

# 结合卫星影像分析水库地震的形成原因

孔凡健

(国家地震局地震研究所, 武汉)

**提 要** 本文应用卫星影像分析了我国几个水库诱发地震震例, 提出了库区内应力叠加模式, 对水库地震的成因, 做了探讨。

**关键词** 水库地震 卫星象影 地震成因 发震条件

## 一、前 言

我们注意到, 水库蓄水有时会诱发地震<sup>[1]</sup>。但是, 为什么大多数水库建成蓄水以吞并没有发生地震? 发生地震的水库震中又都在库区内的特定地段? 通过多个震例分析对比表明, 库区内的介质条件和初始应力状态是能否发生水库地震的基本因素。

如何研究一个水库区的初始应力状态? 怎样分析即将兴建的大型水库库区内会不会发生地震? 这是水库诱发地震研究的一项重要课题。

近年来, 遥感技术在地震地质工作中得到了广泛的应用, 特别是应用卫星图像可以清晰显示出由于新构造运动所形成的隆起山地、低陷平原及盆地等地貌特征, 便于进行宏观和室内的综合分析研究。更重要的是, 经过光学方法和计算机数字化图像处理手段, 卫星影像中线性构造信息更加突出, 在水库区内的线性构造有的为活动断层, 有的为次一级小断裂以及不同岩性接触界线等。应用卫星图像分析研究线性构造的规模、性质和组合特征等, 无疑是探讨水库地震成因的一种不可忽视的手段。

## 二、结合卫星图像, 分析水库地震形成原因

塌陷型水库地震, 如我国的前进水库、南冲水库、乌江溪水库以及黄石水库等, 地震的形成主要是由于库水的各种效应随着库水位的升高而加强, 当达到某一特定值时, 岩溶区的块体便突然运动所致<sup>[2]</sup>。

构造型水库地震形成的原因较复杂, 一般应具备三个基本条件: 一是库区及其附近地壳活动性较强, 二是库区内存在着有利于应力集中的地段, 三是库区内水的渗透条件较好。根据卫星图像分析, 我国的几个构造型水库地震震中区具备有上述几方面的特征。

### 1. 发生构造型水库地震的库区大多位于地壳差异运动较强的部位

据《中国陆地卫星假彩色影像图集》(1:50万)中有关图像显示, 参窝水库区西侧为松辽沉降平原; 丹江口水库区的东侧为南阳盆地; 新丰江水库的东侧为河源断陷盆地; 而柘林水库区则完全位于修水断陷盆地内。它们在区域构造位置上多为新华夏系第二沉降带与两

侧隆起带的过渡部位。因此库区及其附近存在着升降运动的不均衡性。同时，在库区内这种差异运动的势态仍在继续，如新丰江水库区内并列着河源断陷盆地和五斗租断块上升区、客家水断陷盆地和洞源隆起区等上升、下降地段的相间展布。再如丹江口水库区内以近南北向的丹江河道为界，以东为李官桥沉降区，以西为上寺隆起区，并得到了形变测量结果的证实。这些库区及其附近的新构造运动是促使库区内初始构造力增强的重要原因。

相反，在卫星影像图上一些无震水库区由于其整体性较好，库区内不存在着明显的反向运动，所以蓄水以后的若干年来库区内没有出现地震活动。例如福建省的山美水库位于长乐—诏安活动断裂带附近，山东省的峡山水库位于郯庐断裂带（北段）以西约10km处，这两座水库均位于构造应力作用较强的地域，但由于其库区的整体性较好，库区内升降差异运动较弱。再如库容超过100亿立方米的新安江水库，蓄水后未曾发生有感地震，原因之一是因为库区及其附近自新构造运动期以来，一直是以大面积整体性地壳抬升运动为主。

