

中国诱发地震

国家地震局地震研究所 编

226

地震出版社

中国诱发地震

国家地震局地震研究所 编

地震出版社

1984

内 容 提 要

《中国诱发地震》是我国地震、水电、地质等部门近十年来研究诱发地震的成果选编。它在已有震例的基础上较全面地总结了诱发地震的特点和发生条件。根据这些成果，在其成因和分类方面提出了一些与前人不同的观点和看法，并系统地论证了诱发地震时、空、强三要素预测预报的可能性和控制途径。本书对开拓人们思路，深入研究诱发地震，特别是水库地震有一定参考价值。

ZW53/10

中 国 诱 发 地 震

国家地震局地震研究所编

责任编辑：蒋浩旋

*

地 震 出 版 社 出 版

北京复兴路 63 号

北京丰华印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

全国各地新华书店经售

*

787×1092 1/16 13印张 325千字

1984年3月北京第一版 1984年3月北京第一次印刷

印数：0001—3000

统一书号：13180·219 定价：2.00元

前 言

自本世纪六十年代以来,我国至少已有新丰江、丹江口等14座水库,大同、水口山等8处矿山,任丘油田及部分深井附近相继发生了一些与水库储水、采煤、抽液和注液有关的地震活动,造成了不同程度的损失和危害,引起了有关领导、工程部门、地震科学工作者和当地人们的极大关注。

由人类某些工程活动引起的局部地区的异常地震活动,就是人们通常说的诱发地震,亦称人为地震。这类地震从目前已有资料看,具有震源浅、震中烈度偏高和与某些工程活动相伴随等特点。因此,研究其发生条件和最大强度对国家经济建设、人们生命财产安全具有重大现实意义。诱发地震和天然地震虽有共同基础,但它们在孕育和发展过程中又有很多不同的地方。对诱发地震的研究,是地震科学研究中的新课题,其成果有助于对构造地震、陷落地震、火山地震的认识,具有理论意义。

近几年来,我国在诱发地震研究方面开展了很多工作,在突出研究水库诱发地震的同时,还重点解剖了一些其他方面的诱发震例,获得了较多的实际资料,取得了一定的成绩。我国地震科学工作者在全面分析、研究这些资料的基础上,对诱发地震特征、发生条件、成因机制、分类、发展趋势及危险性估计等方面均提出了很多有意义的见解,其中一些已在生产建设中发挥作用。

为了进一步促进诱发地震的研究,适应国家经济建设的需要,1981年中国地震学会地震地质专业委员会在武汉召开了全国诱发地震座谈会,交流了多年来诱发地震研究的成果。本书在此基础上编辑而成,基本上反映了我国诱发地震的研究现状和水平。书中内容大致包括:

- 1) 我国诱发地震的震例;
- 2) 诱发地震的研究方法及其成果;
- 3) 诱发地震的特征;
- 4) 诱发地震的发生条件、成因及分类;
- 5) 预测预报和控制地震的途径。

在编辑本书时,我们遵循百花齐放、百家争鸣的方针,选用了一些不同看法的文章,尽可能比较全面地反映我国诱发地震研究的现状。但由于某些客观原因,人工爆破和地下核爆破诱发地震方面的文章未能收入进来,这应该说是一大缺陷。同时,书中有些论文的研究深度也还很不够。尽管如此,它的出版对广开思路仍是有益处的。

《中国诱发地震》是一本集体工作的成果。书中作者(们)在实际工作和撰写论文过程中,得到了很多单位的支持和合作,不少同志无私地提供了自己掌握的第一手资料,很多专家、学者还在百忙中帮助审查了稿件。在此特向他们表示衷心感谢!

参加本书编辑的有徐卓民、于品清、高仕钧等,全书由于品清修改定稿。谢广林、隗福鹏、师蓉梅、严尊国、王清云、韩晓光、胡淑香、狄莉莎等参加了部分工作。书中插图由邹廉界绘制。由于编者的水平有限,书中还可能存在很多不足之处,敬请读者批评指正。

编 者

1983年1月

目 录

中国水库地震的地质条件·····	李祖武等 (1)
试论水库诱发地震的地质分类·····	夏其发等 (8)
试论水在诱发水库地震中的作用·····	刘忠书 (14)
水库蓄水诱发强震的应力调整效应·····	甘家思等 (22)
水库地震成因探讨·····	于品清 (30)
试论水库地震的预测和控制问题·····	于品清 (35)
关于水库地震几个问题的讨论·····	李祖武 (42)
水压致裂法地下绝对应力测量·····	李自强等 (49)
丹江口水库水压应力场、位移场及地震·····	高士钧等 (59)
岩石软化与水库地震·····	吴景浓 (69)
丹江口水库蓄水后的波速比异常·····	王静瑶 (78)
地方震尾波 Q 值及孕震介质条件的讨论 ·····	严尊国等 (85)
新丰江水库区构造应力场与地震关系的数学模拟·····	沈立英等 (93)
运用光弹性模拟研究丹江地区现今构造应力场与水库地震·····	王清云 (104)
新丰江水库地震·····	肖安予等 (115)
柘林水库地震的初步探讨·····	黄德生等 (124)
乌江渡水库诱发地震初探·····	汪雍熙等 (129)
乌溪江水库的地震地质条件及对有关问题的讨论·····	孔庆征 (140)
浅析南水水库的地震活动·····	肖安予等 (148)
黄石水库的岩溶塌陷型水库地震·····	孔凡健 (154)
前进水库的地震活动·····	高士钧等 (158)
辽宁省北票煤田台吉井区采矿诱发的地震活动·····	钟以章等 (162)
山西大同煤矿采矿诱发地震·····	孟国正 (168)
恩斗桥煤矿抽水诱发地震·····	李玉文 (175)
任丘油田开发与地震活动·····	刘一鸣等 (183)
武昌地震与武 5 井漏液·····	邹学恭等 (189)
盐池河磷矿的山崩与地震·····	李祖武 (196)

中国水库地震的地质条件

李祖武 于品清 孔凡健

(国家地震局地震研究所)

一、发震水库区地震、地质概况

截至目前,中国境内已发生地震的水库共计12例(有争论的震例未统计在内),全部分布在我国的东部。历年来,有关部门和研究单位做过许多有益的工作,收集了大量有价值的资料,为研究水库地震及有关问题打下了基础。现将各发震水库区的有关地质构造、水文地质条件和地震活动资料列入表1。

