

世界水库 诱发地震研究文集

SHIJIE SHUIKU YOUFA DIZHEN YANJIU WENJI

徐光宇 李白基 秦嘉政 徐彦 译校

■ 云南出版集团公司
■ 云南科技出版社



云南省“十五”项目《澜沧江流域重大水利枢纽工程诱发地震监视与研究》资助

世界水库诱发地震 研究文集

徐光宇 李白基 秦嘉政 徐彦 译校

云南出版集团公司
云南科技出版社
· 昆明 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

世界水库诱发地震研究文集/徐光宇等编译. —昆明:
云南科技出版社, 2006. 11

ISBN 7-5416-2443-8

I. 世... II. 徐... III. 水库—诱发地震—研究—
世界—文集 IV. P315.4-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 133529 号

云南出版集团公司

云南科技出版社出版发行

(昆明市环城西路 609 号云南新闻出版大楼 邮政编码: 650034)

云南省地质矿产勘查开发局印刷厂印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm × 1092mm 1/16 印张: 25.5 字数: 580 千字

2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷

定价: 78.00 元

内容简介

本书是有关国内外水库诱发地震研究的选编文集，涉及到全球许多著名水库诱发地震的监测与研究成果，收集的每一篇文章堪称该领域的经典性研究文献，且独立成篇。较全面地介绍了国内外水库诱发地震重要的观测结果、机理研究及解释方法，其中包括水库诱发地震活动机制、触发成因、断层相互作用、震源参数以及地震危险性预测分析方法等内容，展现了全球水库诱发地震研究领域多学科交叉研究的新进展。

本书可供从事地震学、地质学、地球物理学、工程地震学的科技工作者以及大专院校有关专业师生参考。

序

水库诱发地震是一类特殊的地震活动，这一类地震活动与库区的蓄水和排水过程有关。自从1938年希腊阿里洛斯河上修建的马拉松（Marathon）水库观测到一次 $M5.0$ 级水库诱发地震以来，迄今为止全世界已发生了100多例水库诱发地震（RIS），我国也报道了有20多例水库诱发地震。水库诱发地震产生的显著震灾特点表现为强度弱、烈度高、破坏重。例如我国的新丰江水库诱发的6.1级地震和印度柯依纳水库诱发的6.5级地震，引起了严重的地震灾害，造成巨大的经济损失和人员伤亡。随着社会经济发展的需求，许多大中型水库电站如雨后春笋般建设起来，水库诱发地震对重要水利枢纽工程的地震安全问题，越来越引起人们的广泛关注和重视。云南拥有丰富的水利水电资源，开发这些资源是保持云南经济可持续发展的重要经济支柱之一，做好云南“三江”水电资源开发的地震安全问题，受到政府的高度重视。开展水库诱发地震的监测、预测与预警研究，直接为国民经济建设服务，具有重要的现实意义和科学意义。自Carder（1945）最早指出美国米德湖（Lake Mead）水库诱发地震活动与水载荷有关以来，国内外对水库诱发地震进行了长期多学科的观测与研究，积累和发表了大量的相关文献。为借鉴和参考国外的研究进展，推进国内的水库诱发地震研究工作，我们检索查阅了大量国外期刊和RIS数据库，从中选出经典文献21篇，翻译汇编出版，以供国内研究者参考。

首先，21篇文献从研究内容上归纳为三个方面：一是对世界上已发生的有重要影响的水库诱发地震震例的研究，例如印度柯依纳（Koyna）水库、塔吉克斯坦努列克（Nurek）水库、加拿大马尼克3（Manic3）和LG3水库、埃及阿斯旺（Aswan）水库、美国蒙蒂赛洛（Monticello）水库和洛维尔湖（Lake Orovi 11）水库以及赞比亚与津巴布韦之间的卡里巴湖（Lake Kariba）水库诱发地震的监测与研究等。二是对一些国家水库诱发地震研究进展的述评，如“巴西的水库诱发地震”和“中国的水库诱发地震”。三是对水库诱发地震的分类、特征、机制和成因等进行的研究。

其次，给出了1993~2004年发表在国内外期刊上的水库诱发地震的研究文献题录（209篇）和摘要（168篇）两个附录，以便于读者对我国最近14年来水库诱发地震文献进行查找，并对研究进展有一个大体了解。

由于国外已发表的水库诱发地震文献的内容和数量极为丰富和庞大，如加拿大诱发地震研究组的诱发地震文献数据库（CISRG Database）包括了800多篇有关文献，在对大量文献进行检索和选题时，主要考虑了有重要影响和研究较多并具代表性的水库诱发地震震例，被反复引用、引用频次较高的经典文献，还同时选择了有不同观点的文献。

在翻译中，涉及的外国地名一律按“世界地名译名手册”（辛华编，商务印书馆出版）译出，少数地名按已俗成的翻译，并在首次出现时给出原文；外国人名一律用原

文；每篇译文的编排按国内正式出版的学术文献编排格式处理，原文段落未编号的，译成中文时分别作了段落编号以便于阅读；插图中个别图件做了少量修改，以符合国内的出版习惯；为保持文献的完整性，每篇论文所附的参考文献仍予以保留，以便读者进一步地查阅参考。

