何加强东江水库的地震监测和诱发地震工作,发表了许多意见,主要有四个方面:一是要继续开展和加强地震观测,需要在库区4个监测站的基础上再增加1至2个临时台,其中配置三分向地震仪一台;还要在其外围郴州市郊增建一个中心台。这些台网要与全省区域台网沟通,以提高其监测能力,获得诱发地震的基础资料。二是要加强工作协调,理顺现有的管理体系。各有关部门和单位都要本着对工程、对库区人民高度负责的精神的通力合作,共同做好地震监测、科研等工作。三是针对目前水库诱发地震的认识水平以及库区条件、拱坝特点,有关部门要加强对东江水库地震发展趋势和诱发地震的地段、时间等课题的研究,对大坝抗震能力进行复核,作出震灾预测,以便指导水库地震监测工作的有效实施。四是各级政府和地震管理部门要适当加强地震知识的宣传工作,提高库区及库周群众的防震抗震意识,既不要造成人为紧张,也不要麻痹大意。一旦发生地震,要及时采取有效的应急措施,做到临震不乱。库区群众要积极支持开展地震监测和科研工作。

与会同志认为,这次研讨会开得比较好,对加强东江水库的地震工作,将起到积极的推动作用,建议今后在适当的时候再次召开这样的研讨会。

(杨奇特)