表1 中国发震水库区地震活动与地震地质特征简表

水库名称 (位置)	地震活动概况	地震地质特征	资料来源
新丰江 (广东省河源县)	该库坝高105米,库容138.96亿立方米,蓄水前周围地区地震活动性较弱,但在1959年10月随着蓄水后水位的上升,地震活动的频度、强度显著提高。满库时(115米高程),1962年3月19日发生6.1级地震。20多年来记录到地震近30万次,现仍有地震活动,但频度、强度已降低。6.1级地震前地震活动性与水位明显相关,6.1级地震具有滞后现象,其后,这种关系则越来越不明显。震中主要分布于断块接触部位,并偏于隆起一侧	库区位于东南地洼区内,有上古生代,中生代、第三系沉积物和燕山期花岗岩,以及第三—第四纪玄武岩分布。库区内主要的构造形迹为东西向,北北东向以及北北西、北北东向断裂,水的渗漏条件较好,根据地貌-构造反差强度大、断裂面上破碎物未胶结,沿断裂多处有温泉出露以及地壳形变等资料,说明库区于新构造时期和近期皆有强烈的构造活动	据文献[2-4]
丹江口 (湖北省均县)	该水库坝高97米,库容209亿立方米。蓄水前的1959—1967年间库区附近的台站没有记录到大于2.5级地震。1967年11月蓄水到1979年的十余年间,记录到库区内地震活动约450次,并形成林茂山、宋湾两个地震密集区。高水位期间(156.74米高程),于1973年11月29日在宋湾发生4.7级地震。此次地震以前,地震活动与水位变化有正相关现象,以后则越来越不明显	库区位于华中地洼区内,有元古代变质岩、古生代碳酸盐岩和碎屑岩建造、白垩—第三纪红层展布。构造线主要有北西西和北北西向两组,前者形成早,后者形成晚。此外,在库区内还存在一条近南北方向的丹江拗折带。在震中区出露的灰岩中,节理、裂隙,岩溶发育,具有良好的渗透条件。水库区自第四纪以来有垂直运动和断裂运动的表现,并有温泉出露	据文献[5]、[9-10]和作者调查
参窝 (辽宁省辽阳市)	该库坝高43.5米,库容7.9亿立方米。蓄水前周围地区地震活动未超过V度,1972年11月蓄水后地震活动明显增强。1972年—1979年共记录到 $M \geq 1$ 地震300余次,其中1974年12月24日的4.8级地震最大。地震活动与水位升降有一定关系。震中在库区边缘岩溶发育地段	库区位于华北地洼区内,有前震旦纪变质岩和震旦纪、早古生代石英岩、砂页岩、灰岩分布。构造线主要有北北东和北东—北东东向两组。库区内断裂发育,岩石完整性差,具有水的良好渗透条件。另外,库区附近新构造运动迹象明显,沿断裂有温泉出露	据文献[7]、[11]和作者调查
柘林 (江西省永修县)	该库坝高62米,库容71.71亿立方米。水库修建的前几年就曾在库区内发生过微震活动。1972年6月蓄水后的几年内接连发生十多次地震,最大的是1972年10月14日在水库北岸发生的3.2级地震。该次地震发生在水位由21米上升到53米的过程中。此后,地震活动与水位对应关系不明显	库区位于东南地洼区赣桂地洼系内,有前古生代变质岩、早古生代砂页岩、灰岩以及白垩—第三纪红层分布。水库处于向斜盆地内,构造线主要呈近东西向和北东向,新构造运动迹象明显,库区附近有温泉展布	据文献[7]和作者调查

续表

水库名称 (位置)	地震活动概况	地震地质特征	资料来源
乌溪江 (浙江省遂昌县)	该库坝高129米,库容20.6亿立方米。1979年1月蓄水后,库区内曾多次发生微震活动,最大者为1979年10月7日发生的2.8级地震。此次地震后,余震频繁,最多时每日可达百余次,但多为负级地震	库区位于东南地洼区内,侏罗纪火山岩广泛分布。库区内的主要断裂为北北东、北东及北北西向。同时,玄武岩之柱状节理也很发育	据浙江省地震局和作者调查
前进 (湖北省谷城县)	该库坝高50米,库容0.1698亿立方米。蓄水前的十多年间未曾发生过有感地震。1970年5月蓄水,1971年10月20日当库满溢洪后发生一次3.0级地震。在此前后,共记录到微震700余次,震中分布于岩溶发育的灰岩地段	库区位于华中地洼区内,有前震旦纪—古生代碳酸盐建造、砂页岩构造以及白垩—第三纪红层分布。构造线以北西西向为主,并见有近南北向之断裂	据文献[7]和作者调查
南冲 (湖南省邵东县)	该库坝高45米,库容0.135亿立方米。1967年蓄水后有小地震活动,十余年来共记录有感地震20余次,其中以1974年7月25日2.8级为最大。震中分布在库岸岩溶发育的灰岩地段。蓄水初期地震活动与水位正相关现象明显,后期则不明显	库区位于东南地洼区内,有泥盆系、石炭系砂页岩、灰岩分布,灰岩中溶洞、地下暗河发育,水的渗透条件良好。构造线主要为北北东—北东向	据文献[7]和作者调查
黄石 (湖南省桃源县)	该库坝高40.5米,库容6.12亿立方米。1970年蓄水,1973年及1974年高水位期间,在岩溶发育的灰岩分布地段景龙桥及龙潭河处有地震活动,到1979年库区内共发生有感地震十余次,其中1974年9月21日的2.3级为最大	库区位于东南地洼区内,有志留系砂页岩及奥陶系灰岩分布。库区上游的灰岩中岩溶发育,节理密集,具有良好的地下水渗透条件。构造形迹主要有北东向、北北西向及北北东向断裂	据文献[7]和作者调查
南水 (广东省乳源县)	该库坝高81.3米,库容12.18亿立方米。蓄水以前本区历史上无地震活动记录,水库于1969年2月蓄水,1969年12月库区内开始出现地震活动,1970年2月16日发生2.4级地震(最大),在此前后共记录到地震600余次	库区位于东南地洼区内,有泥盆纪、石炭纪之灰岩、泥质岩和碎屑岩、变质岩分布。库区内断裂发育,水的渗透条件较好。主要构造形迹有北东东、北西、近南北向三组断裂。此外,库区内有多处温泉出露,具有一定的地壳活动特征	据肖安予等调查
乌江渡 (贵州省遵义县)	该库坝高165米,库容23.0亿立方米。1979年11月蓄水,1980年6月在库区内出现地震活动,1980年6月20日地震为最大,震级1级,共记到地震约40—50次。地震活动与高水位明显相关,无滞后现象。震中在灰岩岩溶发育地段	库区位于云贵地洼区内,主要有二迭纪、三迭纪之泥岩、灰岩,灰岩中岩溶十分发育。水库区内断层,节理较多,主要的构造形迹为北东、北北东向断裂	据夏其发等调查
邓家桥 (湖北省宜都县)	该库坝高12米,库容0.004亿立方米。1979年12月蓄水,1980年8月曾发生13次地震活动,8月1日的1级地震为最大。地震活动出现在暴雨时节,与水位变化成正相关。震中在灰岩出露地段	库区位于地洼区内,古生代灰岩广泛分布,灰岩岩溶发育,节理密集,水的渗透性较好。在库区西侧有一条走向北东、倾向库区的高角度正断层	据文献[8]
曾文 (台湾省)	该库坝高147米,库容7.08亿立方米。蓄水前,库区周围曾有过多次浅源地震。1973年4月蓄水后库区仍有时强时弱的浅震活动,但与水位升降并无明显的对应关系。特别在高水位期间,地震活动几乎消失,第一次高水位后,震中有向库区外围迁移的迹象	库区不仅位于构造非常活跃的台湾地槽褶皱带内,而且处于构造应力目前正在积累的竹沟活动冲断层上。区内分布有总厚达5公里的中新世和上新世的砂岩、粉砂岩和页岩。断层、节理都很发育	据文献[12]