译文工作是在云南省地震分析预报研究中心主任、省“十五”重点项目“澜沧江流域重大水利枢纽工程诱发地震监视与研究”课题组负责人秦嘉政研究员组织下完成的，徐光宇承担了文献的检索和选题工作，徐光宇、李白基、秦嘉政、徐彦参加了各篇文献的翻译和校对工作，秦嘉政审校了全部译稿，于光承担了插图的绘制工作。参加编辑校审工作的主要成员还有钱晓东、刘丽芳、邬成栋、毛慧玲等。其次，在完成本工作的过程中许多有关的业务问题与云南省地震局局长皇甫岗研究员以及张建国、黄雍、谷一山等有关专家进行了多次讨论交流，云南省地震局“十五”项目协调办张俊伟、王琼伟等同志非常关心该项目进展。得到他们的有力支持和帮助，在此表示衷心的感谢。工作中虽然尽了最大努力，但由于译者水平所限，译文中仍不免会有错误和疏漏之处，敬请读者批评指正。

秦嘉政 徐光宇

2006年6月

目 录

水库诱发地震的特征	Pradeep Talwani (1)
卡里巴湖负载诱发地震—II	D. I. Gough W. I. Gough (17)
以柯依纳地震为重点的水库诱发地震研究现状	Harsh K. Gupta (38)
印度柯依纳地震的震源参数	Prantik Mandal B. K. Rastogi C. S. P. Sarma (58)
两类水库诱发地震	D. W. Simpson W. S. Leith C. H. Scholz (71)
南卡罗来纳蒙蒂赛洛水库蓄水后的初始地震机制	Linyue Chen Pradeep Talwani (85)
中国的水库诱发地震	Linyue Chen Pradeep Talwani (105)
埃及阿斯旺地区的地震活动	Mohamed Awad Megume Mizoue (119)
埃及阿斯旺水库的诱发地震与水位变化	D. W. Simpson A. A. Gharib R. M. Kebeasy (132)
1982 ~ 2001 年埃及阿斯旺水库地震活动的长期持续衰减	M. Mekkawi J. R. Grasso P. A. Schnegg (143)
魁北克马尼克 3 水库的诱发地震	Gabriel Leblanc F. Anglin (158)
(前) 苏联塔吉克斯坦努列克水库的诱发地震	D. W. Simpson S. K. Negmatullaev (173)
巴西的水库诱发地震	Marcelo Assumpcao Vasile Marza Lucas Barros Cristiano Chimpliganond Jose Eduardo Soares Juraci Carvalho Daniel Caixeta Alexandre Amorim Edmar Cabral (194)
触发南卡罗来纳蒙蒂赛洛水库地震的弹性, 无排水和排水响应作用	Kusala Rajendran Pradeep Talwani (211)
阿斯旺、努列克和柯依纳水库的确定性混沌特征	H. N. Srivastava S. N. Bhattacharya K. C. Sinha Ray S. M. Mahmoud S. Yunga (227)
加拿大魁北克詹姆斯湾 LG3 水库的诱发地震活动	F. M. Anglin G. G. R. Buchbinder (232)
孔压扩散与水库诱发地震机制	Pradeep Talwani Steve Acree (243)
柯依纳地震及对柯依纳大坝的损坏	Anil K. Chopra P Chakrabarti (260)
通过控制印度柯依纳水位减轻诱发地震灾害: 一项建议	Harsh K. Gupta (275)
水库诱发的孔压和应力强度变化及其在奥洛维尔湖的应用	M. Lee Bell Amos Nur (279)

水位周期性起伏导致水库下断层稳定性变化	EvelynA. Roeloffs (303)
附录一 1993 ~ 2004 年国内水库诱发地震期刊文献题录	(330)
附录二 1993 ~ 2004 年国内水库诱发地震期刊文献摘要	(340)

水库诱发地震的特征

Pradeep Talwani

摘 要 在大部分水库诱发地震的例子中,地震活动跟随蓄水,湖水位的较大变化,或随后在此前达到的最大水位以上注水而发生。我们把这种地震活动分类为初次地震活动。这种“初次地震活动”归因于水库对初次注水或水位变化的耦合孔弹响应。它具有地震活动增加超过蓄水前水平,地震震级大,在水库最深部分下面一般是稳定的和(通常)缺乏地震活动,地震活动分散在水库边缘地带和从一个或一个以上方向向外迁移的特征。地震的数目和震级随时间发展而下降,地震活动恢复到蓄水前水平。某些水库在几年后地震活动持续活跃,而在另一些水库则没有地震活动发生。二维[类似 Roeloffs (1988) 的工作]计算的初步结果表明,这种“延长的地震活动”依赖湖水水位变化的频度和幅度,水库大小和底层的流体力学性质。强度变化显示出与湖水水位变化对应的延迟。更长的水位变化周期(~ 1 年)比短期水位变化更易引起更深更大地震。地震能发生在湖水水位变化相差不大或湖水水位变化占最低水深度大部分的水库。大水库的地震活动可能比小水库的地震活动更分散更深。在水库最深部下面和周围地区都观测到诱发地震活动。水库下面和附近断层作用的特征制约地震活动的位置。

关键词 水库诱发地震机制,柯依纳,蒙蒂赛洛水库,米德湖

引 言

自从认识到(20世纪)40年代早期米德湖的蓄水与地震活动存在因果联系以来(Carder, 1945),已在世界范围超过70个地方观测到水库诱发地震(RIS)(Simpon, 1976, 1986; Gupta, 1992)。随着(20世纪)60年代在印度柯依纳,中国新丰江,津巴布韦卡里巴和希腊克里马斯塔发生破坏性水库诱发地震后,地震监测有了极大改进。在(20世纪)70年代,在几个水库附近布设了地方台网。这些台网得到较低的检测界限和提高了记录的地震活动的定位精度。补充的野外调查研究得以认识控制观测到的RIS的因素。这些因素包括周围应力场状况,破碎带的存在,下伏岩石的流体力学性质,区域地质学以及水库大小和湖水水位波动特征。