## 2. 构造型水库地震的震中大多位于有利于应力集中的地段

构造型水库地震形成条件还必须是库区内存在着有利于应力集中的地段：

### (1) 库区内某一部位线性构造发育

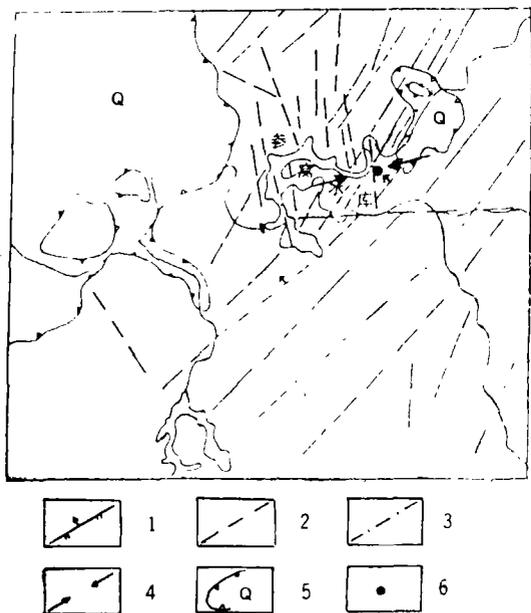


图1 参窝水库卫星影像解释图

1.断层及倾向 2.推测断裂 3.线性构造 4.主压应力方向 5.第四纪沉积及边界 6.地震震中

Fig. 1 Explanation of the satellite picture taken at the area of Canwo reservoir

在卫星影像图上参窝水库区的震中附近，线性构造发育，其中北东组数量多且密集成带，其次是北北西组及近东西组。上述三组线性构造在震中附近相交切（图1），并在北东—南西方向的主压应力作用下<sup>1)</sup>，北东、北北西向两组构造组成“X”型交叉点，是有利于应力集中的部位，在1974年12月24日形成了4.8级水库诱发地震。

另外，在卫星影像图上丹江口水库区内主要发育有三组线性构造，其中以北西西组最为发育，其次是近南北组及北东组（图2）。1973年11月29日宋湾4.8级地震震中区为北北西北北东及近南北向三组线性构造相交汇部位。

拓林水库1972年10月14日3.2级地震震中区：在卫星影像图上显示有三组构造，一是近东西向展布的弧形断裂，二是北东向和北北西向线性构造；它们在震中区相交切（图3）。在近东西向区域构造应力场作用下，震中附近形成了有利于应力集中的部位。

人们熟悉的广东新丰江水库，同样在库区卫星影象上显示出清晰的线性构造图象。1962年3月19日新丰江6.1级地震，也发生在库区内几组线性构造交部汇位。

1) 国家地震局全国地震烈度区划编图组，中国晚第三纪至现代构造应力场图解，1987



图2 丹江口水库区卫星影像解释图

1.断层及倾向 2.推测断层 3.线性构造 4.震源机制解得主应力方向 5.第四系 6.地震震中

Fig. 2 Explanation of the satellite picture took at the area of Danjiang reservoir

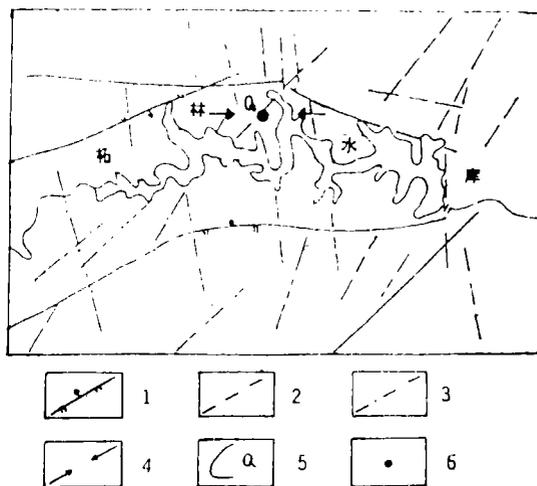


图3 柘林水库区卫星影像解释图

1.断层及倾向 2.推测断层 3.线性构造 4.主压应力方向 5.第四系 6.地震震中

Fig. 3 Explaintion of the satellite picture took at the area of Zhelin reservoir

## (2) 库区附近有活动性强的深大断裂通过

如果水库区有规模大、活动性强的深断裂通过，并影响着库区地壳活动特征，无疑对库区内的地震形成会起到重要的控制作用，也是发生强烈构造型水库地震的地质构造条件。

研究资料表明，水库蓄水以后，水体荷载将产生向下的正应力，同样库区岩体也具有向下的自身重力。而不同性质的断层活动，将使库区块体发生倾滑、逆冲及水平移动。如果水库区位于该活动断层的不同部位，在区域构造应力场的作用下，会使水体荷载应力、岩体自重应力的合力增强或减弱。当合力增强时有利于块体运动，有可能形成强烈地水库诱发地震，当合力减弱时不利于块体运动，使水库区内的初始应力减小，不利于诱发地震。所以，由于水库区位于活动断层的不同部位，有的会发生地震，有的则不然，这也是构造型水库地震形成的重要因素之一。

为研究深大活动断层与水库诱发地震的关系，提出了以下模型（图4）：

### 应力增强型（I型）

如果水库区位于正断层上盘（图4—a），构造应力场的主压应力方向与断层走向一致，而引张应力方向与断层面垂直，此时岩体、水体荷载应力促使引张应力增强，有利于正断层性质错动进而诱发地震。