二、中国水库地震的若干特征

中国境内水库区的地震活动,具有以下几个特征:

(1) 地震活动明显和地震活动加剧的水库,全部分布于活动区内活动断层、差异运动明显,应力相对集中的部位和脆性岩石,特别是岩溶发育的巨厚碳酸盐岩层地段内。震中多位

于水库边缘或峡谷地段，常密集成条带状或团块状，带状延伸方向大体与库区主要断层或与同断裂有成生联系的一对X型共轭剪切断裂平行。新丰江、丹江口、柘林水库区的地震活动皆其实例。

(2) 地震活动与水位关系比较复杂。一般说来，多数水库的地震活动在蓄水前期或主震前与水位涨落呈现正相关，而蓄水后期或主震发生后水位涨落与地震活动的关系不明显，并越来越弱。当水位再度达到主震时的水位，甚至在比主震时水位还高的情况下，地震次数有时虽有所增多，但不曾有比主震更大或与之相当的地震出现。新丰江、丹江口、前进、南冲水库等的地震活动都是如此。滞后现象亦是蓄水前期显著。极个别水库的地震活动与水位升降呈负相关，如曾文水库。

(3) 水库区地震活动范围很小，震源体积有限，震源浅，一般发生在几公里到十几公里的深处，震级偏低而烈度偏高，最大震级为 $M_s 6.1$ 级。主震和强余震等震线外形常呈椭圆形或圆形，其长轴方向皆与库区内主要构造线(或断裂)有联系，多与之平行。新丰江、丹江口的水库地震即其例。

(4) 水库区内地震活动方式大体上可以分为具有弱震活动和强震活动两个基本类型：即有的水库在蓄水后，随着水位上升、库容加大，在水库区内有断续的、持时甚久的地震活动，应变能逐步释放；而另一些水库则伴随着水位上升、库容加大，不但有持之甚久的弱震活动，而且还具有前震多、主震强、余震期较长的特点，应变能突然释放。这两个基本类型，可相当于茂木清夫提出的震群型和主震型，它们是受物质结构均匀程度和外部应力状态控制的。

(5) 地震序列常具有 b 值大于 1、最大余震和主震的震级比接近于 1、主震和余震的震级差小于 1、衰减系数小于 1 或等于 1 的特征。

三、中国水库地震的地质条件

水库发震的地质条件错综复杂。据已有资料分析，中国水库区内的地震活动与地质构造、岩石性质、水文地质和地热四方面的关系颇为密切。

(1) 与地质构造的关系：中国的水库地震与大地构造、活动性断层、断块之间差异运动最强烈的地段有关。例如，表 1 所列的 12 个发生地震的水库区，在大地构造上皆属于活动区——地洼区、地槽区(图 1)。震中亦主要位于规模较大的活动断裂的最活动地段，或几组构造线交汇部位，以及隆起断块与下降断块的交界位置上，特别是与活动性大断裂有成生联系的两组共轭剪性断裂发震更为常见^[6]。新丰江、丹江口水库地震即其实例(图 2)。也有极个别水库是压性断裂发震的，如曾文水库^[12]。

(2) 与岩石性质的关系：水库区内地震的发生，与库、坝区的岩石种类和特性似有某些联系。地震往往发生在裂隙或岩溶发育、渗透性良好、便于库水渗漏的岩石所在地段，而裂隙不甚发育、渗透性差或较差的岩石所在地段则没有或极少有地震活动。例如：新丰江水库几个震中密集区都位于原生节理(如纵节理、横节理)和构造节理极端发育的花岗岩大型岩基内，而在渗透条件差的红色碎屑岩建造、复理式建造等岩层中，则地震极少或没有；丹江口水库区的三个震中密集区也都是寒武和奥陶系岩溶发育、渗透性强的厚层状灰岩所在地段，而主要为前震旦纪片岩分布的汉库和白垩—第三纪红层分布的丹库中央(李官桥盆地)则几乎没有地震活动(图 2)；柘林水库的震中位于古生代岩溶发育的灰岩分布地段，而主要为志留纪页岩分布的水库中部则没有地震活动；前进水库和南冲水库的地震，也分别发生于古生代