作为积累的RIS案例记载,水库载荷对现有应力场的影响已成为一些研究的主题(Snow, 1972; Bell and Nur, 1978; Talwani and Acree, 1984; Simpson, 1976, 1986;

Simpson *et al.*, 1988; Roeloffs, 1988; Rajendan and Talwani, 1992)。除了 Roeloffs (1988) 的研究外, 所有研究都致力于与水库初次蓄水联系的地震活动。但还有一些其他情况, 初次蓄水几年后才观测到延长和“显著”的地震活动。这里的“显著”指地震活动的数量和震级都比蓄水前的水平更多更大。在这些例子中的地震活动似乎与水位波动有关。印度柯依纳蓄水 30 年后持续的地震活动; 米德湖在观测到初次地震活动后, 超过 30 年观测的地震活动及其范围缩小以及南卡罗来纳乔卡西湖和蒙蒂赛洛水库目前的地震活动都是这种延长的 RIS 的例子。

1 初次和延长的地震活动

我们把水库的地震响应分为两个时间类。广泛观测到的第一类与初次蓄水或湖水位的较大变化有关。这一类也适用于与超过当时达到的最高水位的湖水位增加有关的地震活动。我们把这类 RIS 称为“初次地震活动”。第二类地震活动较少观测到, 它们在初次注水的影响减小后发生。它持续多年, 频度和震级都未减小。我们把它称为“延长的地震活动”。

初次地震活动因加载(或卸载)的瞬间作用和孔压扩散的延迟作用而发生。地震频率和震级跟随这个初次活动增加。与之有关的最大地震一般发生在水库完成蓄水、达到最大水位之后。注水开始与较大地震发生之间的延迟时间, 从数月到数年不等, 与水库和局部场地特征有关。空间上, 在水库最深部以下一般是稳定的, 通常没有地震活动发生, 地震活动分散在水库边缘, 从一个方向或多个方向向外迁移。地震活动增加期后跟随着地震活动逐步衰减(数月到数年), 减小到蓄水前水平, 表明对蓄水的耦合孔弹响应已停息。

在延长的地震活动情况中, 模型提出, 引起地震活动的孔压增加与湖水位变化的频度和幅度有关(Roeleffs, 1988)。孔压的峰值变化出现在湖的正下方, 离开湖变化减小。强度变化显示了与湖水位对应的延迟。在这一类中, 地震与湖水位上升大, (或)上升快和水位变化期长(频度低)的水库有关。在水库最深部下面和周围地区都观测到了地震活动。地震活动持续几十年都未平息。

控制这两类 RIS 的时空类型的因素是不同的。本文将探讨这两类 RIS 的特征。

2 对水库蓄水的孔弹响应

Bell 和 Nur (1978) 用以下方程定义强度变化 ΔS :

$$\Delta S = \mu_f(\Delta\sigma_n - \Delta p) - \Delta\tau \quad (1)$$

其中, $\Delta\tau$ 和 $\Delta\sigma_n$ 分别为断层面上的剪应力在滑动方向的变化和穿过断层的压缩正应力的变化; μ_f 和 ΔP 分别为摩擦系数和孔压变化。当 ΔS 下降到临界值水平以下时破坏发生。从方程(1)中, 我们注意到 $\Delta\sigma_n$ 下降(卸载)或孔压增加会造成 ΔS 的下降。可以把蓄水的时间影响分为两部分, 瞬间影响和延迟影响(我们使用 Rice 和 Cleary (1976) 的孔弹处理, 在其处理中, 假设固相和液相都可压缩)。

瞬间影响是由于对载荷的弹性和无排水响应。延迟影响是因排水响应和扩散引起的孔压变化。其结果是上述不同响应的耦合响应。这些响应表示在图 1 中。Pajjendran 和 Talwani (1992) 评述了不同的影响。为了在这里介绍一个综合评论, 与野外观测做比较, 下一节为从他们的论文中抽取出来的内容, 与图 1 一起说明。

2.1 弹性响应

对载荷的地下弹性响应引起断层面上正应力和剪应力的变化。在假设各向同性的条件下, $\Delta\sigma_n$ (图 1b) 模拟水库载荷曲线 (图 1a), 变化为瞬间变化。一般情况下, 正应力增加使该地区特别是水库下面趋向稳定 (增加 ΔS)。比较米德湖观测到的 RIS 与复测水准发现的海拔变化时提供了这种例子。在 (20 世纪) 30 年代末和 40 年代初, 随着胡佛大坝后面米德湖的蓄水, 观测到强烈的地震活动。Carder 和 Small (1948) 发现震中位于水库边缘附近, 与因米德湖的最大地壳载荷地区无关。