如果水库区位于逆断层下盘（图4—b），主压应力垂直于断层面，岩体、水体荷载应力也促使构造应力增强，有利于断层错动进而诱发地震。

如果水库区位于平移断层上盘（图4—c），主压应力和断层面呈锐角相交，岩体、水体荷载应力亦使构造应力增强，不但有利于断层的平移滑动，也往往伴随有一定的倾滑

分量，也有利发震。

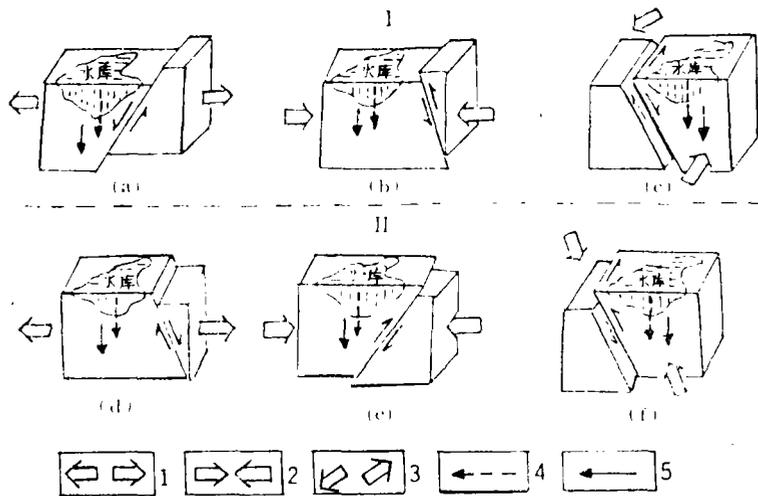


图4 水库区位于活动断层不同部位引起应力增强或减弱的模型

1.主张应力方向 2.主压应力方向 3.扭应力方向 4.水体荷载应力方向 5.岩体自重应力方向

Fig. 4 Mould of stress superposition caused by the difference part of active fault in the reservoir area

#### 应力减弱型（Ⅱ型）

如果水库区位于正断层下盘（图4—d）、逆断层上盘（图4—c）和平移断层上盘（图4—f），那么，由于水库蓄水会使初始构造应力作用减弱，不利于断层错动。此模型能合理解释为什么有的水库区虽然位于活动断层附近，但自蓄水以后极少发生地震以及地震活动反而减弱的实例。

用上述模式，对照我国的水库地震震例，只有新丰江水库属Ⅰ型中的b类。新丰江水库库容有139亿立方米，水体集中，所产生的荷载应力较大；库区附近的河源—邵武断裂活动性强，在卫星影像图上断裂呈条带状弯曲展布，其影像十分突出、清晰。断裂控制着河源新生代断陷盆地的边界和河流流向，沿断裂两侧地貌反差大，为不同地貌单元的分界线。断裂的构造地貌形态发育，显示出断裂具有强烈的活动标志<sup>(3)</sup>。另外，其他资料如物探、地形变测量等都证明该断裂是一条活动性强的深大断裂。当水库蓄水以后，在北西—南东方向构造应力场作用下，初始应力作用进一步增强，有利于断层错动进而发生了强烈地震。

我国台湾曾文水库位于活动性强的竹沟断层之上盘，水库蓄水使库区内构造应力减弱，不利于逆断层错动，属Ⅱ型中的C类，所以，水库蓄水后库区地震活动的频度明显减小，特别在高水位期间，地震活动几乎消失，其中，在第一次高水位过后，地震震中有向库区外围迁移的迹象。

在国外，属于Ⅰ型和Ⅱ型的震例均有报导<sup>2)</sup>。如卡里巴水库位于东非裂谷西南分支断层之上盘，库区内所发生的一系列地震是由于库区所在的地块沿北北东向断层向下滑动所造成，属Ⅰ型中的a类；苏联努列克水库地震可能属Ⅰ型中b类，由于逆断层错动所致；柯依那水库地震属Ⅰ型中C类，即地震的形成可能是由于一条近南北向垂直断层的左旋走向滑动引起的；另外，美国的安德森水库位于走滑断层附近，蓄水后在库区附近形成长约10km的地震空区，说明水库蓄水以后，断层面的构造应力减弱，属于Ⅱ型中的f类。

### (3) 具有一定活动性的断裂通过库区

除新丰江水库区外，我国的其他水库地震震例如参窝水库、丹江口水库和拓林水库，库区附近并没有像河源—邵武深大断裂那样的活动型深大断裂展布，但它们也都发生了水库地震。布克(G. Bock)认为，水库区内不论发育有正断层、逆断层还是平移断层，只要在有利于地震形成的应力作用方向上，水库蓄水都可以使初始应力状态发生改变。因此，当水库区内有一定活动性的断裂通过时，根据前述模式，由于主要蓄水地段位于断层的不同部位，也会使此地段应力增强或减弱。当应力增强时则往往诱发地震，不过其震级一般都小于5级，地震频度也较低。