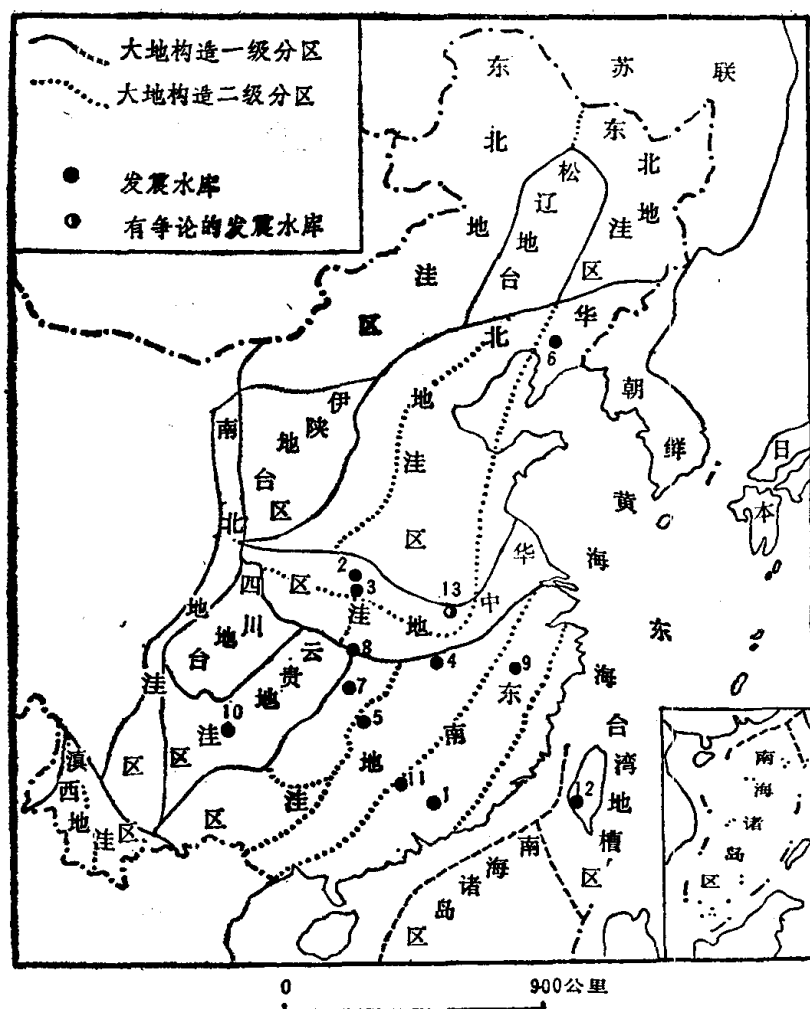


图 1 中国东部大地构造分区(据陈国达)与有震水库位置关系略图

实心圆代表有震水库位置: 1. 新丰江水库; 2. 丹江口水库; 3. 前进水库; 4. 柘林水库; 5. 南冲水库; 6. 参窝水库; 7. 黄石水库; 8. 邓家桥水库; 9. 乌溪江水库; 10. 乌江渡水库; 11. 南水水库; 12. 曾文水库; 13. 佛子岭水库(有争议)

岩溶发育的厚层状灰岩分布地区内。

据上所述, 水库地震与刚性大、脆性强、大小裂隙密集或岩溶发育、渗透性能良好的岩石, 如厚层状碳酸盐类岩石、岩浆岩基和巨厚火山岩, 都有颇为密切的关系。因为这些岩层共同的一个特点是它们为库水提供了渗透的途径, 而库水能否持续渗透到一定深度(几公里)又是水库区发生地震的一个条件。另一方面, 岩溶的发育使岩体存在着不稳定的因素, 容易产生重力滑动而发震^[7]。反之, 如果库坝区为渗透性低的岩层, 如松散层、片岩类、砂页岩层等不具备向深处渗透条件的, 则一般不利于发生地震。仅有极个别处于高应力状态下的砂页岩中断层、节理极端发育的水库发生了地震, 曾文水库即其一例。

(3) 与水文地质条件的关系: 在中国已发生过地震的水库中, 库区往往存在使库水往深处入渗的渗透岩层或结构面(如张裂隙)与阻止入渗库水外溢的不渗透岩层或结构面(如压性裂隙)一同存在的特定水文地质条件。这对于含水层高压异常区(带)的形成、提高地下水位、增加液压、软化岩石、降低强度、减少断层面上的正压力、使地下岩体处于极不稳定的敏感状态及释放已积累的应变能是有利的。例如, 丹江口水库的三个震中密集区就位于褶皱、断裂和垂直式岩溶管道极其发育的古生代碳酸盐岩层与白垩—第三纪红层接壤部位上,