2.2 无排水响应

我们借用土力学的术语, 根据土力学的说法, 如果岩石样品遭受围压变化, 孔隙流体被阻止逸出或进入, 则无排水状况占优势地位。在水库蓄水的情况, 因在地表增加载荷, 在底层将出现孔压瞬间增加。如果不允许流体流动, 例如在充满黏土的裂隙, 将有孔压增加 ΔP_u 。这个因无排水响应的孔压增加 ΔP_u , 将一直保持到流体消散进入周围的裂隙。无排水响应由下式给出

$$\Delta P_u = B\sigma_{kk}/3 \quad (2)$$

其中 B 为 Skempton 常数, σ_{kk} 是平均应力。如果存在阻塞的裂隙, 临界值以下时, 地震活动发生 (阴影图形)。直条图形 (f) ΔP_u 能随载荷 (图 1c 中 P_1 到 P_2) 显示与蒙蒂赛洛水库初次蓄水有关的“深”震百分数。

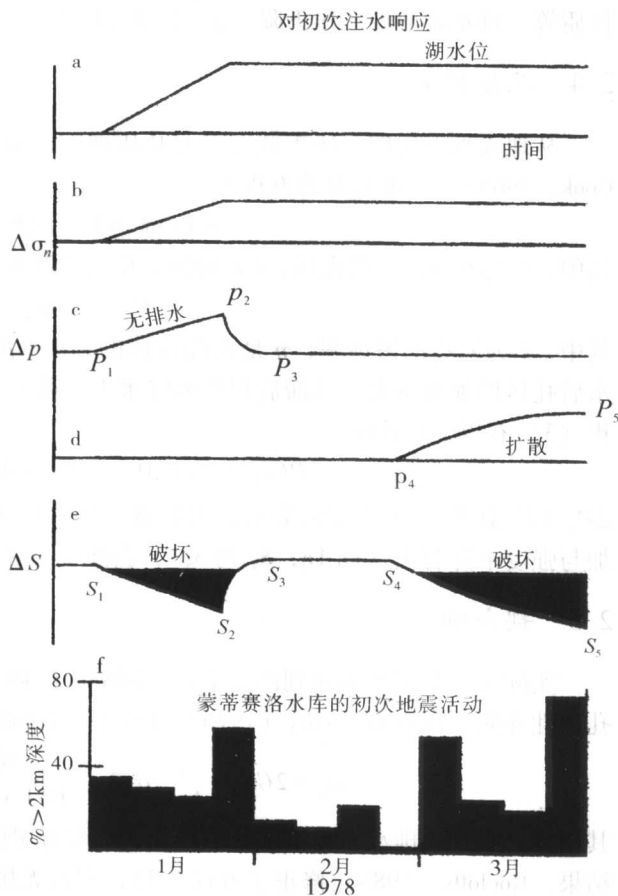


图 1 说明初次地震活动中观测过程的图形

(a) 表示水库的注水曲线, 与因载荷而引起的 $\Delta\sigma_n$ 增加 (b) 有关。在阻塞孔中的无排水响应引起孔压增加 (P_1 到 P_2) (c), 及强度的对应下降 (S_1 到 S_2) (e)。当孔未被阻塞时, 孔压增加消失 (P_2 到 P_3), 强度增加 (S_2 到 S_3)。当水库载荷引起的孔压前峰达到时, 孔压增加 [P_4 到 P_5 , (d)], 强度相应减小 [S_4 到 S_5 (e)]。当强度减小到低于临界值以下时, 地震活动发生 (阴影图形)。直条图形 (f) 显示与蒙蒂赛洛水库初次蓄水有关的“深”震百分数。

而增加,并一直保持到流动发生。在这种情况下,强度相应减小(S_1 到 S_2),当强度减小到低于临界值以下时,导致破坏发生。

2.3 排水响应

当孔隙流体能进入或离开时,排水响应发生,孔压降到原先值。在裂隙被阻塞的情况下,当流体离开裂隙,排水响应发生, ΔP_u 下降到零(图1c中 P_2 到 P_3)。排水响应相对初次蓄水被延迟,延迟依赖流体的流体力学性质和化学成分(因应力侵蚀),黏土性质等。排水响应使孔压下降, ΔS 增加(图1e中 S_2 到 S_3)。

2.4 孔压扩散

从地表到下层的孔压扩散也引起孔压增加。压力流动受扩散方程约束(Jaeger and Cook, 1969)。一维情况的方程为:

$$\delta^2 P / \delta z^2 = 1/C(\delta P / \delta t) \quad (3)$$

其中, P 为在深度 z 的孔压, t 是时间, C 是扩散率系数。

$$C = k/\eta\beta \quad (4)$$

其中, k 为岩石的渗透率, η 是孔隙流体的黏度, β 是充满流体岩石的体积压缩率。蓄水后孔压增加被延迟,其滞后程度依赖水力扩散率 C (也即依赖渗透率 k)和距离。方程(3)有以下形式解

$$P(z,t)/P(0,0) = 1 - \text{erf}[z^2/4Ct]^{1/2} \quad (5)$$

ΔP_u (P_1 到 P_2)的增加消失后,因扩散(图1d, P_4 到 P_5)孔压可能增加。该孔压增加与强度下降有关(图1e, S_4 到 S_5),当强度下降到临界值以下时,地震发生。

2.5 耦合响应

实际上,我们所观测到的是上述不同响应的耦合响应。对于各向同性流体饱和的多孔弹性介质,Rice和Cleary(1976)计算了耦合响应:

$$\sigma_{ij} = 2G\varepsilon_{ij} + \frac{v}{1+v}\sigma_{ij}\delta_{ij} - \frac{3(v_u - v)}{B(1+v)(1+v_u)}P\delta_{ij} \quad (6)$$