丹江口水库区内发育有一条规模较大的均郟断裂，在卫星影像图上其线性清晰，地貌特征突出，其他资料也证明断裂近期活动并未停歇<sup>[4]</sup>。该断裂断层面倾向北北东向，即丹江库区所在的一侧。由于主压应力方向和断层面呈锐角相交，不仅有利于断层的走向滑动，而且伴随有一定的倾滑成分，而水库蓄水则加大了倾滑分量，类似于Ⅰ型中的C类图，因此，丹江库区林茂山3.8级地震的形成，与北西—南东方向构造应力场作用下的北西西向均郟断裂的活动具有一定关系。

参窝水库区南东侧展布有太子河断裂，断层面倾向于库区所在的一侧，在北东—南西向主压应力作用下，北东、北北东向断裂既产生走向滑动也伴随倾滑。由于水库、蓄水使构造应力作用增强，于是形成了参窝水库4.8级诱发地震。

拓林水库区的南北两侧分别受呈弧形弯转的沙田港断层和武宁断层所控制，而两断层面都倾向于库区，水库蓄水以后在近东西向主压应力作用下，构造应力作用进一步增强，有利于断层错动，在水库北缘发生了3.2级和3.0级地震。

### 3. 库区内水有良好的渗透条件

水库地震的形成还与库区内水的渗透条件密切相关。根据卫星影像图可以清楚的了解水库区内基岩裸露区、裂隙发育区的分布，分析有利于库水渗漏部位；根据卫星影像图中线性构造，特别是其中的活动断层的性质、规模及组合特征等分析水库区内库水渗漏“入口”；利用卫星影像图区分不同岩相地层分布，圈出库区内透水层和不透水层。研究水库区及其附近库水的封闭环境和储藏条件。研究表明，诱震水库区一般都存在有利于库水渗漏的构造部位和良好的渗漏通道，又具有封闭的地下环境。库水向地下深处渗透，由于水的各种效应特别是增大了地下岩体的孔隙压力，使岩石的某些性质发生了变化或者增强断层活动性进而诱发地震。

在卫星影像图上，丹江口水库区的宋湾附近和林茂山一带基岩裸露、断裂与裂隙发育具备水的渗漏“入口”和通道；参窝水库区渗透条件较好的地段也主要在水库上游北东向与北

---

2) 国家地震局情报资料室，地震译丛，1981年第5期

北西断裂相交汇的部位；新丰江水库区内基岩裸露，几组不同方向的断裂相交切，水库蓄水以后库区内存在着良好的渗透条件。另外，柘林水库区南北两侧地势较高，形成了天然的屏障，为一理想的储水盆地，水位不断升高使库区北侧断层附近的幸福山一带被水淹没，库水易于向深处渗漏，具有较好的渗漏通道和封闭的地下环境。上述诸水库都发生了不同强度的诱发地震。

### 三、结 语

通过应用卫星影像对我国几个发震水库和无震水库的实例分析，可以得出以下两点认识：

(1) 应用卫星影像可以分析水库区及其附近新构造运动的特征、线性构造发育情况，特别是断层的展布、规模、性质及其活动标志，以及库区内水的渗透条件等，为水库诱发地震成因研究提供了一种方法和手段。

(2) 当水库库区位于活动断层的不同部位时，在区域构造应力场的作用下，由于主压应力呈不同的方向和角度作用到断层面上，将会引起库区内应力作用增强或减弱，如果应增强则有可能诱发地震活动。

### 参 考 文 献

- 〔1〕孔凡健等，1982，我国水库地震若干活动特点，地震学刊，(3)。
- 〔2〕孔凡健，1984，黄石水库的岩溶塌陷型水库地震，中国诱发地震，地震出版社。
- 〔3〕谢广林等，1989，中国主要活动断裂带卫星图像集，科学出版社。
- 〔4〕郝用威，1980，丹江口水库地震地质特征，丹江口水库诱发地震文集，地震出版社。

## THE ANALYSIS ABOUT THE ORIGIN OF RESERVOIR INDUCED EARTHQUAKES WITH SATELLITE IMAGERY

Kong Fanjian

( Institute of Seismology, State Seismological Bureau )

[Abstract] In this paper, more than several events of reservoir induced earthquakes in China are analysed by the use of the satellite imagery. The mould of stress, superposition is put forward in the reservoir region. Some problems related to the origin of reservoir induced earthquakes are also discussed in this paper.

[Key words] Reservoir earthquake, Satellite imagery, Seismogenesis, Seismogenic condition