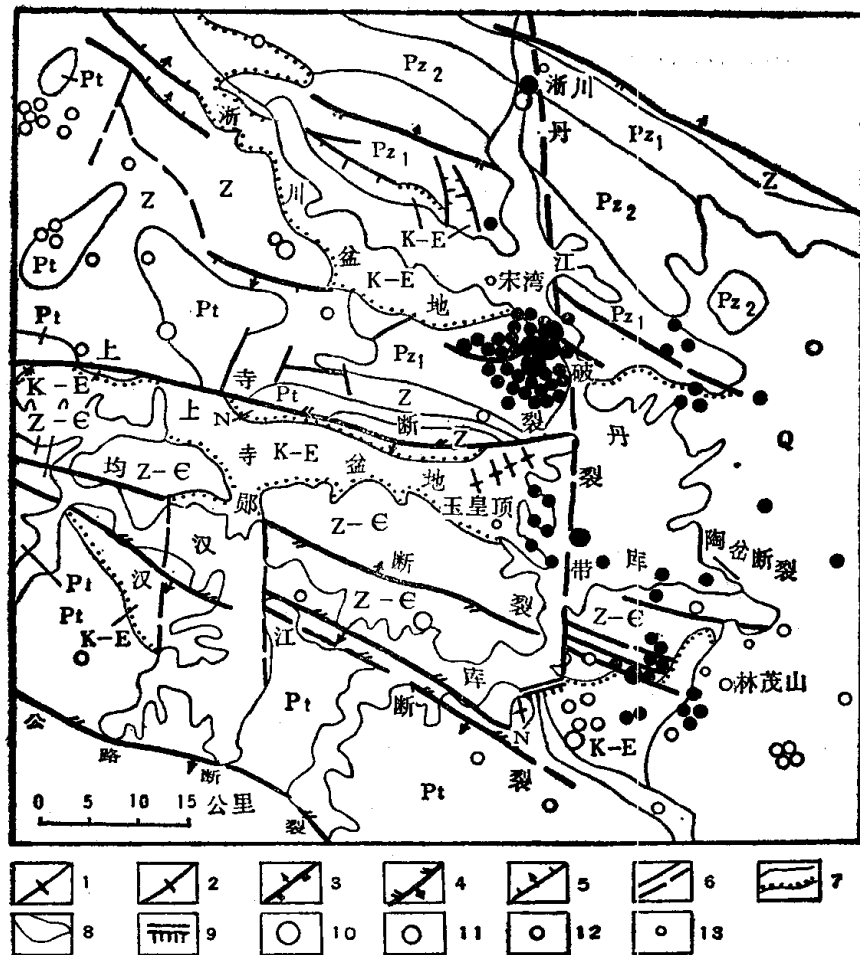


图 2 丹江口水库地震震中与地质构造关系略图(李祖武, 1981)

1. 背斜; 2. 向斜; 3. 逆断层; 4. 压-剪性断层; 5. 正断层; 6. 性质不明或推测性断层; 7. 地层界线; 8. 水域边缘(海拔 170 米); 9. 坝址; 10. $4.0 < M_s < 5.0$; 11. $3.0 < M_s < 4.0$; 12. $2.0 < M_s < 3.0$; 13. $1.0 < M_s < 2.0$. 空心圆为蓄水前的地震, 实心圆为蓄水后的地震

两者大体以丹江断裂带为界, 前者利于库水大量地直接往深部入渗, 增加液压; 后者利于水体局部集中, 形成高压异常区(带)。这就为深埋岩体中的断裂带作剪切滑动、发生地震创造了有利的条件。新丰江水库地震的震中区(如A₁、A₂震区)虽位于库水易于入渗的多裂隙花岗岩体上, 没有挡水层, 难以形成水体局部异常区(带), 可是, A震区南侧和东侧的两条断裂带却是两组起阻水作用的较厚的不透水层, 它阻挡着水向南、向东渗漏, 使多裂隙花岗岩体遂成统一含水层^[3], 对发生地震亦提供了有利的水文地质条件。可见, 水库区内地震的发生是与区域构造控制下的特定水文地质条件有关的。

(4) 与地热的关系: 从新丰江水库有过第三纪或第四纪火山活动, 以及丹江口、柘林、参窝等库区内存在着温泉的事实看, 中国水库区内的地震活动似与地壳余热区或热异常区、热应力较高有关系。国外有地震活动的许多水库, 如柯伊纳、卡里巴、克雷马斯塔、米德湖等水库也都是有温泉分布的。地热对水库区发生地震之所以能起作用, 可能是库水沿已有的断裂、裂隙、节理渗入地下深处, 产生热化学作用和其他热影响以及水温升高、汽化、引起热迁移而形成新的局部地热异常(带), 使热弹性应力产生相对集中, 从而导致岩体沿原有软弱面滑动。

以上四个条件在同一水库往往并非同时存在, 不同类型的水库地震其控制地震发生的地

质条件是不同的。即便是同时存在，联合作用，但也是以某一种为主。对于一个具有相当复杂地质情况的大型水库来说，不同部位的地震活动、地质条件也可能是有差异的。

四、中国水库地震的类型

在前述资料基础上，我们认为中国的水库地震，可以初步划出如下三个类型：

(1) 构造型。此型主要是在大地构造应力长期作用下，构造应变能聚集于活动断层的活动地段（拐点、几组构造线交汇处、断块间差异运动明显的特殊构造部位），在初始应力较高的状态下，由于库水的各种物理、化学作用而诱发或触发的。这种构造型的水库地震往往具有震级大、频度高、延续时间长、震源较深等特点。在地震序列上多属前震-主震-余震型。新丰江、曾文水库地震即其典型实例^{[2-4][12]}，丹江口水库地震也基本上属于这一类型^{[5][9-10]}。

(2) 非构造型（岩溶塌陷型或重力型）。此型主要是巨厚的碳酸盐类岩层在长期的地质历史期间形成了多层大小不等的溶洞，由于水库蓄水改变了外力地质作用的条件，导致地表和深度不等的局部岩体或岩块失稳，发生相对位移破坏而伴生的地震现象。这种塌陷型水库地震并不需要很高的初始应力，在活动区的稳定地段或弱震区均可以发生。它往往具有震级小、频度低、延续时间短、震源极浅等特点。在序列上，多属震群型。乌江渡水库地震即其典型实例，黄石水库、邓家桥水库地震也基本上属于这一类型^[7-8]。

(3) 混合型。即在同一水库区同时或先后发生有构造型和非构造型的地震，其特点兼二者而有之。该类水库地震既可发生于强震区，亦可发生于弱震区。前进水库和柘林水库的地震活动有可能属于这种类型。前进水库发生的许多地震，其中震级较大、震源较深、震动稍大、群众普遍有感的地震，如1971年10月20日 M_L 3.6级和1971年11月5日 M_L 2.5级地震，应是该区长期积累的应变能被库水诱发或触发的结果，属于构造型水库地震。而在同一时期，同一地段（岩溶发育的戚家湾）发生的另一些小地震，群众可以听到响声，并感到地面上、下震动，山坡碎石滚落，但仪器往往没有记录，可见震源极浅。这些很可能是由于震级较大地震的震动，使岩体失稳，兼之库水入渗增加岩体间润滑性等作用，导致岩体滑动而使地下溶洞塌陷而引起的。

结 束 语

综上所述，可以认为中国境内有地震活动的水库区，全部位于活动区内。其中构造型水库地震常发生于活动断裂带弧形拐点或几组构造线交汇、新构造运动时期断块间差异运动显著，并通过三角、水准测量证实现代仍有一定活动表现的不同断块（如地垒、地堑）交接地带，应力易于集中，尤其是张、剪应力集中的特殊构造部位，以及介质不均一、岩石破碎、岩溶发育、水文地质条件复杂、地壳余热较高的地区内。这一类型地震往往需要有较高的初始应力，它是大地构造应变能释放的必然结果和地壳运动的直接表现。非构造型水库地震，一般与库区具有多层串通的众多溶洞的巨厚碳酸盐岩层有更为密切的关系。它不需要很高的初始应力，弱震区也可以发生。因此水库地震与地质条件有相当密切的关系。研究这种关系，对于保卫大坝安全，作出正确的危险性估计，无疑是会有作用的。