其中, v 和 v_u 为排水和无排水的泊松比, G 为剪切模量。使用Rice和Cleary(1976)的结果,Roeloffs(1988)修正了方程(5),把因无排水响应涉及的项包括到方程中。对于在地表孔压的单位阶跃增加, $P(0,t) = H(t)$,Roeloffs计算了时间 t 后深度 z 处的孔压 $P(z,t)$ 。在一维情况,她发现:

$$P(z,t) = (1 - \alpha)\text{erfc}[z^2/4ct]^{1/2} + \alpha(H(t)) \quad (7)$$

其中,erfc是补余误差函数, $H(t)$ 是亥维赛单位阶跃函数, $\alpha = B(1 + v_u)/3(1 - v_u)$ 。所以耦合响应在蓄水时可能受到立即无排水响应的支配并主要受到随后的扩散影响。在经过足够时间后,在任何深度, $P(z,t)$ 趋近施加在地表上的载荷,孔压略有变化,RIS衰减到蓄水前的水平。

以上论点是作为各向同性条件下提出的。但存在破裂带,通常在破裂带上观测到RIS,清楚地表明各向异性条件占优势。在这种情况下,孔压增加能引起正断层环境中

垂直破裂地震和逆断层环境中水平破裂地震 (Chen and Nur, 1992)。

3 初次地震活动的例子

图 2 显示添加在月地震活动上的南卡罗来纳蒙蒂赛洛水库的蓄水曲线。蓄水 (~32m) 发生在 1977 年 12 月 3 日与 1978 年 2 月 8 日之间。此后, 湖水位保持在 1.5m 的平均水位内。“初次地震活动”持续数年, 然后开始衰减, 趋近蓄水前水平。

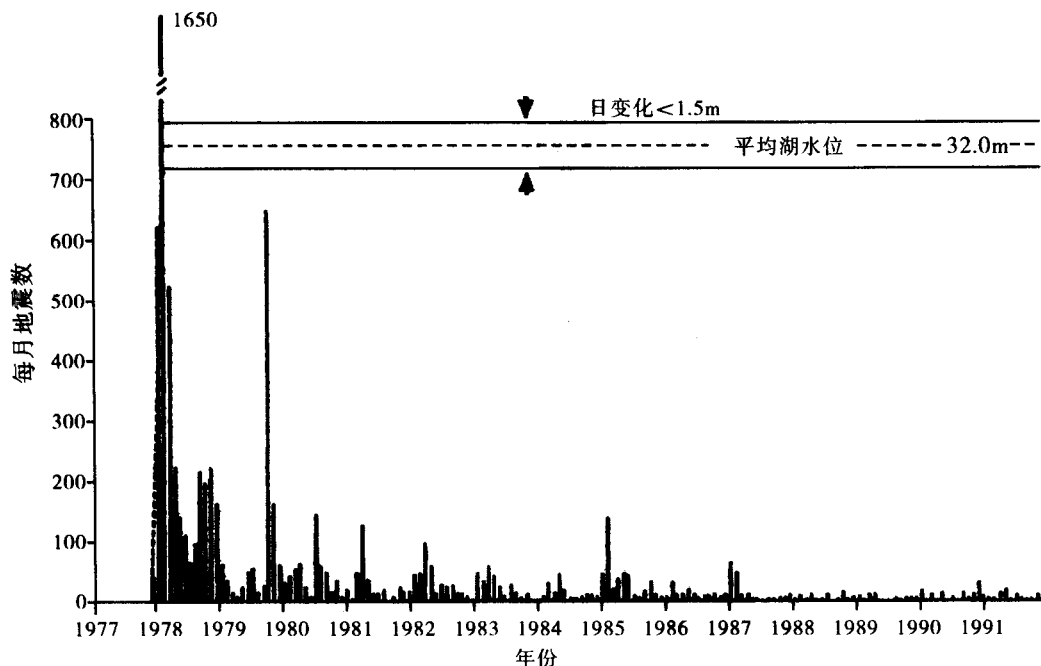


图 2 1977 年到 1991 年期间与月地震活动作比较的蒙蒂赛洛水库湖水位 (虚线)

地震的空间分布可以进一步深入了解初次地震活动的本质。大部分地震活动为浅源地震 ($z < 3\text{km}$)。我们预期载荷增加 $\Delta\sigma_n$, 于是在水库最深部下面出现最大增加 ΔS 。因而增加的孔压 (使趋向不稳定) 对水库周围有更大作用。1978 年蓄水后, 初次地震活动发生在水库最深部分周围 (图 3)。与蓄水有关的“更深”地震活动 ($z \geq 2.0\text{km}$), 提供了对无排水响应和扩散所起的相关作用更深入了解的机会。对于 $C \sim 10^4 \text{cm}^2/\text{s}$, 孔压向深处扩散的时间, 2km 为 ~46 天, 2.5km 为 72 天。1978 年 1 月, 30% 以上的地震活动深度超过 2km (图 1f)。我们把这次地震活动归结为因水库的无排水响应引起的孔压增加。1978 年 2 月, “更深”地震活动下降 ($< 10\%$)。这是由于增加的孔压发生了泄漏 (排水响应, 与图 1c 中 P_2 到 P_3 对应)。孔压下降引起强度增强, (ΔS 增加), 因而“更深的”地震活动下降 (图 1f)。1978 年 3 月 “更深”活动增加 ($> 40\%$), 是因扩散使孔压增加所致。

图 1f 显示了初次地震活动的不同方面。1978 年 1 月的地震活动是因无排水响应

(深震)和扩散(浅震)所引起。最初的无排水响应到1978年2月时消散,接着地震活动主要受扩散影响。初次地震活动位于水库最深部分以外。

1985年的地震活动突发位于水库最深部分下面。这次延长的地震活动的特征不同于初次的地震活动,将在下节叙述。

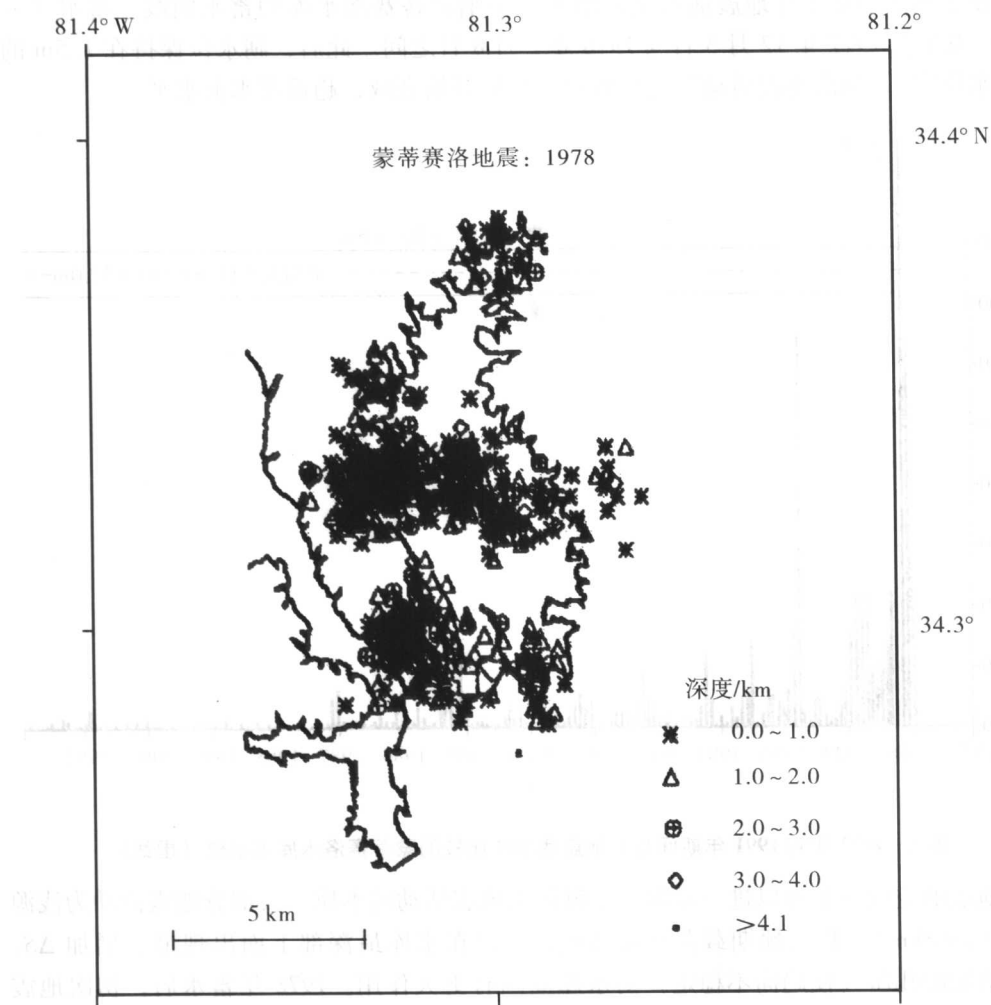


图3 1978年在蒙特塞洛水库附近观测到的地震活动

注意大部分地震位于两个条带内——水较浅的水库中部和水库西南岸及南岸。

在水库最深部分(和最南部)一般缺乏地震活动。

初次地震活动是一类最广泛观测到的RIS。对有充分资料的大多数例子的历史,可用初次加载的耦合响应,随后在达到的最高水位以上的加载及水位迅速变化来解释。这些例子包括米德湖(Carder, 1945), 努列克(Simpson and Negmatullaev, 1981), 马尼克-3(Leblanc and Anglin, 1978), 卡里巴(Simpson *et al.*, 1988), 新丰江(Shen *et al.*, 1974)和乔卡西湖(Talwani *et al.*, 1976)观测到的地震活动。在所有例子中,

地震活动的增加都超过了蓄水前的水平；较大地震跟随注水，地震活动衰减趋向蓄水前水平。在可得到精确数据的例子里，初次地震活动似乎发生在离开水库最深部位的地方，并向外迁移。

4 延长的地震活动

与初次地震活动不同，在某些水库，蓄水后地震活动持续数年甚至数十年。图 4 显示了 1961 ~ 1995 年间柯依纳的地震活动和湖水位。水库蓄水发生在 1962 年和 1964 年之间。地震持续在那里发生；1994 年 $M > 5.0$ 的地震是最新的地震活动。