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] 国家地震局广州地震大队, 新丰江水库区活动性构造与地震的关系, 地质力学丛刊, 第4号, 科学出版社, 1977。
- [3] 沈崇刚, 新丰江水库地震及其对大坝的影响, 中国科学, 1974, 第2期。
- [4] 丁原章, 新丰江水库地震的形成条件, 地震战线, 1978, 第4期。
- [5] 李祖武, 丹江口水库区地震的形成条件与发展趋势的讨论, 西北地震学报, 1981, 第2期。
- [6] 李祖武, 水库地震与地质构造的关系, 地震地质, 1981, 第3期。
- [7] 胡毓良等, 我国的水库地震及有关成因问题的讨论, 地震地质, 1979, 第4期。
- [8] 刘忠书等, 湖北省宜都县邓家桥水库区地震, 地壳形变与地震, 1981, 第2期。
- [9] 国家地震局地震研究所, 丹江口水库诱发地震文集, 地震出版社, 1980。
- [10] 于品清, 丹江口水库发震的构造条件, 西北地震学报, 1980, 第3期。
- [11] 钟以章, 辽宁省参窝水库地震问题的讨论, 地震地质, 1981, 第4期。
- [12] Francis T. Wu, Y. H. Yeh and Y. B. Tsai, Seismicity in the Tsengwen Reservoir Area, Taiwan, B. S. S. A., No. 6, 1979.

试论水库诱发地震的地质分类

夏其发 汪雍熙

(水利电力部水利水电科学研究院)

水库诱发地震(简称水库地震)是诱发地震中的重要类型,是指由于水库蓄水而引起水库区及其邻区(指库水能影响的范围)内发生的地震现象,或是指由蓄水而造成原有地震活动加剧或减弱的现象。

一、问题的提出

据现有资料,水库蓄水后库区的地震活动一般可以分为四种情况:

- (1) 没有地震活动。指没有发生诱发地震,大多数水库属此情况;
- (2) 地震活动明显。指原来没有地震,蓄水后出现了地震活动;
- (3) 地震活动加剧。指蓄水后库区所发生的地震震级和频度大于库区历史地震的震级或频度;
- (4) 地震活动减弱。指蓄水后库区的地震活动水平(震级与频度)低于蓄水前的地震活动水平。

为什么会出现上述情况?具备什么样的条件才能诱发强震、弱震或微震?又在什么样的条件下才能使水库区的地震活动水平减弱?近几十年来,有许多专家和学者进行了多方面的探索和研究,发表了不少论著,对水库地震的成因和产生水库地震的地质条件作了种种评述。大家都认为,只有当水库具备了特定的地质条件时才会发生水库地震。但到底是什么样的特定条件?如何确定这些特定的地质条件?在这方面的论述不多,至于对水库地震进行地质分类的论述则尚未见到。作者认为,水库地震既然也是一种地质作用(或现象),不论其是内力作用,还是外力作用,均可以对已发震水库的地质条件进行分析对比,找出发震与不发震水库的地质特征,进行分类。这就便于对正建或拟建的水库,根据上述分类特征进行相应的水库地震研究所必需的勘察工作,以利于加快水库地震的研究,为作出水库蓄水后能否诱发水库地震的评价提供依据。

二、分类的依据

到目前为止,国内外已有 96 座水库诱发了地震,我们对其中地质与地震资料比较齐全的 47 个震例和 13 座只有微震活动而无震级记录的震例共 60 例(其中我国有 14 例)进行了初步分析。结果表明,引起水库地震的地质因素虽然很多,但其中起主导作用的因素,主要有组成库盆的地层岩性、地质构造与水文地质条件三方面。现分述如下:

1. 水库地震与地层岩性的关系

发震几率与岩石性质有关,震级的大小与岩体的强度有关。从表 1 可以看出,碳酸盐岩类的发震几率最高,占 46.7%。然而,从震级强度来看,则以火成岩的震级最高,6 级以上

表 1

发震几率、强度与岩性关系

岩 性	发生不同震级地震的水库数量							占发震水库总数的百分比(%)
	≥6.0	5.9—5.0	4.9—4.0	3.9—3.0	<3.0	微震 ¹⁾	总 计	
火 成 岩	2	2	2	2	2	3	13	21.7
变 质 岩			3	2	1	4	10	16.7
沉 积 岩	1	1	1	2	1	3	9	15.0
碳酸盐岩类	1	3	10	3	8	3	28	46.7

1) 只有微震或小震活动, 无震级记录资料。

的强震就有 2 例, 占同震级中的 50%。这是否可以说明, 岩体强度越高, 积累的应变能量就越大, 一旦岩体破裂, 则其释放的能量也就越大。到目前为止, 尚未见到由松软岩体 (即第四纪的堆积物) 组成库盆的水库发震的例子。由此说明松软岩体为一种可压缩的、强度极低的岩体, 应力不易积累, 它是通过压缩变形来释放能量, 故不易发生突然破裂而诱发水库地震。从岩体强度来看, 大致有这样一个趋势, 坚硬的块状岩体受力后易产生脆性破裂 (如构造破碎带等), 诱发水库地震的震级就高; 半坚硬的层状岩体受力后有可能产生部分塑性形变 (褶皱或断裂等), 诱发水库地震的震级就低; 松软岩体受力后则产生压缩变形 (沉陷压缩), 不易诱发水库地震。因此, 可以将库区的地层岩性看作水库诱发地震的基础。