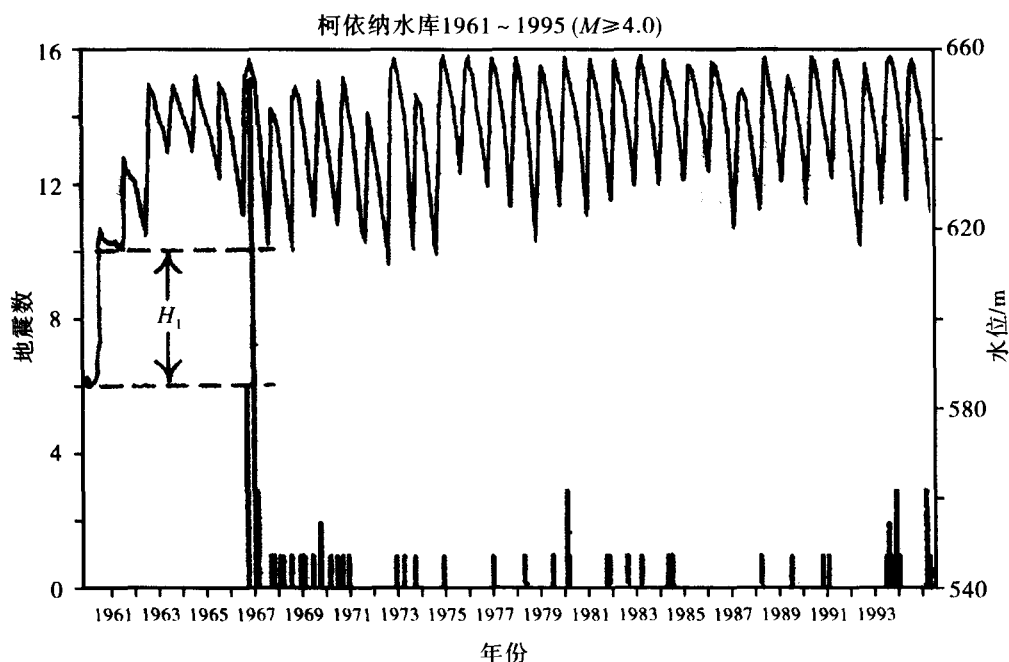


图 4 1961 到 1995 年期间与湖水位比较的柯依纳水库的月地震活动 ($M \geq 4.0$)

(取自 Talwani 等, 1996)

与对初次蓄水的耦合响应有关的强度变化稳定后很久才发生的地震活动，与水位较大变化有关。图 5 显示了这些关系。对于初次地震活动的情况，日/周/年/变化 H_2 一般明显比最小水深 H_1 低得多。蒙蒂赛洛水库就是这样的情况， $H_1 \sim 31.8\text{m}$ 和 $H_2 \sim 1.5\text{m}$ (图 2)。当水位变化 (周/月/年) H_2 与 H_1 相差不大或占最小水深 H_1 的大部分时，地震活动受到频繁的湖水位变化制约。在柯依纳， H_2 为 20m 到 40m，(最大值 $\sim 47\text{m}$)， H_1 为 $\sim 30\text{m}$ 。

从胡佛大坝拦蓄的米德湖的观测来说明这种影响。图 6 显示湖水位和较大地震 ($4.0 \leq M \leq 5.0$) 发生时间 (修正的震级和湖水位取自 Anderson 和 O'connell (1993) 的报告)。两个较大地震 ($M 5.0$ 和 4.4) 发生在初次蓄水后 ($H_1 > 100\text{m}$) 1939 年 5 月和

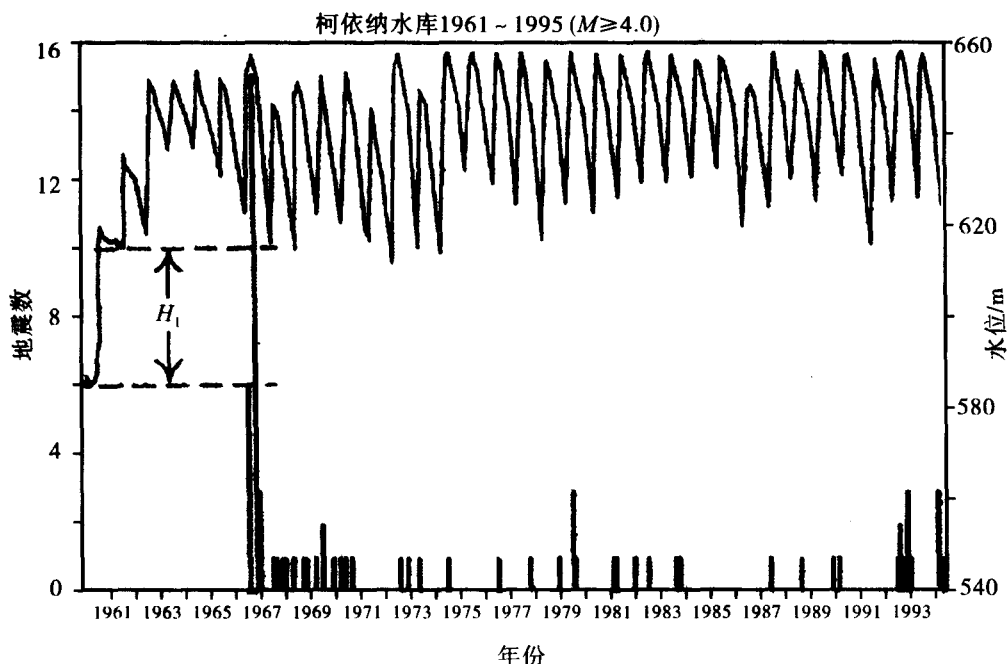


图5 循环湖水位变化幅度 (H_2) 与最低水位 (H_1) 的比较

对初次地震活动, $H_2 < H_1$, 对延长地震活动, H_2 与 H_1 相差不大。

6月。10个 $4.0 \leq M \leq 4.9$ 的地震发生在1942年和1963年之间。这些地震正好发生在湖水位较大年变化之后 ($15\text{m} \leq H_2 \leq 30\text{m}$) (图6)。4个 $M \geq 4.0$ 的地震发生在1963年与1965年之间。这些地震发生与弹性卸载有关 ($\Delta\sigma_n$ 减小, 由此 ΔS 亦降低)。1939年与1963年之间的较大地震平均震级为4.3。随着1965年在米德湖上游修建格伦峡 (Glen Canyon) 大坝, 湖水位变化 (H_2) 低于10m。自1965年以来, 没有 $M > 3.7$ 的地震发生。在1965~1992年期间13个最大地震的平均震级为3.3。这些观测说明, 湖水位变化 (H_2) 的幅度在延长的地震活动中起了重要作用。

Roeloffs (1988) 计算了因循环加载引起的孔压变化耦合效应。她的计算中还包含断层作用位置和类型的影响。她发现振荡水库的影响依赖相对断层的水库位置和断层的性质。如果水库位于陡峭倾斜逆断层的上盘上, 浅倾斜逆冲断层的正上方, 或如在水库边缘存在浅走滑垂直断层或正断层, 振荡水库维持稳定效应 (图7a)。但如果水库位于陡倾斜逆断层的下盘或浅倾斜逆冲断层的上盘上, 失稳 (地震) 发生 (图7b)。如果水库以下有走滑垂直断层或正断层, 地震活动也会在那里发生 (图7b)。

她对一个简单的二维水库的计算提出, 水库载荷产生的应力和孔压场的变化受下式给出的无量纲频率 Ω 约束。

$$\Omega = \omega L^2 / 2C \quad (8)$$

其中 ω 是载荷频率 (柯依纳为1/年, 蒙蒂赛洛水库为1/天), L 是水库宽度。孔压变化可忽略的深度 z^* 由下式给出

$$z^* = \Pi (2C/\omega)^{1/2} \quad (9)$$

表 1 说明有高扩散率和长周期地区的最深影响。如果假设扩散率值为 $1\text{m}^2/\text{s}$ 和一个年湖水位变化循环时, 该模型将预测孔压变化到柯依纳以下约 25km 深度。一个详细的分析较好估计了最近地震活动 (1993 ~ 1995 年) 的深度范围 (Talwani *et al.*, 1996)。目前的地震活动位于水库以南, 5 ~ 16km 之间深度内。

但如 Roeloffs (1988) 论证的那样, 最大失稳作用的位置也依赖断层作用的特征。对于水库下面的走滑和逆断层, 我们计算了整个加载循环期内的强度最大变化 (Talwani *et al.*, 1992)。图 8 和图 9 显示了结果。我们修改了方程 (7), 并假设了表 2 中的参数来计算强度。

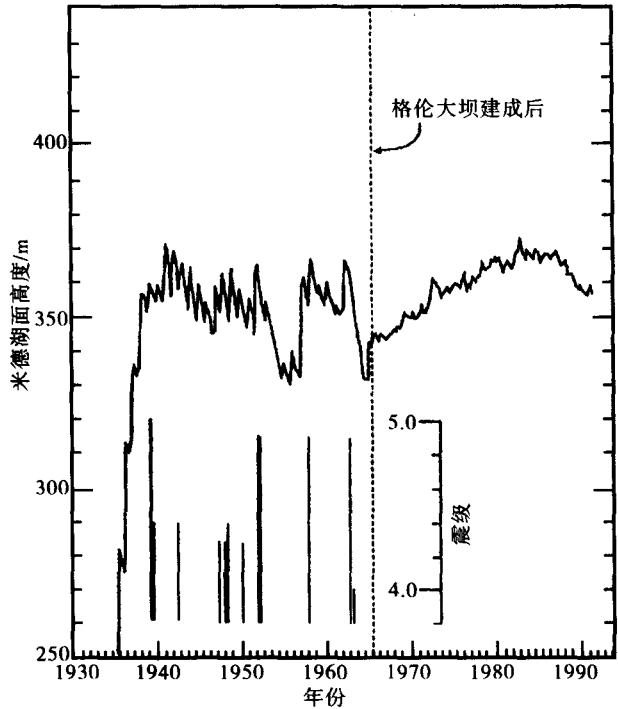


图 6 1935 ~ 1992 年期间与湖水位比较的米德湖较大地震 ($4.0 \leq M \leq 5.0$)

注意 1965 年修建格伦大坝后较大地震减少
对 Anderson 和 O'connell (1993) 图修改

表 1

不同周期和扩散率的 z^*

扩散率 m^2/s	周期 (天)		
	1	30	360
	z^*/km	z^*/km	z^*/km
0.1	0.4	2.3	7.8
1.0	1.3	7.2	24.8
10.0	4.1	22.6	78.4

z^* 地表以下的深度, 该深度以下因湖水位变化的耦合孔压可忽略。

对 2-D 模型, 我们计算了与循环载荷对应的强度变化 (巴) (P_0 从 +1 巴变化到 -1 巴) (+0.1MPa 到 -0.1MPa)。深度和水平距离相对水库宽度作了归一化。对与 ± 5 巴 P_0 (0.5MPa) (与 $\pm 50\text{m}$ 水位变化对应) 对应的循环载荷, 强度变化将是 5 倍。强度变化的负值对应减弱。强度变化发生在整个循环内。在图上画出了整个循环内的强度最大变化。在走滑断层的情况, 最大变化发生在水库下面 (图 8), 在左倾 60° 逆断层