2. 水库地震与构造的关系

全世界 96 座水库地震震例中只有 25 座水库地震是发生在原来的地震活动区, 占总发震率的 26%, 其中大于 5 级的只有 3 例, 大部分多属于弱震与微震, 而 74% 的震例是发生在无震区或弱震区 (表 2)。大部分大于 5 级的强震 (7 座) 是发生在弱震区与无震区。如我国的新丰江水库、印度的柯伊纳水库、赞比亚—津巴布韦的卡里巴水库。这些大于 6 级强震的水库地震的震例, 在蓄水前都是位于弱震或无震区的地块上。又如我国高烈度区的郯庐活动断裂带附近修建了一系列水库, 处于 VIII—X 度区的十一座水库中尚未见有诱发地震的震例。因此, 蓄水前的地震活动, 只能说明库区晚近期的构造活动背景, 但不表明在水库蓄水后就一定会诱发水库地震。这是否可以说明, 晚近构造运动与水库地震之间的相关性是不明显的。

表 2

原地震活动区中水库地震的活动情况

岩 性	发生不同震级地震的水库数量						占发震水库总数的百分比 (%)
	≥6.0	5.9—5.0	4.9—4.0	3.9—3.0	<3.0	总 计	
火 成 岩		1	2	1	2	6	24
变 质 岩			1		2	3	12
沉 积 岩		1	1	2	1	5	20
碳酸盐岩类	1		7		3	11	44

我们认为, 岩体中的不连续结构面是构成水向深处渗透的必不可少的条件。岩体中的不连续结构面有: 构造作用形成的裂隙 裂隙密集带、断裂破碎带、火成岩的侵入接触带, 还

有层面、不整合面和火成岩的原生节理面，以及碳酸盐岩类地层中的溶洞、暗河等。它们在一定条件下均可以产生渗漏。由于这些破裂面(结构面)渗透性能的强弱与向深部延伸深度的不同，对促使深部岩体应变能释放的影响程度也不一致，故产生破坏的程度也就不一，只有当破裂面能构成向深部集中渗透时，才能诱发中强地震。上述各类破裂面中，只有规模较大的构造带才能满足这样的条件，而一般的裂隙与断裂带只可能诱发弱震或微震。特别是当岩体强度大，又有大的构造带充当渗透通道时，更容易使深部的断裂面的应力集中，超过极限状态而诱发较强的地震。从表3可以看出，位于构造破碎带(包括老断层和新断层)不但发震机率高(约占70%)，诱发的震级也较高，包括所有的强震和大部分弱震($M > 4.0$ 级)，震源深度一般在3—5公里，深的可达7—8公里。由此说明，构造破碎带是能起到库水向深部渗透的主要通道作用的。岩溶裂隙带虽然渗漏量大，但由于其渗透的深度不大，震源深度一般多接近地表，深的也不过1—2公里左右。同时，震级也较低，一般均为微震。如我国水库地震的14个震例中就有6个主震震中位于岩溶裂隙发育的地区，震级一般小于3级。

表3 发震几率、强度与渗透条件的关系

渗透条件	发生不同震级地震的水库数量				占发震水库总数的百分比(%)
	>5.0	4.9—4.0	<4.0	总计	
断裂破碎带	10	10	10	30	70
岩溶裂隙带		7	6	13	30

因此，库区的构造条件，主要由构造破碎带的规模与渗漏特性起作用，而构造破裂带则是将库水引向深部而诱发水库地震的必不可少的通道条件。

3. 水库地震与水文地质条件的关系

水库地震主要是由水库蓄水而引起的。大部分地震地质与地震工程工作者认为，水库蓄水增加的荷载与地壳荷载相比增量是非常微小的，除非地应力处于临界状态，否则水库荷载很难起诱发地震的作用。但水库水头压力能使库水与地下水发生紧密联系，完全可以改变水库区原有的水文地质条件，增加岩体内部的渗透压力。这种压力一方面可促使构造破碎带中软弱物质的软化与泥化，另一方面可使破碎带的地下水向深部循环，如破碎带宽、渗透性又大，则循环的深度也就愈深。由于渗透压力是随着深度的增加而增大的，所以就有可能导致岩体深部软弱结构面的变形与破坏，并有可能诱发水库地震。

水的渗透性能由库区内的水文地质条件所决定，孔隙水的渗透与运移条件是受岩层的结构和产状所决定，而裂隙水与岩溶水的渗透和运移条件则受裂隙和构造破碎带以及岩溶等的发育程度和分布状况所决定。因此，不同的水文地质条件，其渗透特性也不同。

(1) 松软岩体的渗透特性：松散岩体(如砂、砾石、卵石等)属于孔隙含水层，渗透系数为50—200米/昼夜，属中强透水层；软粘岩体(如粘土、淤泥、黄土等)属微孔隙、裂隙含水层，渗透系数小于0.5米/昼夜，为微透水与不透水层。当这类岩层在水库中一般厚度不大而又零星分布时，对库区的水文地质条件影响不大。但当这类岩层在水库区厚度较大，并组成库盆时，由于松软岩体通常相间沉积，组成互不连通的含水层，再加上这类岩层产状平缓，地下水一般以水平循环为主，故向深部的渗漏一般量不大，不易引起深部基岩中的水文地质条件的变化。

(2) 裂隙岩体的渗透特性：岩体中的所有裂隙都为地表水入渗创造了有利条件，岩体的入渗系数随着裂隙的发育程度而不同。但由于裂隙的发育是极不均一的，有些裂隙并不完全沟通，所以充水条件就不相同，具有明显的分区与分带特点，一般渗漏量不大。同时，由于裂隙的沟通条件不好，故裂隙水循环的深度一般也不大。

(3) 构造破碎带的渗透特性：包括各种力学性质的断层带，由于受到早期或晚近时期构造运动的影响，一般规模较大，切割也深，甚至有的切穿盖层或深入地幔，但其渗透量的大小主要由破碎带的物质成分与胶结程度以及力学特性而决定。一般的规律是：张性破碎带渗透性强，但由于其延伸不远，切割程度较小，故渗透的深度一般不大；压性破碎带，虽然破碎带本身的渗透性不大，有时还起阻碍作用，但在破碎带上盘的影响带往往裂隙发育，成为良好的透水带，再加上这类破碎带延伸远、切割深，特别是当其产状为高角度时，更易形成库水向深部渗透的良好通道；扭性破碎带虽然延伸远、切割深，但由于其破碎带的宽度一般不大，胶结也较紧，故其渗透性不大，只有当其力学性质变为张扭或压扭性时，渗透性能才会有很大的变化。

(4) 岩溶水的渗透特性：岩溶主要发育在可溶性的岩层中，这种岩层受构造作用的影响可产生很多裂隙，再受到地表水或地下水的溶蚀与潜蚀作用，便形成溶洞。现代岩溶一般深度不大，多发育在当地侵蚀基准面以上。在地表受表层裂隙的影响，一般以溶沟、溶槽、落水洞、竖井为主，而在侵蚀基准面附近则以水平溶洞为主，有时可形成规模巨大的暗河。此外，由于受不同时期的侵蚀基准面的升降变动的影 响，还往往发育着多层的水平溶洞。因此，其渗漏量是相当大的，但仍以水平循环为主，故其向深部的渗透深度不大。只有当岩溶发育地区有构造破碎带存在时，渗透深度方可能较大，其向纵深循环的深度受构造破碎带的渗透特性所决定。

因此，水库地震的发生取决于水的渗透作用和所产生的水的动力效应。由于水的渗透，使深部岩石的性质发生变化，降低了断层面的抗剪强度，增强了破碎带的活动性，降低了断层带的稳定条件，进而使岩体发生错动而诱发地震。

三、地质分类及各类的基本特征

根据上述在水库诱发地震中起主导作用的地质因素，即组成库盆的岩体性质、不同的构造特征以及蓄水后的水文地质条件，试将水库地震的地质特征初步划分为下列四大类型(图1)：

(1) 松软岩体类型(I)：库盆由厚度较大的第四纪松软岩体组成，到目前为止尚未发现诱发地震的实例。如我国的刘家峡水库、官厅水库以及平原地区修建的水库，均未发生水库地震。因此可以列为不发震型。

(2) 裂隙岩体类型(II)：可分为块状与层状两类。

1) 裂隙块状岩体类型(II₁)：库盆由块状岩体(包括火成岩、混合岩以及部分巨厚层状的沉积岩)组成，裂隙发育，无大的构造破碎带，或虽有这样的破碎带存在，但不能使库水形成向深部渗透的通道。由于库水向库岸周边表层裂隙产生临时性渗漏或沿浅层裂隙产生渗透，引起微破裂或破裂，故由此诱发的地震一般震级不大，以微震或弱震为主，震中散布于水库周边或库盆之中，震源极浅，多属震群型，也有前震—主震—余震型。如日本的釜房水库震例。

2) 裂隙层状岩体类型(II₂)：库盆由沉积岩中的砾岩、砂岩、页岩与变质岩中的千枚岩、

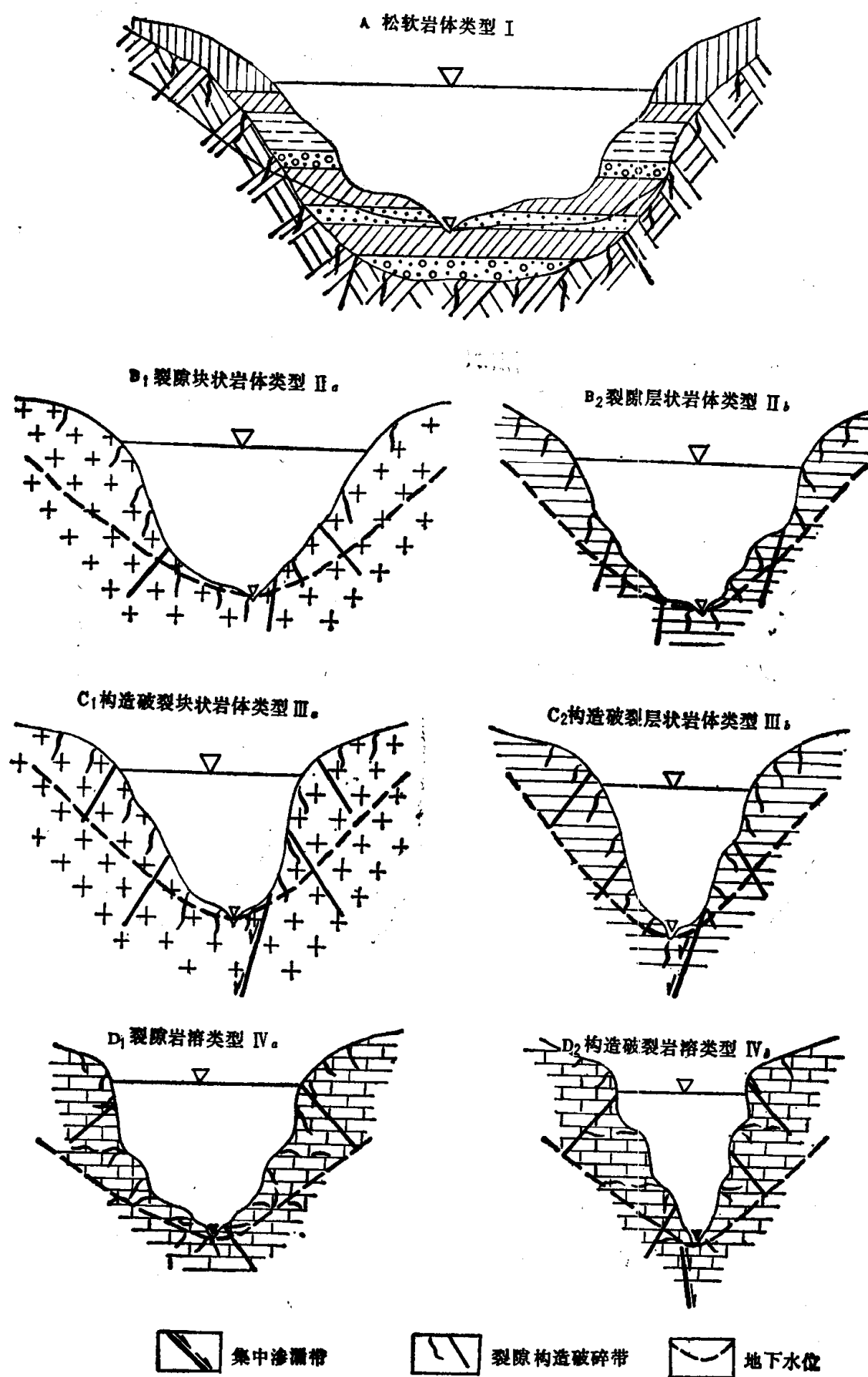


图 1 水库诱发地震地质分类